

**支承損傷に伴う牛深ハイヤ大橋の
恒久対策技術検討委員会**

報 告 書

令和7年3月

I. 委員会の設立

はじめに

本報告書は、牛深ハイヤ大橋において2021年8月に確認された支承部の損傷に関し、道路管理者である熊本県が設置した「支承損傷に伴う牛深ハイヤ大橋の恒久対策技術検討委員会（以下「委員会」という）」が、原因の調査や恒久対策に対する技術的・専門的見地から熊本県に対して行った助言について取りまとめたものである。なお、調査や数値解析は道路管理者である熊本県が実施し、委員会は調査の内容や方法についての助言、調査結果の評価および恒久対策に関する助言を行った。図1に恒久対策実施までの流れおよび本報告書の構成を示す。

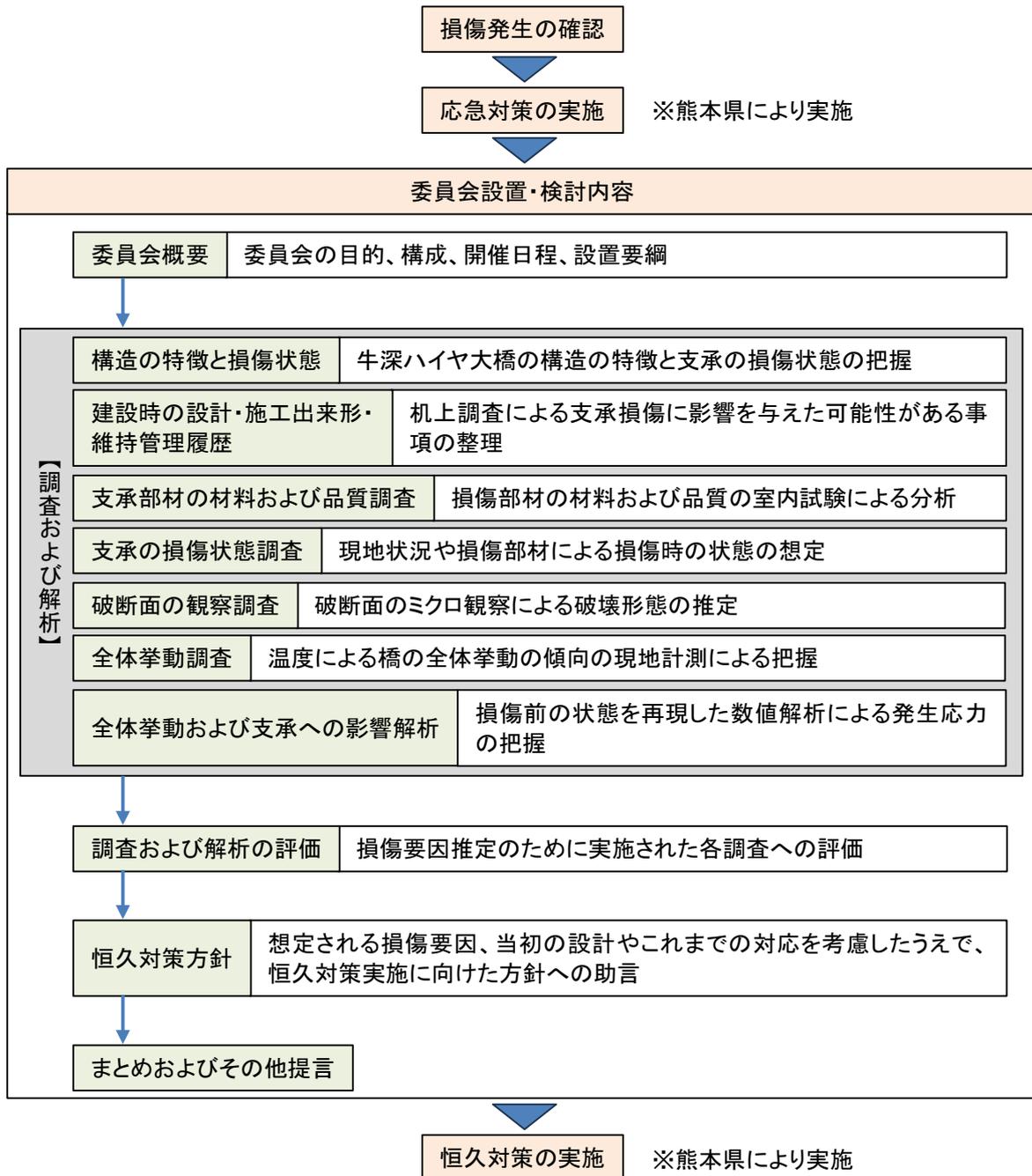


図1 恒久対策の実施までの流れおよび本報告書の構成

委員会設置までの経緯

対象橋梁では、2021年8月23日、天草市から道路管理者（熊本県）に異音が発生していることが報告され、2021年8月27日には、P6橋脚の支承に損傷を確認した。その後、熊本県は、全面通行止めを行い、2021年8月31日にP5橋脚(A1橋台からA2橋台を望んだときの左側（以降は左・右で示す）、A2橋台(右)支承部の損傷を確認、2021年10月20日～12月23日に損傷箇所に対し応急対策工事を実施し、翌24日に供用を暫定的に再開した。表1に熊本県による発見から応急対策までの経過を示す。

応急対策は、恒久復旧実施までの期間の橋の安全と通行を確保するためのものである。ローラーや支圧板が破損し、支点が脆弱な状態になっており、桁形状と支承高さから外力による上部構造の不安定化が懸念されること、支点間の荷重分担が変化していることで、損傷していない支承にも悪影響を及ぼすことが懸念されることから、桁からの鉛直、水平力に対して、突発的な変位発生の防止と抵抗力を与える支点機能を暫定的に確保する対策が実施された。なお、支点周りの荷重分担や応力状態等の詳細が不明なままの対策であることから、暫定的な供用中、応急対策が想定通りの機能を発揮し、桁を支持する機能に異常がないことを監視するためのモニタリングも実施された。

熊本県は、以上のような応急対策を検討し実施する一方で、要因を把握し、再発防止が可能な上部構造と下部構造の接続方法により橋を復旧するためには、高度な技術検討が必要であることから、損傷の原因究明および恒久対策について専門的な見地からの助言を得るため、「支承損傷に伴う牛深ハイヤ大橋の恒久対策技術検討委員会（委員長：松村政秀教授）」を設置した。

表1 熊本県による発見から応急対策

月日	実施者	内容	備考
2021/8/23	天草市	熊本県への連絡	異音発生
2021/8/24 ～27	道路管理者 (熊本県)	熊本県による 調査(1回目)	異音発生原因と位置を調査 ⇒27日AMにP6支承(右)で損傷を確認
2021/8/27		通行止め開始	18時から全面通行止め
2021/8/28		応急対策工事 一部通行止め解除	P6支承(右)での応急対策工事開始 ⇒31日工事完了、自転車・歩行者の通行再開
2021/8/31		熊本県による 調査(2回目)	外観調査 ⇒P5支承(左)とA2支承(右)で損傷確認
2021/10/1 ～9		熊本県による 調査(3回目)	全支承内部調査 ⇒A1支承(右)、P1支承(左右)、P2支承 (左)、A2支承(左)損傷確認
2021/10/20 ～12/2		応急対策工事	P5(左)支承、P6(左)支承、A2(右)支承で実施 実施内容：鉛直支持の回復（鋼板+テフロン 板）、橋軸直角方向固定装置（RC壁）、段差 防止構造（サンドル） ※A1・P1・P2支承で段差防止構造（サンド ル）のみ実施
2021/12/24			供用再開

熊本県が実施した応急対策

熊本県は、損傷を確認した A1、P1、P2、P5、P6、A2 に、サンドルによる段差防止構造を設置した。また、P5、P6、A2 では、破断したローラーや支圧板を撤去し、鋼板+PTFE 板による鉛直支持を行うとともに、サイドブロックの損傷も懸念されたため、コンクリートブロックによる橋軸直角方向固定装置も設置した。表 2 に各支承部での応急対策の実施状況を示す。

表 2 応急対策の実施状況

対象箇所	鉛直支持	橋軸直角方向固定装置	段差防止構造
A1	-	-	
P1	-	-	
P2	-	-	
P5			
P6			
A2			

Ⅱ. 基本事項

橋梁概要

架橋位置：熊本県天草市牛深町（牛深漁港）

建設時期：1991年（H3）から1999年（H11）

適用基準：道路橋示方書（H2）、道路橋支承便覧（S48）

橋の重要度：A種の橋（道路橋示方書・同解説V耐震設計編（H29）における区分）

橋格：1等橋（TL-20）

本線部橋梁概要：図2に牛深ハイヤ大橋の側面図、平面図および上部構造断面図を示す。

橋長：L=1,229.0m（海上部 883.0m、取付部 346.0m）

上部構造形式：7径間連続鋼床版曲線箱桁（海上部）、PC箱桁、PC中空床版（取付部）

下部構造形式：中空壁式コンクリート橋脚（P1～P6）、逆T式橋台（A1・A2）

基礎構造形式：深礎杭基礎（A1）、鋼管矢板基礎（P1・P2）、場所打ち杭基礎（P3～A2）

支間割：84m + 150m + 135m + 120m + 150m + 140m + 99m

橋体幅：13.6m（有効幅員：車道部 7.0m + 歩道部 2.5m×2）

ループ部橋梁概要：

橋長：L=310.25m

上部構造形式：7径間連続RC床版非合成曲線箱桁

下部構造形式：円形コンクリート柱橋脚（PR1～PR6）、逆T式橋台（AR2）

基礎構造形式：場所打ち杭基礎（PR1・PR3～PR6）、直接基礎（PR2・AR2）

支間割：34.25m + 46.00m×6径間

橋体幅：12.5m（有効幅員：車道部 9.0m + 歩道部 2.5m）

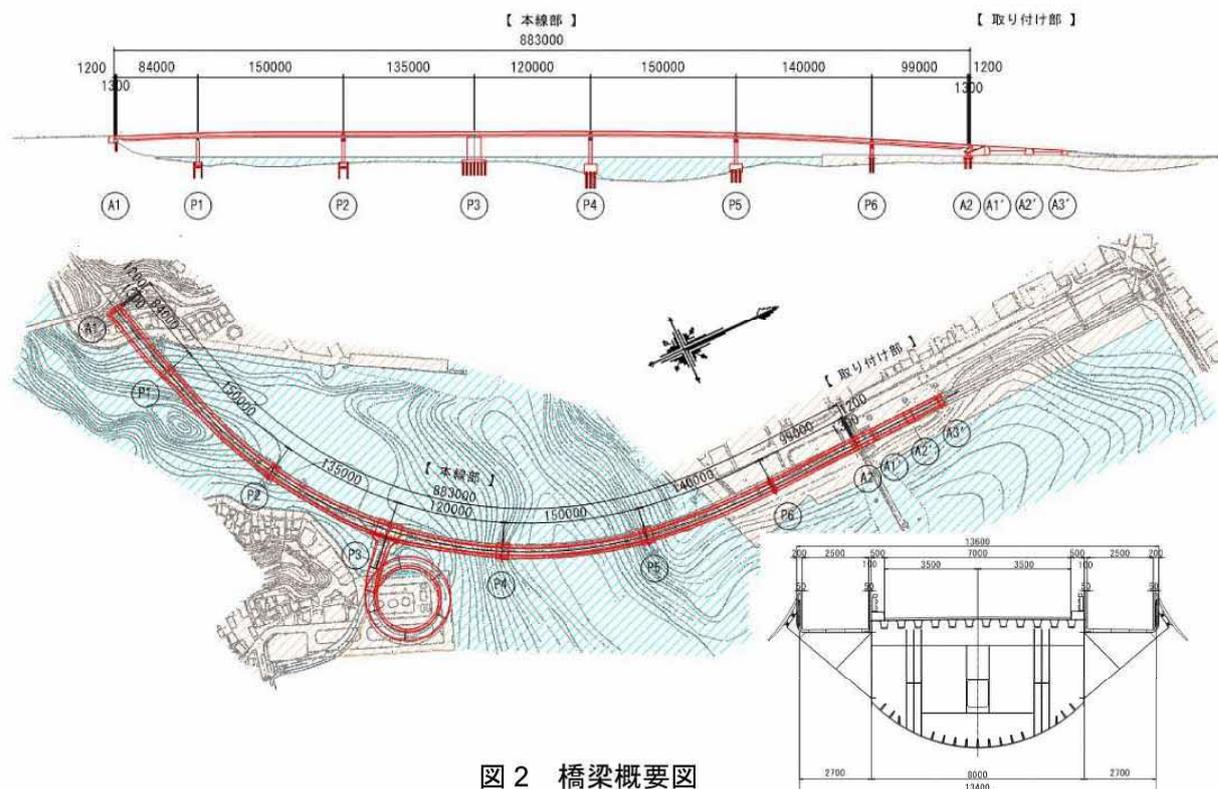


図2 橋梁概要図

支承各部位の名称

本報告書に記載の「支承各部位の名称」は図3のとおりである。

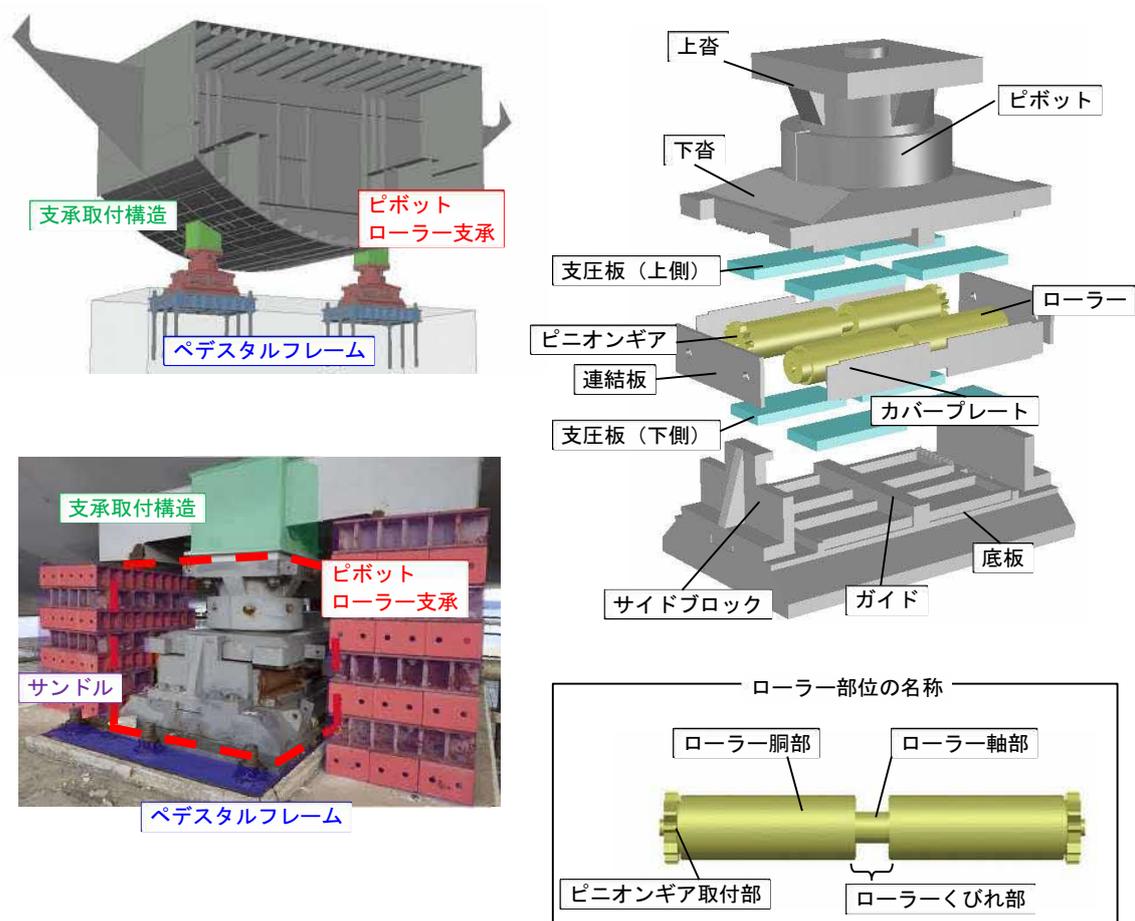


図3 支承各部位の名称

ピボットローラー支承の荷重伝達機構は以下のとおりである。鉛直荷重は上側の支圧板からローラーへと伝わり、ローラーから下側の支圧板へと伝わる。

ローラー回転方向の水平荷重に対しては可動となる。ローラー回転直角方向の水平荷重は、ローラーのくびれ部から導板（ガイド部）へと伝わる。

鉛直荷重の荷重伝達：「上沓→下沓→上支圧板→ローラー→下支圧板→底板」

ローラーが回転する方向以外の水平荷重の荷重伝達：

「上沓→下沓→ローラー（軸部）→導板（ガイド）→底板」

目 次

1. 委員会概要.....	1
1.1 委員会名称.....	1
1.2 目的.....	1
1.3 委員構成.....	1
1.4 委員会の開催.....	1
2. 調査および解析	3
2.1 構造の特徴と損傷状態	3
2.2 建設時の設計・施工出来形・維持管理履歴	14
2.3 支承部材の材料および品質調査	30
2.4 支承の損傷状態調査.....	41
2.5 破断面の観察調査	49
2.6 全体挙動調査.....	54
2.7 全体挙動および支承への影響解析	103
3. 調査および解析の評価.....	137
4. 恒久対策方針	141
4.1 損傷原因のまとめと復旧に向けた提言	141
4.2 モニタリング結果を受けた恒久対策での留意点	141
4.3 熊本県の復旧方針に基づいた留意点の提言	142
5. まとめおよびその他提言	145
5.1 損傷要因推定.....	145
5.2 恒久対策への助言	145
5.3 支承構造変更に伴う維持管理の留意点	146
5.4 同じ構造を持つ橋梁について.....	146

1. 委員会概要

1.1 委員会名称

支承損傷に伴う牛深ハイヤ大橋の恒久対策技術検討委員会

1.2 目的

牛深ハイヤ大橋の支承において確認された損傷の原因究明および恒久対策の検討に際し、高度な技術的・専門的見地から次の事項についての指導・助言を行うことを目的とする。

- (1) 支承の損傷要因
- (2) 損傷要因に基づく恒久対策
- (3) 上記に掲げるもののほか、委員長が必要と認める事項

1.3 委員構成

委員会は以下の委員をもって構成する。

委員長	松村 政秀	熊本大学	くまもと水循環・減災研究教育センター	教授
委員	山口 栄輝	九州工業大学	建設社会工学科	教授
委員	西田 秀明	(～2022年3月)	国土交通省 国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター 熊本地震復旧対策研究室	室長(当時)
委員	白戸 真大	(2022年4月～)	国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 橋梁研究室	室長
委員	大住 道生	国立研究開発法人	土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ	上席研究員

1.4 委員会の開催

表 1.4-1 に委員会の開催日および主な議題を示す。

表 1.4-1 委員会の開催日程

	開催日	主な議題
第1回	2021年(R3) 11月2日	・支承の損傷要因および恒久対策や再発防止の検討に必要な調査の項目
第2回	2022年(R4) 7月12日	・現地調査、机上調査、損傷部観察、材料調査結果の評価 ・恒久対策方針(支承形式)への助言 ・恒久対策決定に向けた解析方法への助言
第3回	2022年(R4) 10月6日	・支承外面観察、全体挙動調査(現地計測および3次元FEMによる解析的調査)結果の評価 ・恒久対策方針(支承形式と支承取付構造)への助言
第4回	2022年(R4) 12月14日	・損傷の主要因の整理 ・恒久対策方針の策定(支承形式と支承取付構造)への助言
第5回	2023年(R5) 11月14日	・報告書の構成 ・今後の維持管理

支承損傷に伴う牛深ハイヤ大橋の恒久対策技術検討委員会 設置要綱

(名称)

第1条 委員会の名称は「支承損傷に伴う牛深ハイヤ大橋の恒久対策技術検討委員会」(以下「委員会」という。)と称する。

(目的)

第2条 委員会は、牛深ハイヤ大橋の支承において確認された損傷の原因究明及び恒久対策の検討に際し、高度な技術的・専門的見地から指導・助言を行うことを目的とする。

(所掌事項)

第3条 委員会は、次の事項についての指導・助言等を行う。

- (1) 支承損傷の要因
- (2) 想定された要因に対する解析
- (3) 解析結果に基づく恒久対策
- (4) 上記に掲げるもののほか、委員長が必要と認める事項

(構成)

第4条 委員会は、別紙の委員をもって構成する。

- 2 委員は、熊本県知事が委嘱する。
- 3 委員の任期は、承諾の日から令和7年(2025年)3月31日までとする。なお、委員の申し出による任期途中で交代等については、委員長の了解による。

(運営)

第5条 委員会に委員長を置き、委員の互選によってこれを定める。

- 2 委員長は、会務を総理し、委員会を代表する。
- 3 委員長が職務を行うことができないときは、委員長があらかじめ指名する委員がその職務を代理する。
- 4 委員会は、委員長が招集する。
- 5 委員長は、必要に応じて、議事に関係ある者を臨時に出席させることができる。

(事務局)

第6条 委員会の事務局は、熊本県農林水産部水産局漁港漁場整備課に置く。

(その他)

第7条 本規約に定めのない事項等は、委員会に諮ったうえで、委員長が決定するものとする。

(附則)

この要綱は、令和3年(2021年)10月29日から施行する。

令和5年3月13日一部改正

令和6年3月25日一部改正

令和6年9月27日一部改正

2. 調査および解析

2.1 構造の特徴と損傷状態

2.1.1 構造の特徴

図 2.1-1 に牛深ハイヤ大橋の平面図を示す。牛深ハイヤ大橋の本線部は、曲率半径 $R=460\text{m}$ を有する橋長 883.0m の 7 径間連続鋼床版曲線箱桁橋である。P3 橋脚でランプ部と接続する。「くまもとアートポリス」参加事業の一つとして計画され、周囲の自然景観に対する配慮から、設計にあたっては特に意匠デザインに重点が置かれた橋梁である。

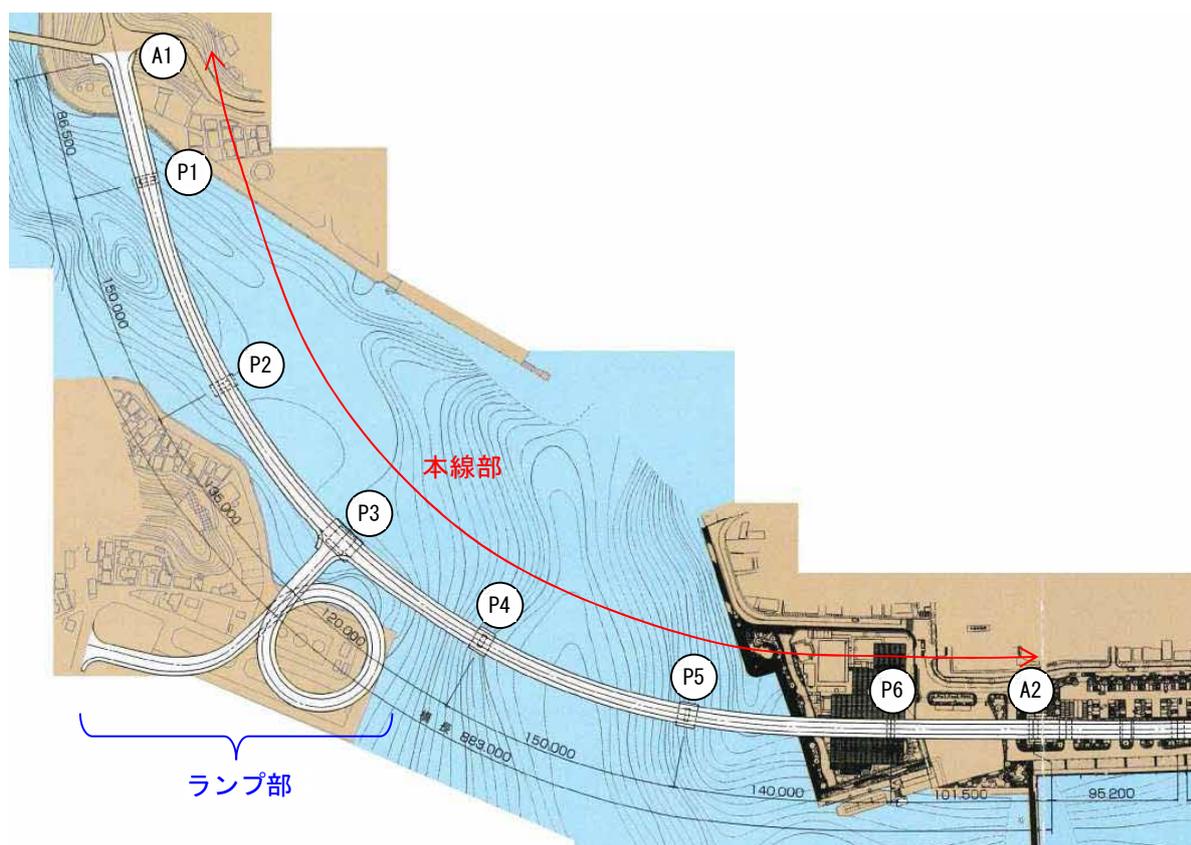


図 2.1-1 牛深ハイヤ大橋の平面図（パンフレットより）

主桁断面形状を図 2.1-2 に示す。主桁断面は上面の鋼床版、曲率半径 5.6m の舟底型の下フランジ、両サイドの垂直なウェブおよび内部の鋼床版・下フランジを補剛する縦リブから構成されている。P2 橋脚から P4 橋脚の間は拡幅されており、拡幅部分の下フランジは拡幅分のみ水平区間を設けている。桁高は 4.8m で一定である。図 2.1-3 に示すとおり、歩道部はプレキャスト床版となっており、高欄と風除板を支持するブラケットにより支持されている。ブラケットは道路縦断に対し直角である。

平面線形への対処として、5m 程度の長さで小さきみに角折りで製作されている。

両端径間は中央径間とのスパン比および平面曲線、架設時の調整等での負反力を見込んでカウンターウェイトとして箱内にコンクリートを打設しており、その荷重は A1 橋台側 150tf、A2 橋台側 100tf である。

支承形式として固定支点はピボット支承、可動支点はピボットローラー支承である。図 2.1-4 に示すとおりランプ橋と接続する P3 橋脚を固定支持、他の支持は可動支承である。支承の設置方向は主桁の接線方向である。

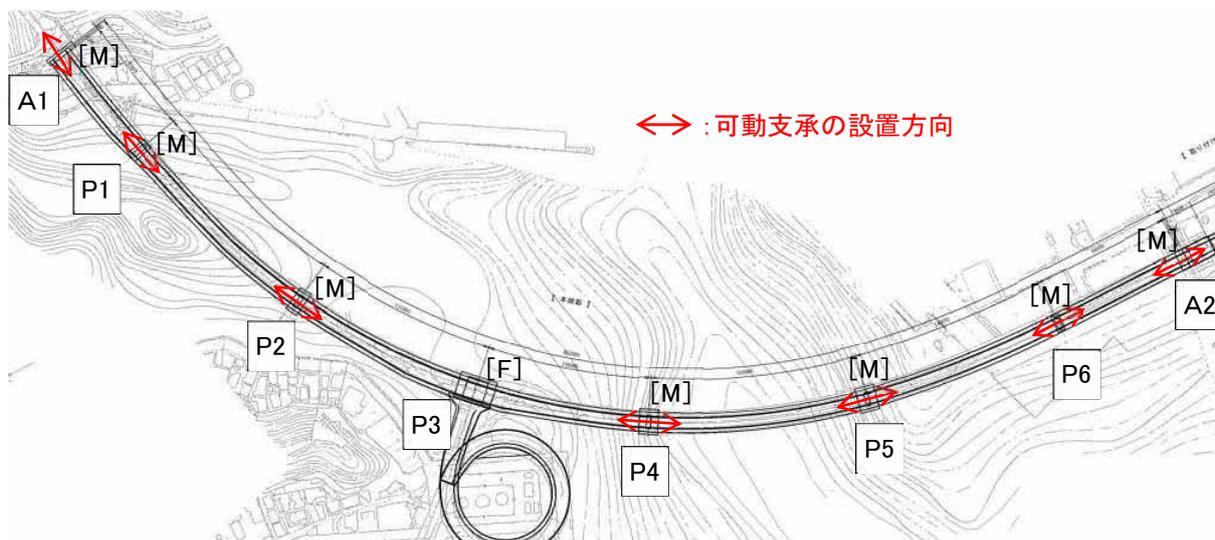


図 2.1-4 牛深ハイヤ大橋の支承配置

A1 橋台および P1 橋脚の支承はアンカーボルトで下部構造に定着されているが、その他の支承はペDESTALフレームと現場溶接されている。ローラー部にはローラー間隔を保持するための連結板が設置されている。また、ローラー部は、カバープレートにて覆われている。

下部構造、基礎構造の形式および橋脚（柱）高を表 2.1-1 に示す。下部構造形式は、橋台は逆 T 式橋台であり、橋脚は中空壁式コンクリート橋脚である。海上に位置する P1 橋脚から P5 橋脚の橋脚（柱）高は 23.3~28.1m であり、陸上に位置する P6 橋脚の橋脚（柱）高は 11.8m である。基礎構造形式は、A1 橋台は深礎杭基礎、P1 橋脚および P2 橋脚は鋼管矢板基礎、P3 橋脚、P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚、A2 橋台は場所打ち杭基礎である。

表 2.1-1 下部構造、基礎構造の形式および橋脚高

番号	A1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	A2
下部構造	逆 T 式 橋台	中空壁式 橋脚	中空壁式 橋脚	中空壁式 橋脚	中空壁式 橋脚	中空壁式 橋脚	中空壁式 橋脚	逆 T 式 橋台
橋脚(柱) 高	-	23.4m	25.5m	23.3m	28.1m	26.0m	11.8m	-
基礎構造	深礎基礎	鋼管矢板 基礎	鋼管矢板 基礎	場所打ち 杭基礎	場所打ち 杭基礎	場所打ち 杭基礎	場所打ち 杭基礎	場所打ち 杭基礎

2.1.2 損傷位置と状態

(1) 支承の損傷状態

支承の損傷状態を把握するため、カバープレートを外し、近接目視およびファイバースコープにより内部のローラーや支圧板の損傷状態を観察した。対象は全支点 (A1・P1・P2・P3・P4・P5・P6・A2) の支承とした。

支承部の支持機能の状態を、ローラーおよび支圧板の損傷の組合せにより、以下に示す3つに区分した。全橋脚の可動支承で支持機能が失われた状態もしくは低下した状態となっていた。

- ・支持機能が失われた状態 (図 2.1-5 参照) : 支持はしているが信頼性が低い状態 (ローラー軸部の破断、支圧板の破断)
- ・支持機能が低下している状態 (図 2.1-6 参照) : 損傷が確認され、支持機能が低下している状態 (ピニオン取付軸の破断、ローラーの一部欠損、支圧板のき裂)
- ・損傷の有無が不明な状態 : 目視で点検できない

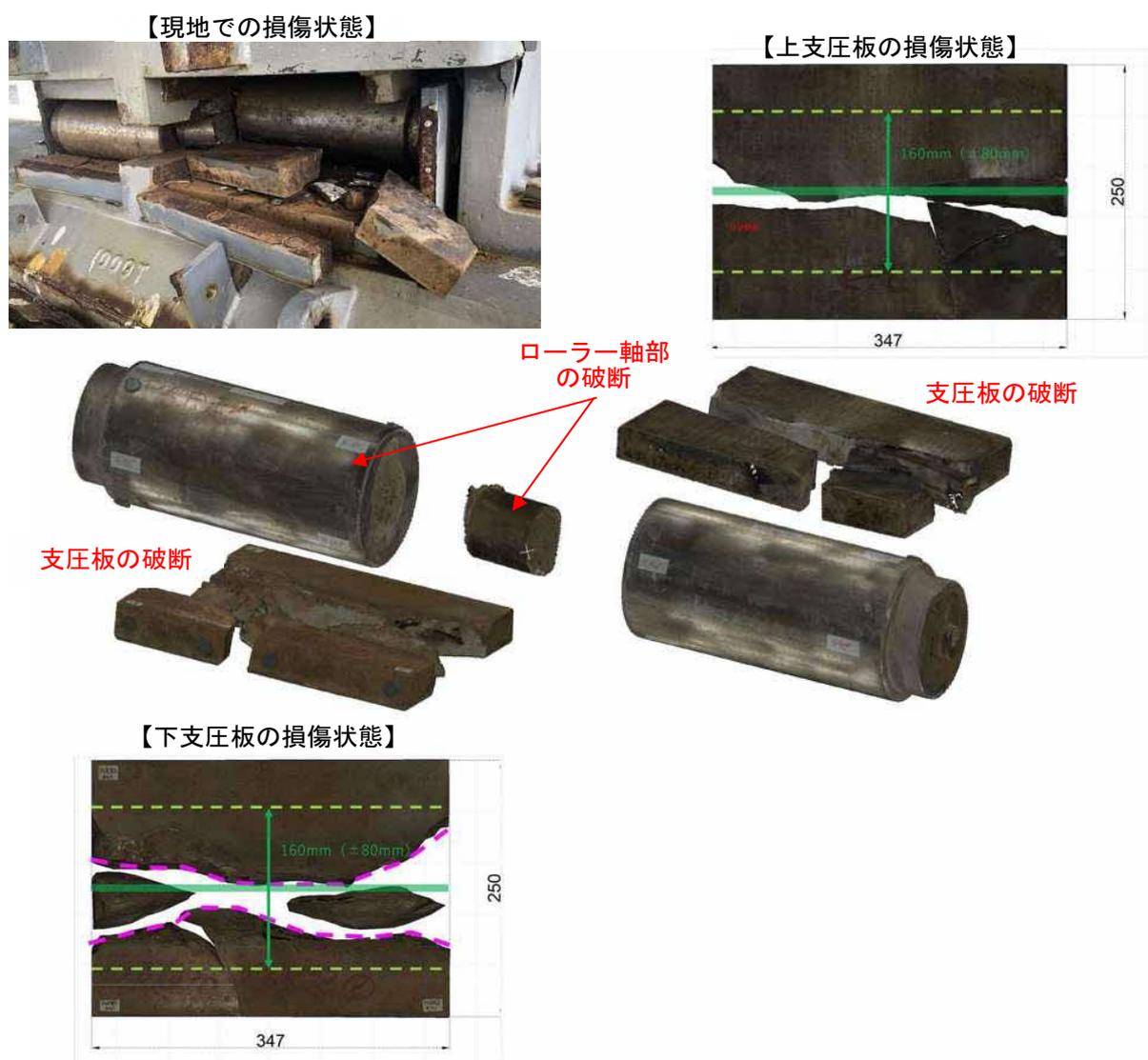


図 2.1-5 支持機能が失われた状態



図 2.1-6 支持機能が低下している状態

表 2.1-2 および図 2.1-7 に橋脚毎の支承の損傷状態を示す。P4 右側を除くすべてのピボットローラー支承で損傷を確認した。表および図の赤色で示す支持機能が失われた状態の箇所は、応急対策が実施された支承である。

図 2.1-8 に損傷概要図を示し、表 2.1-3 および表 2.1-4 にそれぞれ左右支承の損傷状態を示す。支承損傷は橋梁全体で確認できるが、支承毎に損傷部材や損傷程度が異なる。橋軸方向では、固定支承である P3 橋脚から起点側 (A1 側) より終点側 (A2 側) の方が損傷の進行が確認されており、P5・P6・A2 で支圧板の破断があり、支持機能が失われた状態となっている。また、他の橋脚に比べて剛性が高い橋台や橋脚高が低い P6 で損傷が多く発生している。左右の支承 (曲線の内側・外側) では、内側に位置する左側支承の損傷が多いという特徴がみられ、損傷はピニオンギアが設置されているローラーとされていないローラーのどちらにも発生している。

表 2.1-2 支承の損傷状態

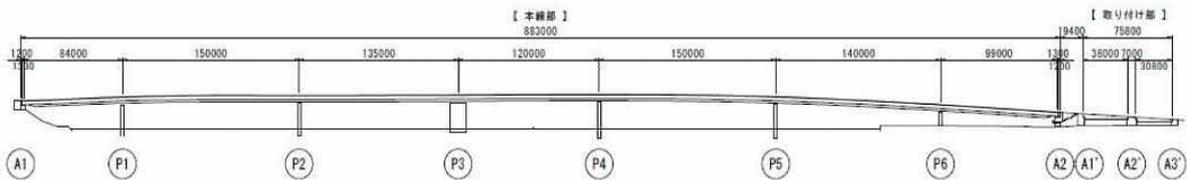
下部構造		損傷状態			
		左側支承		右側支承	
		ローラー	支圧板	ローラー	支圧板
A1 (M)	起点	—	支圧板のき裂	—	—
	終点	—	支圧板のき裂	—	支圧板のき裂
P1 (M)	起点	—	—	—	—
	終点	ピニオン取付軸の破断	—	ピニオン取付軸の破断	—
P2 (M)	起点	—	—	—	—
	終点	ピニオン取付軸の破断	支圧板のき裂	ピニオン取付軸の破断	—
P3 (F)	起点	【固定支承】			
	終点				
P4 (M)	起点	—	支圧板のき裂	—	—
	終点	—	支圧板のき裂	—	—
P5 (M)	起点	—	—	—	—
	終点	ピニオン取付軸の破断	支圧板の破断	—	支圧板のき裂
P6 (M)	起点	—	—	ローラー軸部の破断	支圧板の破断、き裂
	終点	—	支圧板のき裂	—	—
A2 (M)	起点	ローラー表面のかけ	支圧板のき裂	—	—
	終点	ローラー表面のかけ	支圧板のき裂	—	支圧板の破断

※1：赤囲み箇所は管理者により応急対策を実施した箇所

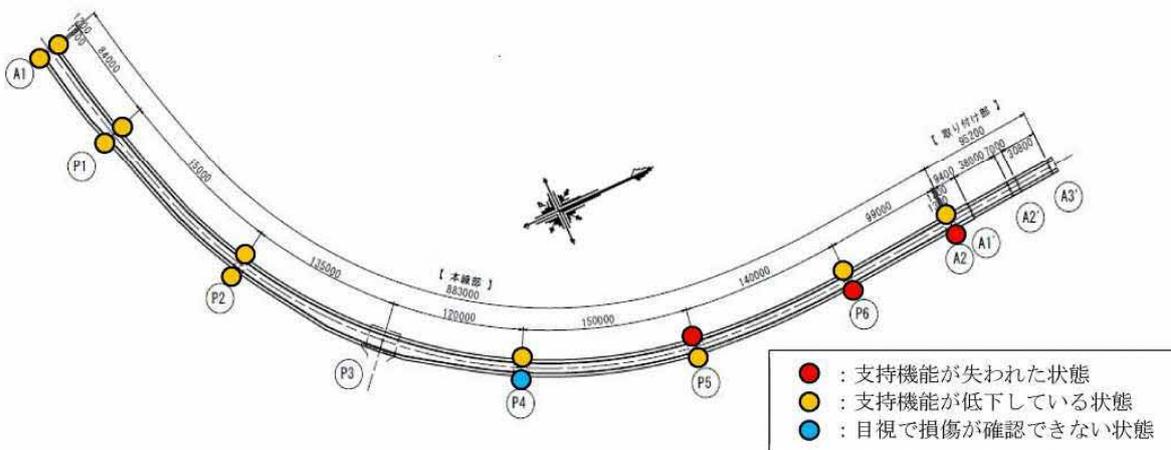
※2：『-』はカバープレートを外して目視できる範囲で損傷が確認されなかったことを示す。

※3：起点はA1側、終点はA2側を示す。

- ：支持機能が失われた状態
- ：支持機能が低下している状態
- ：目視で損傷が確認できない状態



側面図



平面図

図 2.1-7 損傷位置と損傷状態

表 2.1-3 左側支承の損傷状態

左or右	部材	損傷パターン	A1		P1		P2		P3	P4		P5		P6		A2		備考	
			起	終	起	終	起	終		起	終	起	終	起	終				
左側支承	ローラー	ローラー軸部の破断	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	ピニオン	ピニオン取付軸の破断	-	-	-	×	-	×	-	-	-	-	×	-	-	-	-		
	支圧板	表面の剥離	×	×	-	-	-	×	-	-	×	×	-	×	-	×	×	×	
		ローラー軸方向き裂	×	×	-	-	-	×	-	-	×	×	-	×	-	×	×	×	
		ローラー軸方向き裂と周辺破損・ローラー直角方向き裂	-	-	-	-	-	×	-	-	×	×	-	×	-	×	-	-	
カバープレート	破断	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	-		
	カバープレート	ボルトの脱落	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	-	H27点検で挙げられていた損傷

※1:『-』は、近接目視では損傷が確認できなかったが、不可視部があるため不確実性が残る。
 ※2:灰色着色部は対象部材が設置されていない箇所を示す。

図 2.1-8 損傷概要図

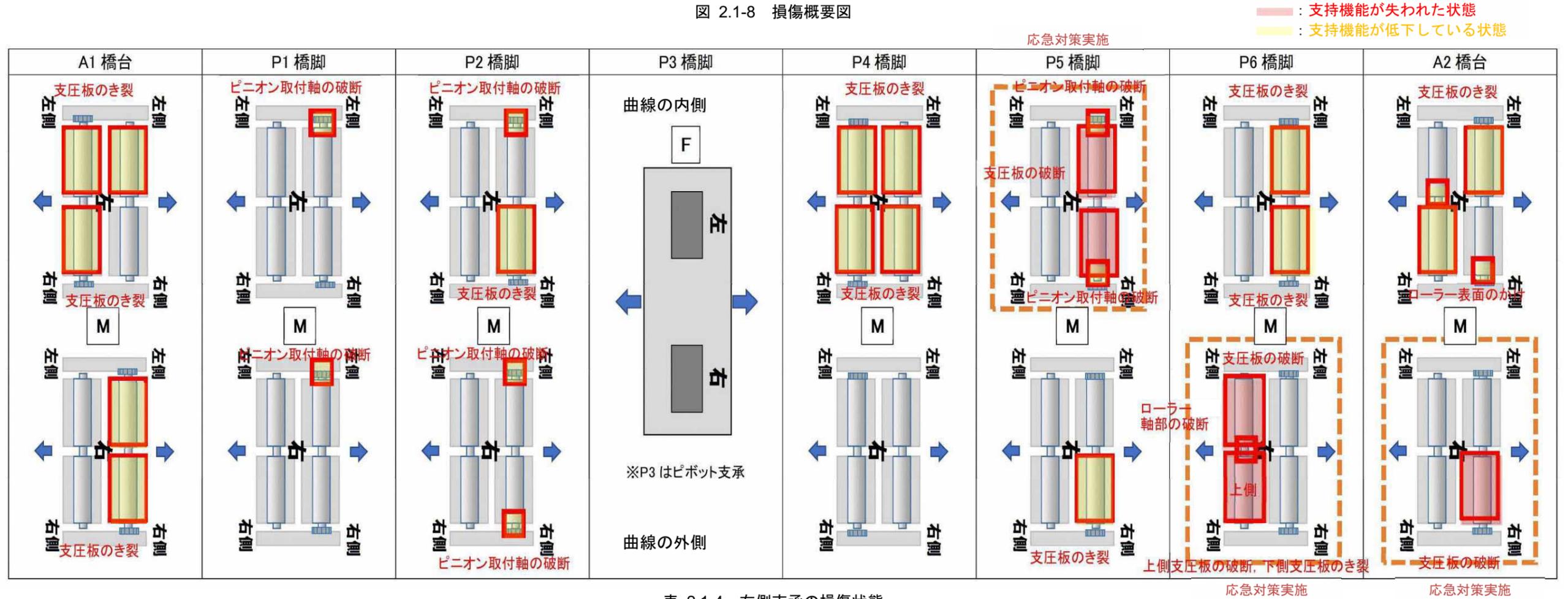


表 2.1-4 右側支承の損傷状態

左or右	部材	損傷パターン	A1		P1		P2		P3	P4		P5		P6		A2		備考	
			起	終	起	終	起	終		起	終	起	終	起	終				
右側支承	ローラー	ローラー軸部の破断	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-		
	ピニオン	ピニオン取付軸の破断	-	-	-	×	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	支圧板	表面の剥離	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	×	-	-	×	
		ローラー軸方向き裂	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	×	-	-	×	
		ローラー軸方向き裂と周辺破損・ローラー直角方向き裂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	×	
カバープレート	破断	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	×		
	カバープレート	ボルトの脱落	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	-	H27点検で挙げられていた損傷

※1:『-』は、近接目視では損傷が確認できなかったが、不可視部があるため不確実性が残る。
 ※2:灰色着色部は対象部材が設置されていない箇所を示す。

(2) 支承取付部の損傷状態

全ての支承取付部周辺の桁内外を目視した。その結果、鋼材のき裂やそれが疑われる変状はなかった。目視調査箇所のうち、特に注意して観察した箇所は図 2.1-9 の赤色で示す位置である。表 2.1-5 に支承取付部の目視観察結果一覧を示し、代表して P5 橋脚の目視観察結果を図 2.1-10 に示す。

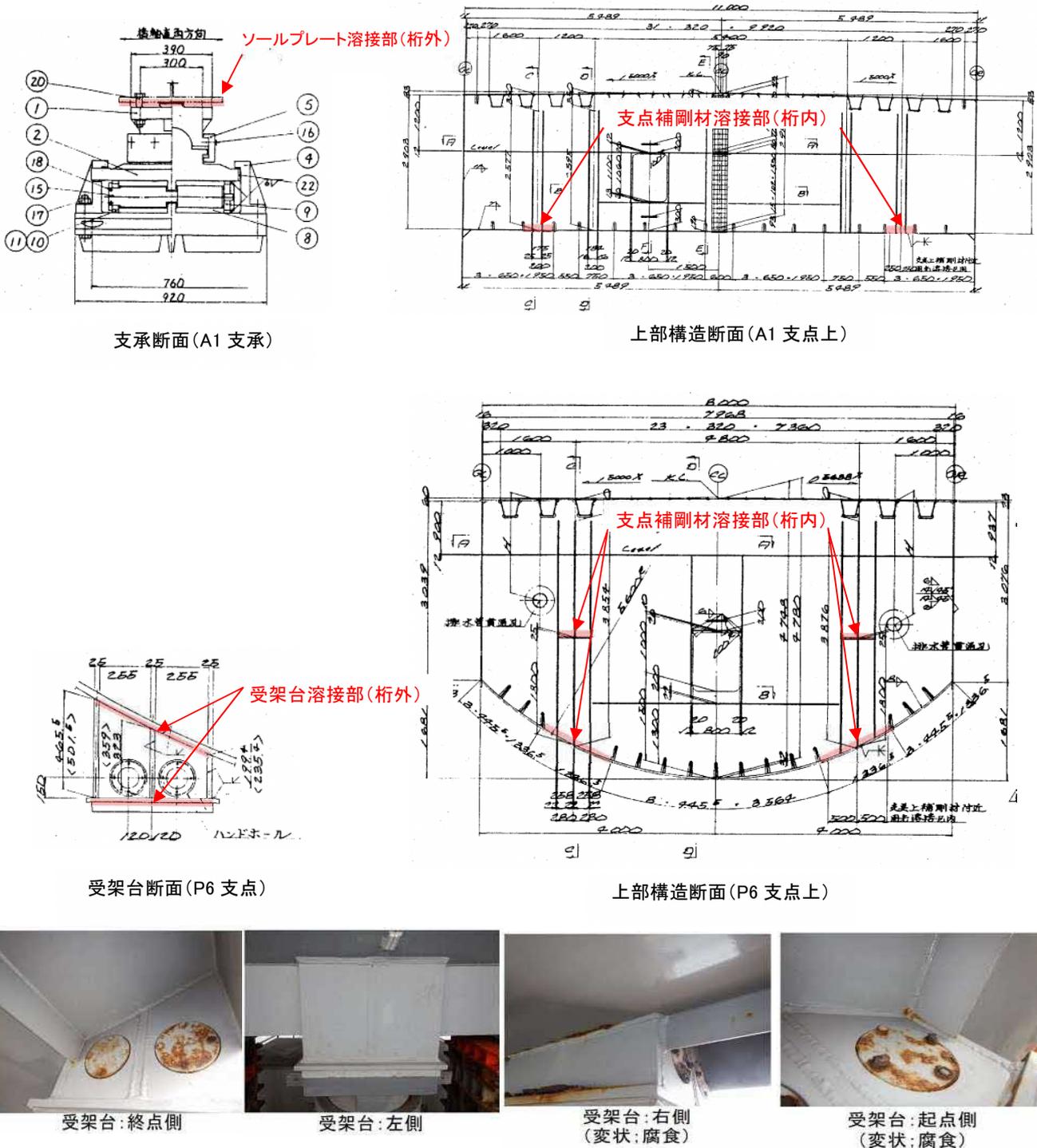


図 2.1-9 目視観察における着目箇所(P5 橋脚)

表 2.1-5 支取付部の目視観察結果一覧

位置		起点	左側	終点	右側	
A1	右側	支点補剛材付近	変状なし	変状なし	---	
		ソールプレート付近	変状なし	変状なし	変状なし	
	左側	支点補剛材付近	変状なし	---	---	
	左側	ソールプレート付近	変状なし	変状なし	変状なし	
P1	右側	支点補剛材上部	変状なし	---	腐食	
		支点補剛材下部	汚れ	---	汚れ	
		ソールプレート・受架台付近	変状なし	変状なし	変状なし	変状なし
	左側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	---
		支点補剛材下部	汚れ	---	汚れ	---
		ソールプレート・受架台付近	変状なし	変状なし	変状なし	変状なし
P2	右側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	
		支点補剛材下部	変状なし	---	汚れ	
		ソールプレート・受架台付近	変状なし	変状なし	変状なし	変状なし
	左側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	---
		支点補剛材下部	汚れ	---	厚膜部の軽微な塗膜割れ	---
		ソールプレート・受架台付近	変状なし	変状なし	変状なし	腐食
P3	右側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	
		支点補剛材下部	汚れ	---	変状なし	
		ソールプレート・受架台付近	腐食	腐食	変状なし	変状なし
	左側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	---
		支点補剛材下部	汚れ	---	汚れ	---
		ソールプレート・受架台付近	変状なし	変状なし	腐食	変状なし
P4	右側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	
		支点補剛材下部	変状なし	---	変状なし	
		ソールプレート・受架台付近	変状なし	変状なし	変状なし	変状なし
	左側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	---
		支点補剛材下部	変状なし	---	変状なし	---
		ソールプレート・受架台付近	腐食	変状なし	変状なし	変状なし
P5	右側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	
		支点補剛材下部	腐食	---	腐食	
		ソールプレート・受架台付近	腐食	腐食	変状なし	変状なし
	左側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	---
		支点補剛材下部	腐食	---	変状なし	---
		ソールプレート・受架台付近	腐食	変状なし	変状なし	腐食
P6	右側	支点補剛材上部	腐食	---	変状なし	
		支点補剛材下部	変状なし	---	腐食	
		ソールプレート・受架台付近	変状なし	変状なし	変状なし	変状なし
	左側	支点補剛材上部	変状なし	---	変状なし	---
		支点補剛材下部	腐食	---	変状なし	---
		ソールプレート・受架台付近	変状なし	変状なし	変状なし	変状なし
A2	右側	支点補剛材付近	ボルト腐食	---	ボルト腐食	
		ソールプレート付近	変状なし	変状なし	変状なし	変状なし
	左側	支点補剛材付近	ボルト腐食	---	変状なし	---
		ソールプレート付近	変状なし	変状なし	腐食	変状なし

※表中の「---」は、対象箇所がないことを示す。

支承取付部目視観察結果：P5橋脚

橋梁名	牛深ハイヤ大橋	調査位置	P5橋脚	調査日	2022/2/12-13	気温	-
-----	---------	------	------	-----	--------------	----	---

左



支点補剛材: 上部/終点側



支点補剛材: 上部/起点側



支点補剛材: 下部右/終点側



支点補剛材: 下部右/起点側
(変状; 腐食)



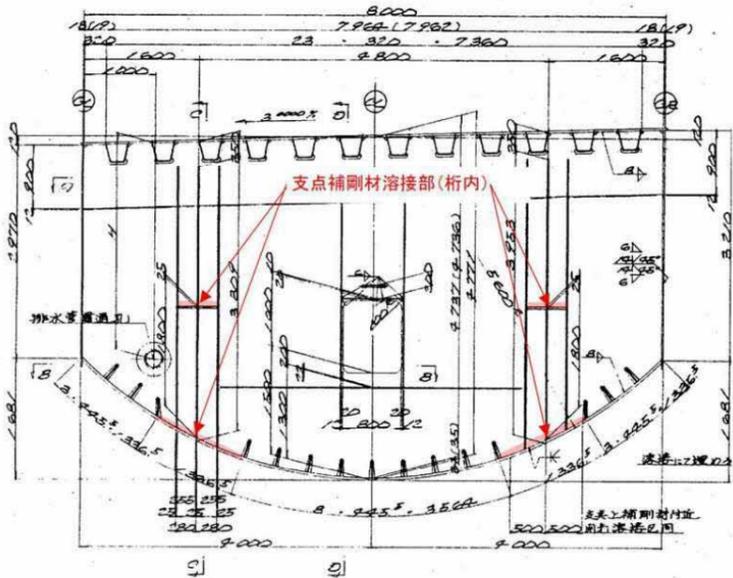
受架台: 終点側



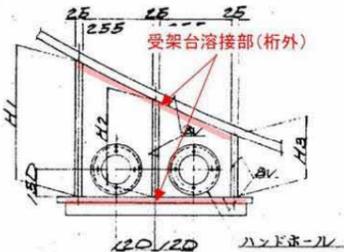
受架台: 左側



受架台: 起点側
(変状; 腐食)



支点補剛材溶接部(桁内)



受架台溶接部(桁外)

右



支点補剛材: 上部/起点側



支点補剛材: 上部/終点側



支点補剛材: 下部右/起点側
(変状; 腐食)



支点補剛材: 下部左/終点側
(変状; 腐食)



受架台: 終点側



受架台: 右側



受架台: 起点側
(変状; 腐食)

図 2.1-10 P5 橋脚の支承取付部の目視観察結果

(3) 損傷位置と状態のまとめ

損傷は支承取付部に確認されておらず、支承本体のみに集中している。また、全橋脚の可動支承で支持機能が失われた状態もしくは低下した状態となっている。起終点や左右（曲線の内側・外側）で支承部材に程度の異なる様々な損傷が生じているが、支持機能が失われた支承は固定支承である P3 橋脚より終点側であった。

なお、各支承で確認された損傷パターンを多い順に並べると表 2.1-6 および表 2.1-7 のとおりとなる。カバープレート取付けボルト脱落は支圧板の損傷と関連していると考えられる。過去にカバープレート取付けボルト脱落が生じていた時点ではすでに支圧板の損傷は進行していたと推測される。

表 2.1-6 左側支承の損傷状態

左or右	部材	損傷パターン	P5	P2	P4	P4	A2	A1	A1	P6	A2	P1	P1	P2	P5	P6	備考	
			終	終	起	終	起	起	終	終	終	終	起	起	起	起		
左側支承	ピニオン	ピニオン取付軸の破断	×	×	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	-		
	支圧板	表面の剥離	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	
		ローラー軸方向き裂	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	
		ローラー軸方向き裂と周辺破損・ローラー直角方向き裂	×	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		破断	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	カバープレート	ボルトの脱落	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H27点検で挙げられていた損傷
ローラー	ローラー中央軸の破断	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

※1:『-』は、近接目視では損傷が確認できなかったが、不可視部があるため不確実性が残る。
 ※2:灰色着色部は対象部材が設置されていない箇所を示す。

表 2.1-7 右側支承の損傷状態

左or右	部材	損傷パターン	P6	A2	A1	P5	P1	P2	A1	P1	P2	P4	P4	P5	P6	A2	備考
			起	終	終	終	終	終	起	起	起	起	終	起	終	起	
右側支承	ピニオン	ピニオン取付軸の破断	-	-	-	-	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	
	支圧板	表面の剥離	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		ローラー軸方向き裂	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		ローラー軸方向き裂と周辺破損・ローラー直角方向き裂	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		破断	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	カバープレート	ボルトの脱落	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H27点検で挙げられていた損傷
ローラー	ローラー中央軸の破断	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

※1:『-』は、近接目視では損傷が確認できなかったが、不可視部があるため不確実性が残る。
 ※2:灰色着色部は対象部材が設置されていない箇所を示す。

2.2 建設時の設計・施工出来形・維持管理履歴

2.2.1 目的

建設時の設計の配慮不足や施工での不具合、損傷が確認されるまでに損傷の前兆や、橋の状況を確認するために、設計図書、出来形検査結果、支承受け入れ時の支承検査報告書、点検調書その他既往資料を整理する。

2.2.2 結果

(1) 建設時の設計

1) 支承設計

1 点固定となる P3 橋脚はピボット支承、その他の可動となる下部構造ではピボットローラー支承となっている。各下部構造の支承規格およびローラー径、支圧板厚は表 2.2-1 の支承諸元に示すとおりである。

表 2.2-1 支承諸元

下部構造	A1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	A2
固定・可動	可動	可動	可動	固定	可動	可動	可動	可動
支承形式	ピボットローラー支承	ピボットローラー支承	ピボットローラー支承	ピボット支承	ピボットローラー支承	ピボットローラー支承	ピボットローラー支承	ピボットローラー支承
支承規格	350tf	1,100tf	1,250tf	1,000tf	1,100tf	1,250tf	1,000tf	350tf
ローラー径	84mm	135mm	135mm	-	135mm	135mm	135mm	84mm
支圧板厚	25mm	42mm	42mm	-	42mm	42mm	42mm	25mm

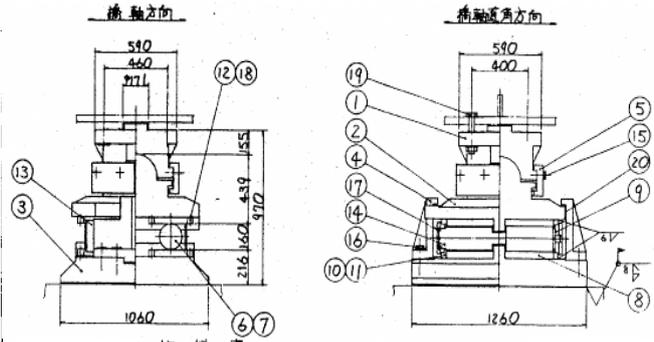
損傷の確認された P5 橋脚、P6 橋脚、A2 橋台のうちローラー軸部の破断および支圧板の破断が確認された P6 橋脚に関する既往の支承図面、支承設計計算内容を図 2.2-1 に示す。

支承図、材料表よりローラーおよび支圧板に使用している材料は高強度材料である C-13B であることが確認できた。

(7) P6 1000^{ton} 可動支承

1. 設計条件

全反力	R	=	990.3	ton
死荷重反力	R _d	=	599.2	ton
活荷重反力	R _(C)	=	391.1	ton
橋軸方向水平力(移動時)	R _{Hf}	=	49.5	ton
橋軸方向水平力(地震時)	R _{H1e}	=	109.9	ton
橋軸直角方向水平力(風時)	R _{H2e}	=	147.0	ton
上揚力(地震時)	V	=	60.0	ton
設計移動量	e ₁	=	300	mm
設計許容量	e ₂	=	320	mm
全移動可能量	e	=	360	mm
設計水平変位	K _H	=	0.18	
設計摩擦係数	f	=	0.05	
下部工との許容支圧応力度	σ _{ba}	=	2100	kg/cm ²
上部工との許容支圧応力度	σ _{sa}	=	2100	kg/cm ²



材料表

部材番号	名称	材質	数量	重量(kg)	備考
1	上蓋	SCM72A	1	517.4	
2	F	SCM72A	1	1066.2	
3	底板	SCM72A	1	1675.5	
4	サイドプレート	SCM72A	2	202.7	
5	ローラー	SCM72A	2	132.8	
6	ローラー(A)	C-13B	1	113.6	
7	ローラー(B)	C-13B	1	120.1	
8	支圧板	C-13B	8	225.5	
9	ボルト	SS41	2	9.5	
10	ラップ	SS41	4	10.3	
11	端片	SS41	4	10.8	
12	サイドプレート	SS41	16	61.5	
13	通籍板	SS41	2	41.5	
14	カバー	SS41	2	18.2	
15	六角ボルト	—	8	2.7	JIS B 1180
16	六角ボルト	—	8	10.8	JIS B 1180
17	六角ボルト	ステンレス	12	0.1	JIS B 202
18	六角穴付ボルト	—	48	4.6	JIS B 1174
19	六角ボルトナット	SS41	4	14.4	JIS B 1180
20	ゴムパース	ゴム	2	—	業経材料
全重量(kg)				4245.2	

図 2.2-1 支承設計荷重および材質 (既往支承計算書および図面抜粋)

支承設計計算書において、ローラーの必要長さを算定しており、1 支承当たりの全反力 (死荷重+活荷重=990.3tf) により決定されている。その他、橋軸直角方向固定とした場合のローラー軸部の照査や支圧板への反力分布などについては、記載がなかったが、「道路橋支承標準設計 (ゴム支承・ころがり支承編)、平成 5 年 4 月、社団法人日本道路協会」(支承標準設計)の内容を参考に別途確認したところ、設計水平力となる風荷重 (147.0tf) に対しては、十分に安全と言える数値となっている (図 2.2-2 参照)。なお、繰り返し荷重に対する設計は行われていない。

[P6 支承ローラー設計：橋軸直角方向水平力による応力度 (風時)]

▽切欠部の引張応力度

$$\sigma_t = R_{H2e} / (\pi / 4 \cdot d_2^2 \cdot N) = 147,000 / (\pi / 4 \times 8^2 \times 2) = 1,463 \text{ kgf/cm}^2$$

$$< \sigma_{ta} = 3,000 \times 1.2 = 3,600 \text{ kgf/cm}^2$$

▽支圧強度

$$\text{偏心率 } E : E = R_{H2e} \cdot h / R_d = 147,000 \times 43.4 / 599,200 = 10.65 \text{ cm}$$

$$< E_0 = L_1 / 6 = 76.2 / 6 = 12.7 \text{ cm}$$

$$q_{\max} = R_d \cdot N \cdot (1 / L_2 + E / (L_1 \cdot E_0)) = 599,200 / 2 \times (1 / 67.4 + 10.65 / (76.2 \times 12.7))$$

$$= 7,743 \text{ kgf/cm} < q_a = K \cdot d_1 / 2 \cdot 1.2^2 = 980 \times 16 / 2 \times 1.2^2 = 11,290 \text{ kgf/cm}$$

K : 許容荷重係数 (図 2.2-3 参照)

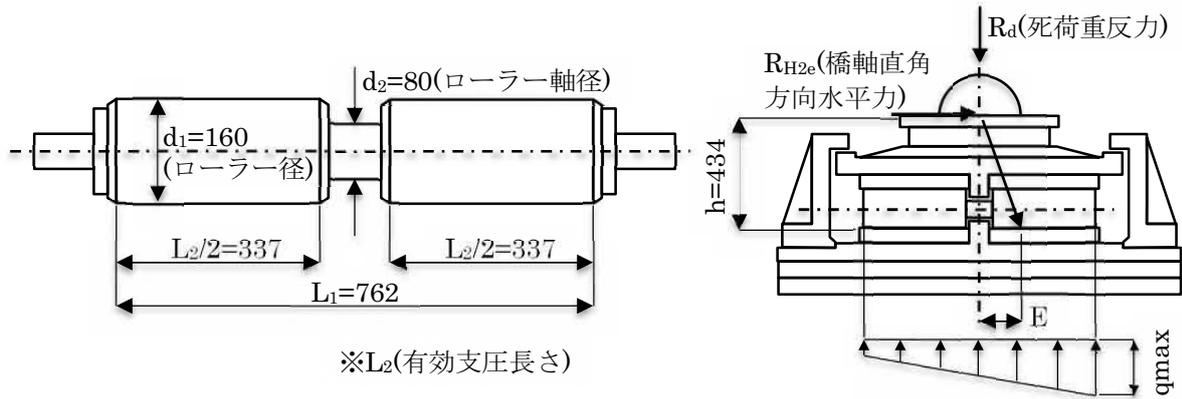


図 2.2-2 橋軸直角方向水平力による照査の概略図

表-3.23 ヘルツの許容支圧応力度と許容荷重係数

	ヘルツの許容 支圧応力度 σ_{H2} (kgf/cm ²)	適用材料	許容荷重係数 (kgf/cm ²)	
			K_1	K_2
鋼と鋼の接触	一般	-	$3.88\sigma_{H2}^2 \times 10^{-12}$	$2.72\sigma_{H2}^2 \times 10^{-6}$
ヤング係数 $E_1 = E_2 = E = 2,100,000$ (kgf/cm ²) ポアソン比 $\nu_1 = \nu_2 = \nu = 0.3$	6,000	SS400, SM400, SF490, SC450, SCW410	0.83 (0.8)	98 (90)
	7,000	SM490, SF540A, SCW480, SCMn1A	1.33 (1.3)	133 (130)
	7,200	S35CN	1.44 (1.4)	141 (140)
	7,800	SCMn2A	1.84 (1.8)	165 (160)
	8,000	S45CN	1.99 (1.9)	174 (170)
	18,000	CWA	22.6 (22)	881 (880)
	19,000	C13B (焼入)	26.64 (26)	981 (980)
	21,500	SNM439 (焼入) SNM447 (焼入)	38.5 (38)	1,257 (1,250)
鋳鉄と鋼の接触	一般	-		$4.31\sigma_{H2}^2 \times 10^{-6}$
ヤング係数 $E_1 = 1,000,000$ (kgf/cm ²) $E_2 = 2,100,000$ (kgf/cm ²) ポアソン比 $\nu_1 = 0.25$ $\nu_2 = 0.3$	6,500	FC250と鋼		182 (150)

(注) 1) ()内の数値は実用推奨値。
 2) K_1 および K_2 の一般式は次のとおりである。

$$K_1 = \frac{\sigma_{H2}^2 \pi^3}{6} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)$$

$$K_2 = \pi \cdot \sigma_{H2}^2 \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)$$
 ↑ 球面 ↑ 円柱面

図 2.2-3 C13B の許容荷重係数 (H3 支承便覧抜粋)

支承の配置 (設置方向) は主桁の接線方向となっている。温度変化等による桁の伸縮の方向と支承の可動方向との間にはずれがあると考えられるが、その影響を考慮した設計は行われていない。曲線橋における支承配置について支承便覧の抜粋を図 2.2-4 および図 2.2-5 に示す。

ii) 固定可動構造

固定可動構造では、温度変化による上部構造の伸縮を極力拘束しないために、可動支承の移動方向を図-2.5.4(a)に示す固定支承の方向に、回転方向を主桁の接線方向とするのがよい。この場合、桁の移動方向と回転方向が異なるため、全方向に回転可能な支承形式を移動方向に配置するのがよい。しかし、このように配置すると、端点の支承の移動方向が主桁の接線方向と一致しなくなるため、隣接する上部構造の変位方向と食い違いが生じ、伸縮装置の設置が難しくなることが懸念される。これを避けるため、比較的大きな曲率を有する曲線橋の固定可動構造では、図-2.5.4(b)に示すように橋軸方向に可動支持となるよう支承を配置し、温度変化による上部構造の伸縮に伴い発生する横方向の水平力に対して固定支持とし支承部を設計することも考えられる。この場合には、その拘束力が上下部構造に与える影響を十分考慮するとともに、支承部の耐荷性能を確保したうえで、横方向の水平力を受ける面にすべり材を用いるなどにより軸方向に移動しやすくするなど配慮する必要がある。

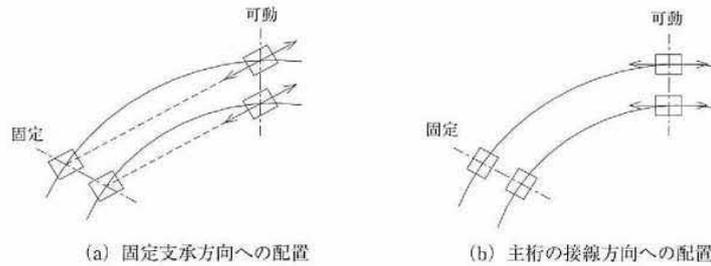


図-2.5.4 曲線橋の支承配置

図 2.2-4 曲線橋の支承配置 (H29 支承便覧抜粋)

(1) 曲線橋, 斜橋

曲線橋や横方向の剛性の大きい斜橋の場合、可動支承における移動方向と回転方向とは、図2-3-1に示すように一致せず、複雑である。このような場合には、両者を満足できればよいが、どちらか一方しか満足しえない場合には、拘束により、けたや支承に損傷が生じないように注意する必要がある。

また、このような橋においては、正確に支点反力を求めることが困難なことが多いが、その場合にはいくつかの計算法により、反力の値を比較し、安全な反力をとる必要がある。

図 2-3-1 曲線橋, 斜橋の伸縮方向, 回転方向

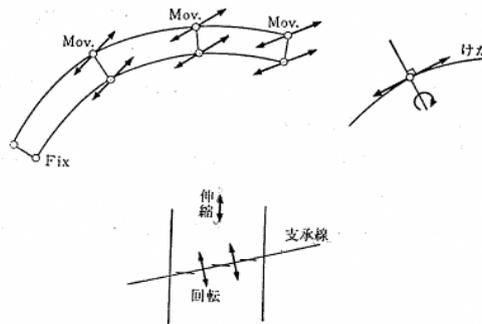


図 2.2-5 曲線橋の支承配置 (S48 支承便覧抜粋)

2) 上部構造設計

対象橋梁は、P3 橋脚 1 点固定の曲線橋である。また、支承の設置方向は主桁の接線方向であり、下部構造位置毎に桁が伸縮できる方向が異なっている。一方で、桁の各部が必ず主桁の接線方向に伸び縮みしようとしたり、移動しようとしたりするかどうかは定かでなく、複雑な挙動をするなかで各支点位置での伸縮または移動が拘束されることも懸念される。そこで、このような対象橋梁の特徴に着目して、上部構造の設計計算書の確認を行った（図 2.2-6 参照）。

上部構造の設計は、平面線形を考慮した構造解析を行っているが、鉛直方向力により発生する反力や断面力を確認しているものであった。曲線や支承の設置方向が影響すると思われる水平力については、上部構造のみならず支承および下部構造に対して発生反力や断面力が照査された内容は確認できなかった。また、主桁の応力度照査では鋼床版における温度差 15℃を考慮した温度差応力度との重ね合わせについて実施されているが、下部構造設計時の不静定力には見込まれていなかった。

別な特徴として、本橋では制振装置が設置されている。設計時に実施された風洞実験で実橋換算風速 15~20m/s で渦励振が観測されたため、この結果に基づき鉛直曲げ 1 次~3 次の渦励振に対し、建設当初から設置されたものである。設置箇所は図 2.2-7 に示すとおり、P4-P5 径間（支間長 150m）の 1 次モード用、P1-P2 径間（支間長 150m）の 2 次モード用、P5-P6 径間（支間長 140m）の 3 次モード用の 3 か所である。

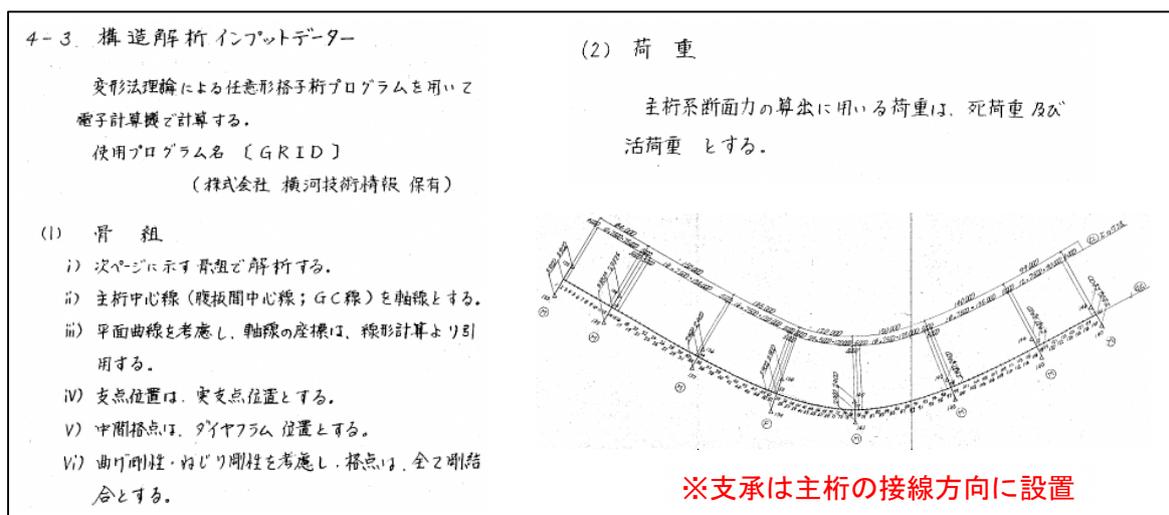


図 2.2-6 上部構造設計概要（設計計算書の抜粋）

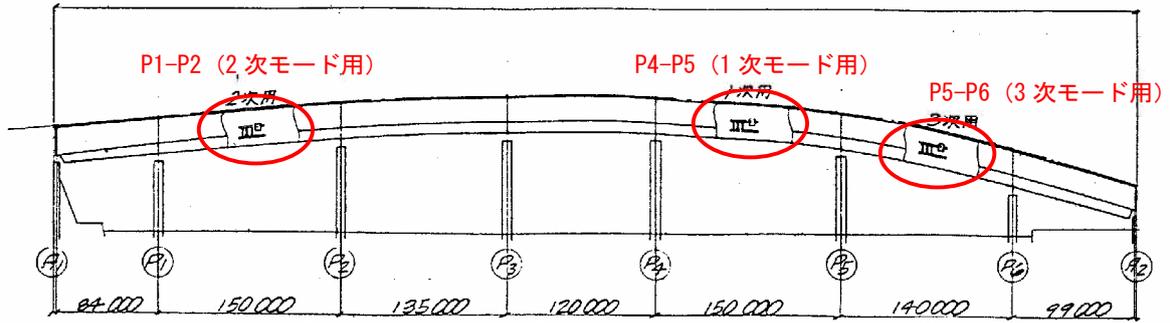


図 2.2-7 制振装置設置箇所

3) 下部構造設計

P6 橋脚の設計計算書では、死荷重反力は上部構造設計で算出した値、風荷重は上部構造の部分模型による風洞実験から得られた抗力係数で得られる風荷重反力を用いて設計を行っていた。地震時の上部構造反力は、橋軸方向は死荷重反力に可動支承の摩擦係数 $\mu=0.05$ を乗じた値、橋軸直角方向は死荷重反力に設計水平震度 $K_h=0.18$ を乗じた値を用いて算出されていた。

なお、支承の設置方向と桁の伸縮方向との不一致に起因する、温度変化や桁の温度差の影響による不静定力は、下部構造の設計では考慮されていなかった。

4) その他

本橋は落橋防止構造や転倒防止構造は設置されていない。また、後述する維持管理履歴からも分かるとおり、供用後においても落橋防止構造の追加設置はされておらず、橋脚柱や基礎構造も建設時からの補強などはされていない。

(2) 施工出来形

1) 上部構造出来形の確認

施工時における出来形検査報告書を用いて、支間長に着目して、上部構造出来形を確認した。その結果、すべての支間で出来形の許容値を満足していた。出来形検査報告書から、A1-P3 径間の仮組立と竣工検査における検査記録を抜粋し、図 2.2-8 に示す。

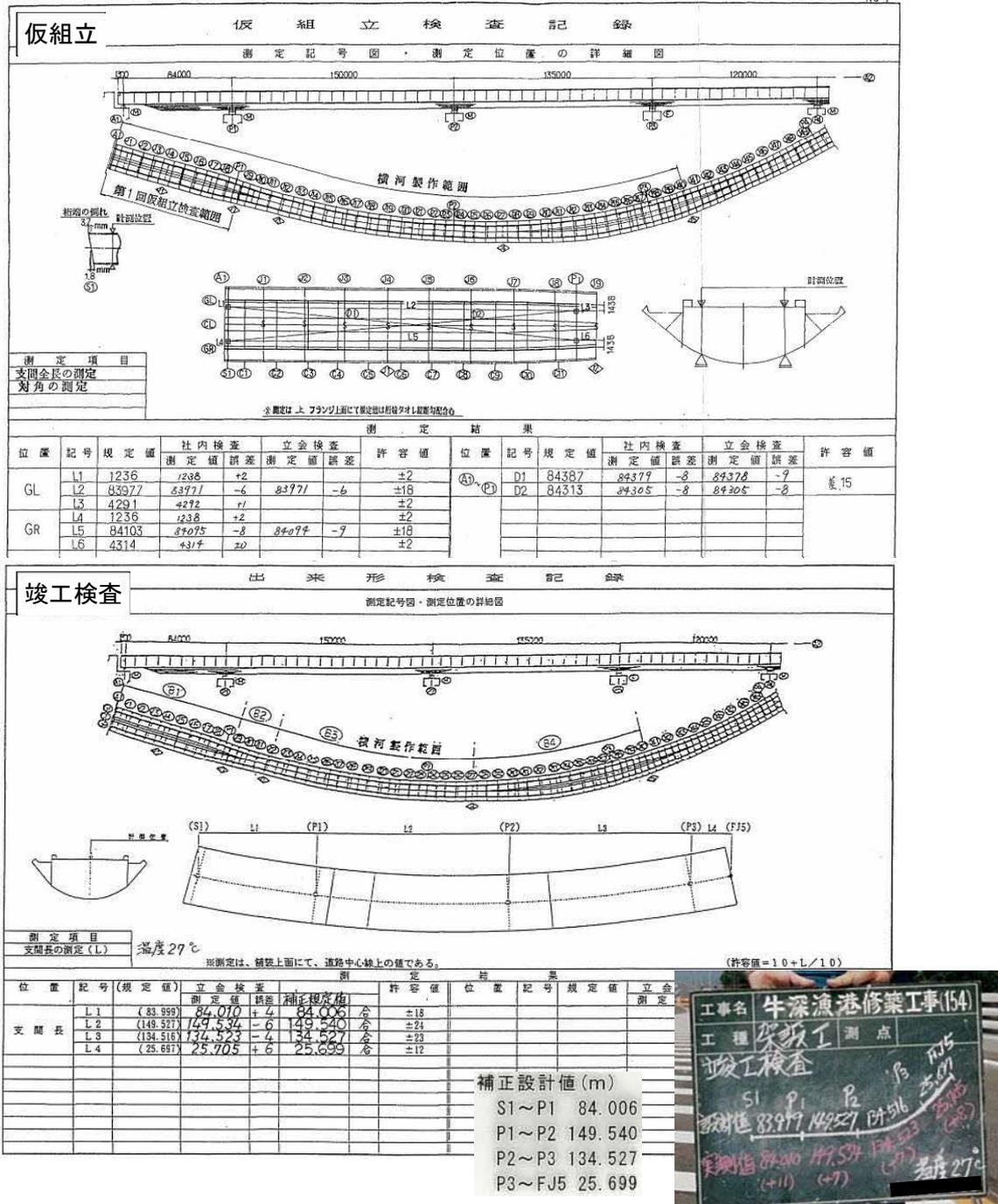


図 2.2-8 出来形検査記録 (A1-P3 径間)

2) 支承の材質 (支承検査報告書)

支承検査報告書から、支承のローラーおよび支圧板の材質を確認した。図 2.2-9 に示すとおり、受け入れ時に抽出検査がなされており、同一溶解毎に 1 個の抜取りを実施している。また、ローラーおよび支圧板の伸び、硬度、表面と内部の硬さも「道路橋支承便覧 (昭和 48 年 4 月、日本道路協会)」に示される、建設当時の標準的な要求値の範囲内であった。

30 x 160 FA 925SD45 ST,AG,SB

材 質	成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	N	超音波検査: GOOD
	規格	MAX 30 300 ~ 500	50 ~ 150	MAX 40	MAX 30 80 ~ 120	500 ~ 700	1000 ~ 1200	30 ~ 100	30 ~ 100	MAX 8	%	
機 械 的 性 質	成分	引張強さ	降伏点	伸び	絞り	硬さ	熱処理					
	規格	JIS4	MIN 55	MIN 75	MIN 12	MIN 217	ST: 930°C-WQ AG: 630°C-AC					

外観検査: GOOD
寸法検査: GOOD
硬さ検査: GOOD

R=350T (M)
支圧板

ST: 950°C-WQ
AG: 450°C-AC
HRC 50

工番	品番	数量
32XC227	A8404	

上記の成績は要求事項を満足していることを証明します。

93年 02月 08日

No. 5-5756

硬度および磁粉探傷検査成績書

品名: R=350 T 可動查
材質: ローラー(C-13B₂), 支圧板(C-13B₂)
個数: 2

1. 表面の硬さ 測定器: ショア-硬度計

ショア-硬さ測定値の許容変動値は10%とする
硬さは同一溶解ごとに1個の抜取りとする

ローラー

支圧板

ローラー			支圧板		
測定箇所	A ~ C	判定	測定箇所	A ~ C	判定
種類	Hv 505 ~ 640		種類	Hv 505 ~ 640	
No.	Hs 66 ~ 77		No.	Hs 66 ~ 77	
7461	Hs 75.76.75.	合格	A8404	Hs 68.67.68	合格
	Hs			Hs	

2. 断面硬さ 測定器: ビッカース硬度計

r: ローラーの半径 (mm)

測定箇所	A	B	C	判定	
表面よりの距離	0	0.035r	0.110r		
種類	Hv 505 ~ 640	≥ 230			
No.	A7461	Hv 620	Hv 620	Hv 480	合格
		Hv	Hv		
	A8404	Hv 630	Hv 590	Hv 470	合格
		Hv	Hv		

3. 浸透探傷検査

品名	個数	検査結果	判定
ローラー	4	欠陥を認めず	合格
支圧板	16	4	合格

Hv: ビッカース硬さ
Hs: ショア-硬さ

図 2.2-9 A2 (350tf) の支圧板の支承検査報告書

(3) 維持管理履歴

1) 過去に実施された補修・補強・点検等

これまでに実施された補修や点検等の維持管理履歴を表 2.2-2 に整理する。牛深ハイヤ大橋では、供用後に補修工事が 3 回（制振装置、舗装、桁内塗装）、定期点検が 2 回実施されている。制振装置の補修工事は、1999 年の台風（15～20m/s）後に 1 次モード用の TMD のスプリングガイドの損傷が確認されたため実施されたものである。また、記録の範囲では、支承部に対する補修は過去に実施されていない。

表 2.2-2 維持管理履歴

時期	内容	備考
1997 年 (H9) 3 月	本線部供用開始	-
1999 年 (H11) 3 月	ループ部供用開始	-
2000 年 (H12) 3 月	制振装置補修工事	1999 年 (H11) の台風後に確認された破損したスプリングガイドの交換
2009 年 (H21) 9 月	定期点検実施	機能保全計画策定のために点検実施（支承目視点検 ^{※1} を含む）
2014 年 (H26) 3 月	耐震性能確認	現況での耐震性能を確認
2015 年 (H27) 3 月	機能保全計画変更	水産物供給基盤機能保全事業基本計画承認（初回）
2015 年 (H27) 5 月	定期点検実施	支承目視点検 ^{※1} を含む点検を実施
2016 年 (H28) 11 月 ～2019 年 (R1) 9 月	補修工事	舗装補修（橋梁の全区間で舗装打ち替え）
2021 年 (R3) 3 月	補修工事	桁内塗装塗替

※1：支承目視点検はカバープレートを外さずに実施

2) 過去に実施された定期点検

本橋では、2009年（H21）9月および2015年（H27）5月に定期点検が実施されている。以下に過去の定期点検結果の概要を示す。

- ・過年度点検ではカバープレートを外しての内部の確認は実施されていないものの、ローラーの脱落、支承高さの異常などは見られていない。
- ・支承本体やボルトの防食機能の劣化や一部腐食が記録されている。
- ・P5橋脚の左側支承、P6橋脚の右側支承において、ローラー部のカバープレート取付けボルトの脱落が記録されている。ステンレスボルトと炭素鋼のカバープレートの組み合わせであるが、カバープレート側の腐食は進んでいなかったため、異種金属接触腐食が原因の脱落は考えにくい。
- ・P6橋脚では異音の記載がなかった。

また、平成28年（2016年）の熊本地震の直後に実施した緊急点検が実施されているが、支承部の異常については特段の記録はなかった。

今回応急対策を実施されたP5橋脚の左側支承、P6橋脚の右側支承、A2橋台の右側支承の平成21年および平成27年の定期点検時の写真および状態を、**図 2.2-10**、**図 2.2-11** および**図 2.2-12** に示す。**2.1.2(3)**に記載のとおり、今回の損傷を受けた調査においてカバープレートの異常とローラーや支圧板の異常に相関が見られた。H27定期点検にてカバープレート取付けボルトが脱落していたり、カバープレートに膨らみが見られていることから、平成27年時点で、支圧板やローラーに異常があった可能性がある。

下部工		H21点検	H27点検	
P5橋脚	右側支承	損傷写真無し		<p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(27)</p> <p>No. 8</p> <p>支承 1 腐食-E, D</p>
				<p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(27)</p> <p>No. 9</p> <p>No. 8の近景</p>
	左側支承	<p>変状(腐食・防食機能の劣化) 写真No. 8</p>  <p>支承: 腐食・防食機能の劣化</p> 	 <p>支承の腐食</p>	<p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(27)</p> <p>No. 1</p> <p>支承 1 腐食-E, D</p>
			 <p>カバープレート取付け ボルトの脱落</p>	<p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(27)</p> <p>No. 2</p> <p>支承(ボルト) 3 ゆるみ・脱落-C</p>

図 2.2-10 P5 橋脚の過去の定期点検写真

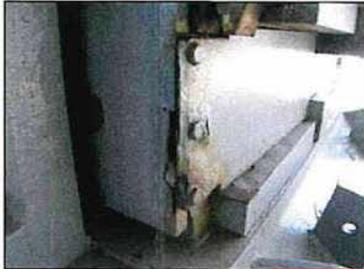
下部工		H21点検	H27点検
右側 支 承	支承: 腐食・防食機能の劣化		 <p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(28)</p> <p>No. 8</p> <p>支承 1 腐食-B</p>
	カバプレート取付け ボルトの脱落		 <p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(28)</p> <p>No. 6</p> <p>支承(ボルト) 3 ゆるみ・脱落-C</p>
左側 支 承	支承: 腐食・防食機能の劣化		 <p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(28)</p> <p>No. 1</p> <p>支承 1 腐食-B</p>
	支承: 腐食・防食機能の劣化		 <p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(28)</p> <p>No. 3</p> <p>支承(ボルト) 1 腐食-E 6本</p>

図 2.2-11 P6 橋脚の過去の定期点検写真

下部工		H21点検	H27点検
A 2 橋 脚	右側 支 承	<p>支承：腐食・防食機能の劣化</p>  <p>支承・沓座モルタル：腐食・防食機能の劣化・剥離</p> 	 <p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(29)</p> <p>No. 9</p> <p>支承 1 腐食-D 沓座モルタル 12 うき-E A=1.7m×0.1m 2ヶ所 A=0.1m×1.5m 2ヶ所</p>
	左側 支 承	<p>支承：腐食・防食機能の劣化</p>  <p>支承・沓座モルタル：腐食・防食機能の劣化・剥離</p> 	 <p>牛深ハイヤ大橋【本線部】 損傷写真(29)</p> <p>No. 4</p> <p>支承 1 腐食-D 沓座モルタル 12 うき-E A=1.7m×0.1m 2ヶ所 A=0.1m×1.5m 2ヶ所</p>

図 2.2-12 A2 橋台の過去の定期点検写真

3) 外力の履歴

本橋の供用開始後から現在に至るまで（1997.1～2021.12）の牛深観測所における『最大風速』を図 2.2-13 の上段に示す。供用開始後の最大値は 1999 年（平成 11 年台風 18 号）に計測された 27.7m/s であり、設計基準風速（40m/s）を超過するような暴風は観測されていない。また、1999 年の台風後に確認されたスプリングガイド損傷以来、風による振動が問題となったという記録はない。

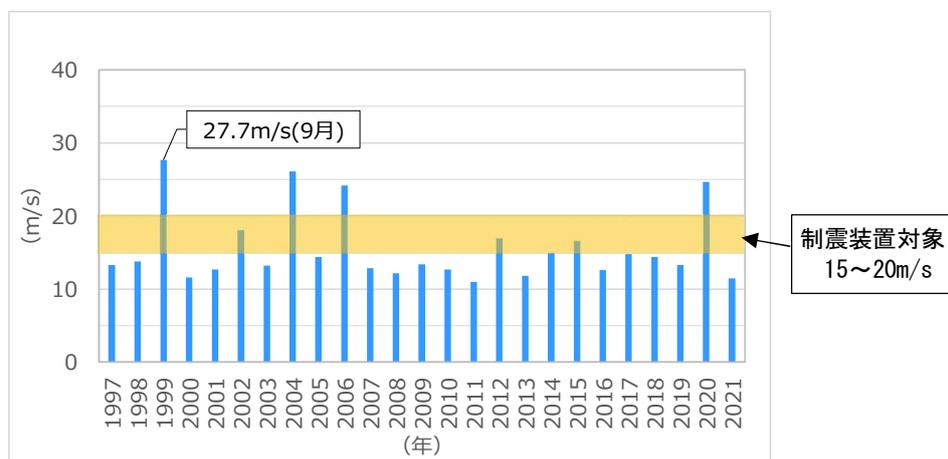


図 2.2-13 ハイヤ大橋供用開始以降の観測最大風速（観測地点：牛深）【気象庁 HP より】

本橋付近の供用開始後から現在に至るまで（1997.1～2021.12）の震度 3 以上を観測した地震記録を表 2.2-3 に示す。熊本地震時（2016 年）には牛深町では震度 4 が観測された。熊本地震時と同じ震度は 1997 年、2006 年、2012 年に観測されている。牛深町では震度 5 以上の震度は観測されていない。

表 2.2-3 ハイヤ大橋供用開始以降の牛深町内で観測された震度（震度 3 以上）【気象庁 HP】

地震の発生日	震央地名	マグニチュード	最大震度	牛深町での震度
2019/12/26	天草灘	M3.8	震度 3	震度 3
2019/09/28	天草灘	M4.0	震度 3	震度 3
2016/04/19	熊本県熊本地方	M5.5	震度 5 強	震度 3
2016/04/16	熊本県熊本地方	M5.9	震度 6 弱	震度 3
2016/04/16	熊本県熊本地方	M7.3	震度 7	震度 4
2016/04/15	熊本県熊本地方	M6.4	震度 6 強	震度 3
2016/04/14	熊本県熊本地方	M6.5	震度 7	震度 3
2015/11/14	薩摩半島西方沖	M7.1	震度 4	震度 3
2012/08/17	天草灘	M4.9	震度 4	震度 4
2006/02/04	天草灘	M5.1	震度 4	震度 4
2003/04/12	鹿児島県薩摩地方	M4.9	震度 4	震度 3
1997/05/13	鹿児島県薩摩地方	M6.4	震度 6 弱	震度 3
1997/04/03	鹿児島県薩摩地方	M5.7	震度 5 強	震度 3
1997/03/26	鹿児島県薩摩地方	M6.6	震度 5 強	震度 4

※震度は気象庁震度階級を示す。

本橋の交通量は平成16年に調査されており、図2.2-14のとおり大型車交通量は511台/日であった。



図 2.2-14 H16 交通量調査結果

牛深観測所における『平均気温』『日最高気温の平均値』『日最低気温の平均値』を図 2.2-15 の下段に示す。最高気温 39.6℃、最低気温-2.3℃であり、道路橋示方書の支承の移動量算定に用いる温度変化の範囲内（-10～+50℃）である。日最低気温の月平均値の最小値と日最高気温の月平均値の最大値の差は、年間を通して 26.9℃である。月毎平均気温に大きな差はなく、6.1～7.9℃の範囲にある。

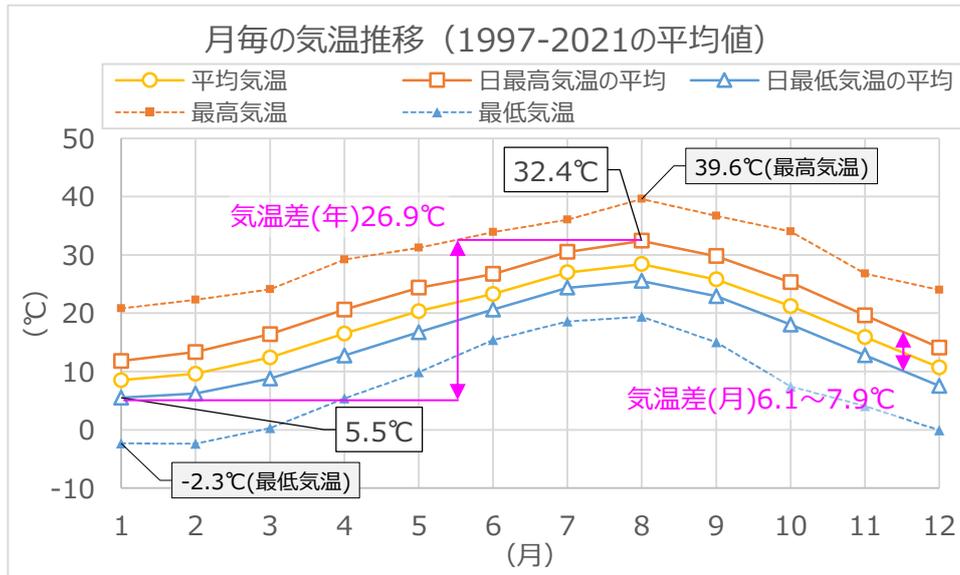


図 2.2-15 ハイヤ大橋供用開始以降の気温推移（観測地点：牛深）【気象庁 HP より】

2.2.3 考察

過去の定期点検結果からはローラーの破断や支圧板の破断といった損傷は確認できなかった。一方で、過去の定期点検ではカバープレート取付けボルト脱落が確認されており、カバープレートが外側に膨らんでいるような写真も残っていた。2.2.3で示すように、今回、支承の損傷を調査した結果によればカバープレートの異常と支圧板やローラーの異常の間には相関関係が認められることからすれば、2015年（H27）の定期点検時にはすでにローラーまたは支圧板が損傷していた可能性も考えられる。

本橋の大型車交通量からは、活荷重が損傷の主たる原因である可能性は小さいと考えられる。また、牛深町の地震や風の履歴からは、突発的に設計荷重を超える外力が作用した可能性は小さいと考えられる。温度の変化の範囲も、設計で想定する範囲内であったと考えられる。

2.3 支承部材の材料および品質調査

2.3.1 目的

損傷が確認された支圧板およびローラーを対象に、目視で損傷が確認されていない部分から切り出した試験片を用いて、成分分析、硬さや強度の試験、残留応力の計測、断面観察、超音波探傷試験を実施する。試験片は破面近傍より取り出した。

- ・材料同定のために、化学成分分析（スパーク発光分光分析法による）を行い、表 2.3-1 に示す「道路橋支承便覧 表-3.3.12（平成 30 年 12 月、日本道路協会）」と比較する。
- ・支承材料の機械的性質を確認するために、硬さ計測（ビッカース硬さ計による）、引張強度試験を行い、表 2.3-2 および表 2.3-3 に示す「道路橋支承便覧 表-3.3.7 および表-3.3.13（平成 30 年 12 月、日本道路協会）」と比較する。
- ・X線回析法による残留応力分析を行う。
- ・欠陥の把握のために断面観察および超音波探傷試験を行う。

表 2.3-1 化学成分（道路橋支承便覧 表-3.3.12、平成 30 年 12 月、日本道路協会）

記号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
C-13B ₁ （マルテンサイト系）	0.15～ 0.30	～1.00	～1.00	～0.040	～0.030	11.0～ 15.0	注2)	注3)
C-13B ₂ （析出硬化系）	～0.08	3.00～ 5.00	～2.00			10.0～ 13.0	2.00～ 7.00	～1.00

注：1) 必要に応じて表に示す成分以外の合金元素を添加することができる。

2) Ni は 1.50%以下を添加することができる。

3) Mo は 2.00%以下を添加することができる。

▽硬さ測定：道路橋支承便覧 表-3.3.7 より下表のとおり

表 2.3-2 硬さ（道路橋支承便覧 表-3.3.7、平成 30 年 12 月、日本道路協会）

記号	必要硬さ（ブリネル硬さ）	
	表面	内部
C-13B ₁ （マルテンサイト系）	≥HB475	≥HB217
C-13B ₂ （析出硬化系）		

▽引張試験：道路橋支承便覧 表-3.3.13 より下表のとおり

表 2.3-3 機械的性質（道路橋支承便覧 表-3.3.13、平成 30 年 12 月、日本道路協会）

記号	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
C-13B ₁ （マルテンサイト系）	≥540	≥740	≥12
C-13B ₂ （析出硬化系）			

▽残留応力分析：規格値なし

2.3.2 結果

(1) 損傷支承部材の成分分析

表 2.3-4 に化学成分分析結果を示す。ローラー、支圧板ともに成分から道路橋支承便覧（平成 30 年 12 月、日本道路協会）に示される C-13B₂（析出硬化型ステンレス鋼）と判断でき、その規格を満足している。

表 2.3-4 化学成分分析結果（単位：％）

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
P5	ローラー	0.030	3.38	0.93	0.020	0.007	10.28	6.20	0.39
	支圧板	0.030	3.29	0.81	0.019	0.011	10.48	6.16	0.37
P6	ローラー	0.020	3.48	0.92	0.020	0.006	10.62	6.22	0.41
	支圧板	0.029	3.30	0.82	0.019	0.016	10.45	6.16	0.37
A2	ローラー	0.021	3.42	0.92	0.020	0.008	10.64	6.43	0.40
	支圧板	0.019	3.52	0.53	0.018	0.013	10.48	6.66	0.39
規格値		≤0.080	3.00~5.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00~13.00	2.00~7.00	≤1.00

※規格値は表 2.3-1 に示す支承便覧に記載の C-13B₂ の値を示す。

(2) 損傷支承部材の強度分析

1) 硬さ計測

硬さ計測の調査箇所を図 2.3-1 に示し、計測結果を表 2.3-5 に示す。ローラーでは、表層および内部の硬さは道路橋支承便覧で示されている下限値を上回っていた。硬さの断面方向の分布をみると、表面は内部よりも硬く、焼き入れに伴う硬化層が形成されていた。支圧板は受入検査では要求値の範囲内であったが、損傷した支圧板で分析を行った結果、表層の硬さの要求値を一部下回った。ただし、表層および内部の硬さとともに内部の硬さの要求値以上であった。道路橋支承便覧（昭和 48 年、日本道路協会）では、支圧強度を高めるためにローラーや支圧板の表面に焼き入れし、鋼材の内部に比べて表層を硬くすることとなっている。以上のことより、「2.5 破断面の観察調査」の断面マクロ観察や超音波探傷試験により内部欠陥の把握をするときに、内部欠陥の有無やその影響を注意して観察する必要がある。

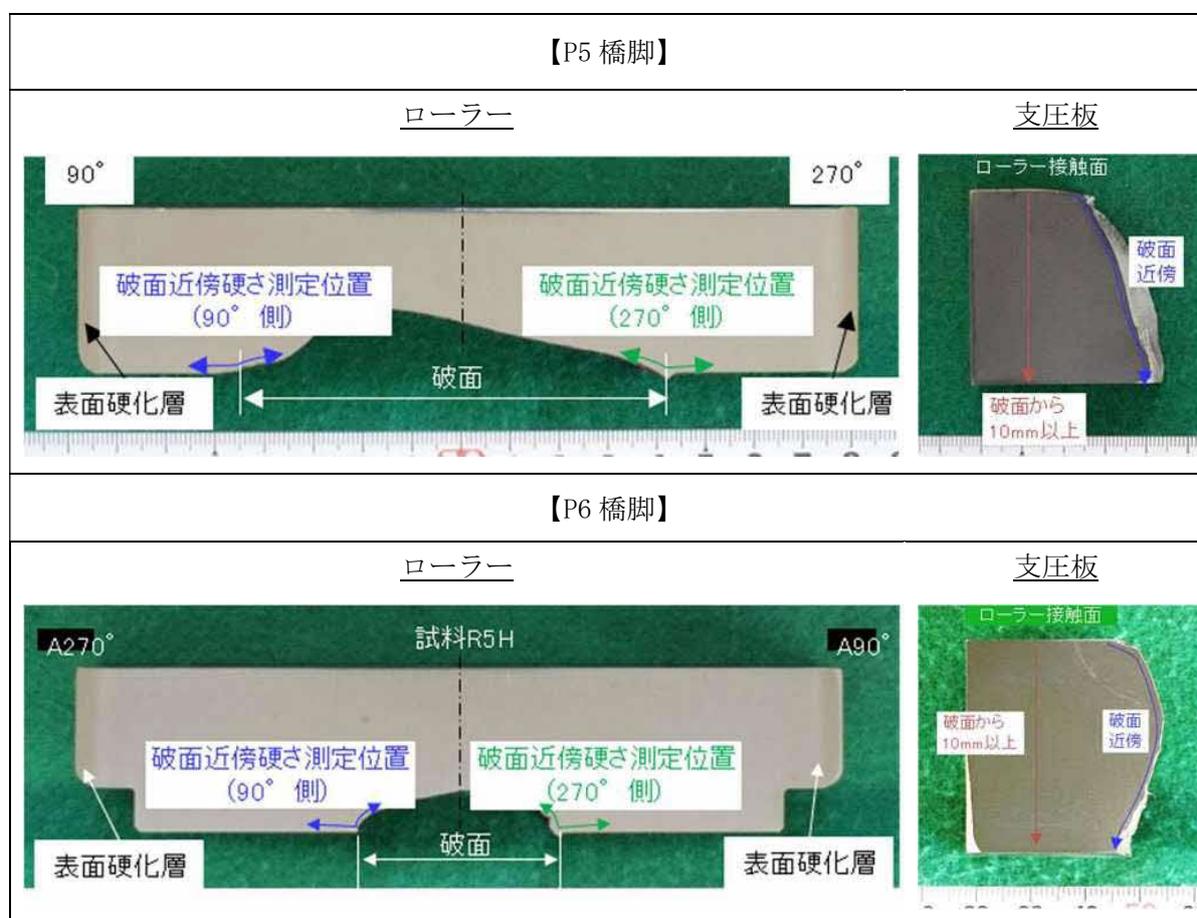
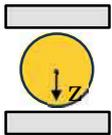
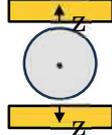
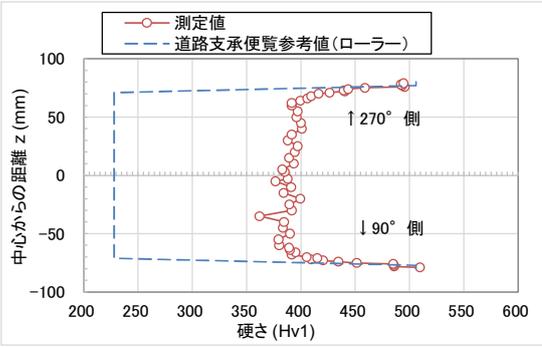
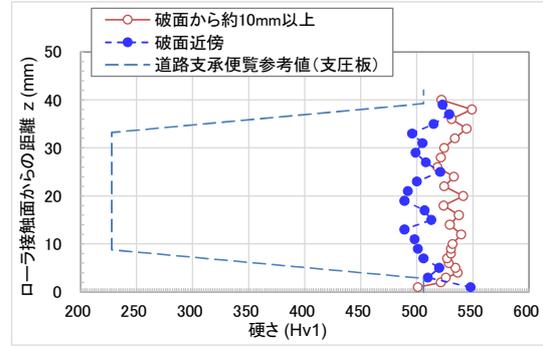
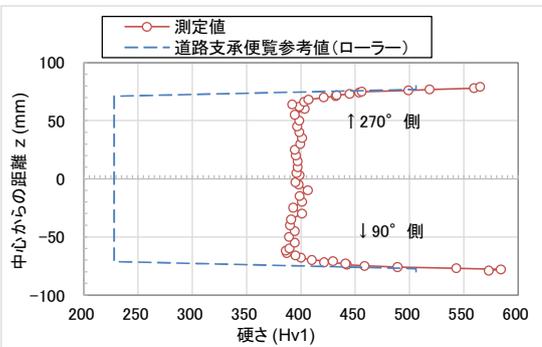
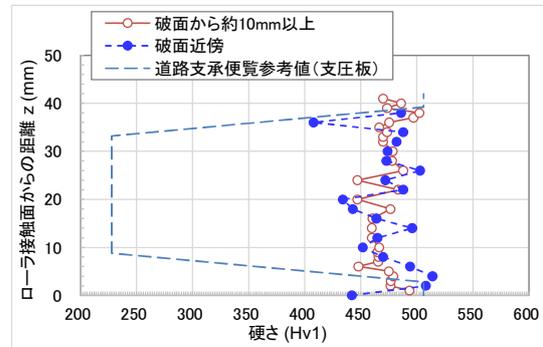
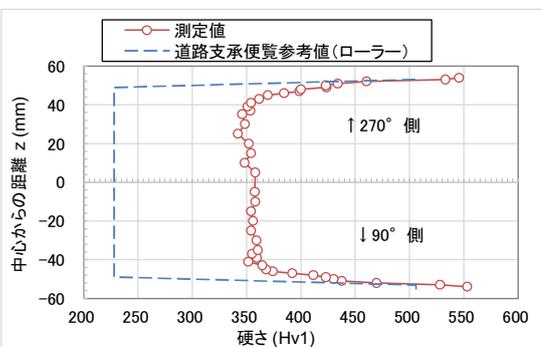
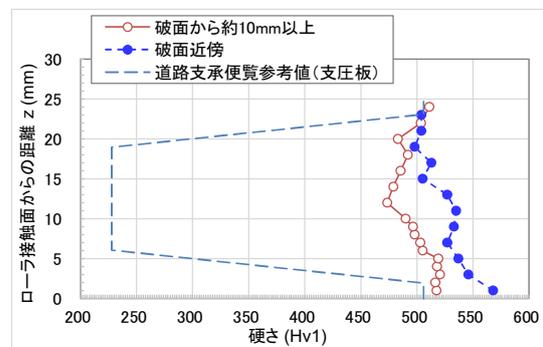


図 2.3-1 硬さ計測の調査箇所

表 2.3-5 硬さ測定結果

	ローラー 	支圧板 
P5 橋脚		
P6 橋脚		
A2 橋台		

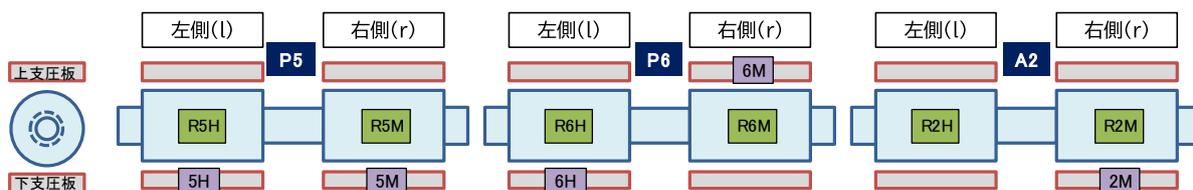
2) 引張試験

引張試験結果を表 2.3-6 に示す。規格値に対して、支圧板の 9 試験体/全 17 試験体（追加分：4 試験体/全 6 試験体）で伸びが規格値を下回ったが、ローラーも支圧板も他の試験片ではすべて項目で規格値以上の値であった。

表 2.3-6 引張試験結果

		0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
P 5 ローラー	R5-L1	1,022	1,186	12	14
	R5-L2	1,049	1,208	17	32
	R5-L3	1,154	1,311	18	43
	平均	1,075	1,235	16	30
P 6 ローラー	R6-L1	1,128	1,273	18	50
	R6-L2	1,040	1,223	22	45
	R6-L3	1,023	1,207	18	36
	平均	1,064	1,234	19	44
A 2 ローラー	R2-L1	887	1,176	25	54
	R2-L2	721	1,132	25	53
	R2-L3	723	1,135	24	50
	平均	777	1,148	25	52
P 5 支圧板	5H-L1	1,523	1,696	9	34
	5H-L2	1,519	1,700	11	36
	5H-L3	1,505	1,889	12	34
	5M-L1	1,520	1,686	11	30
	5M-L2	1,515	1,684	11	38
	5M-L3	1,530	1,710	7	7
	平均	1,519	1,728	10	30
P 6 支圧板	6H-L1	1,241	1,470	14	43
	6H-L2	1,245	1,474	5	8
	6H-L2-1	1,271	1,505	6	6
	6H-L2-2	1,261	1,493	6	7
	6H-L3	1,234	1,474	12	39
	6M-L1	1,274	1,499	11	40
	6M-L2	1,274	1,501	14	42
	6M-L3	1,286	1,513	15	47
	平均	1,261	1,491	10	29
A 2 支圧板	2M-L1	1,344	1,559	13	38
	2M-L2	1,336	1,564	16	42
	2M-L3	1,353	1,567	12	39
	平均	1,344	1,563	14	40
規格値	540 以上	740 以上	12 以上	-	

※規格値は表 2.3-3 に示す支承便覧に記載の C-13B₂ の値を示す。



(3) 残留応力分析

X線回折法により得られた材料表面の残留応力測定結果を表 2.3-7 に示す。ローラーや支圧板は表面に焼き入れを行うことで表面の組織にマルテンサイト膨張が生じ、圧縮応力が残留するが、測定結果では、ローラーは圧縮の残留応力が確認された一方で、支圧板は P5（橋軸直角方向）と P6（橋軸方向）に引張の残留応力が確認された。ローラー材では x 方向（橋軸直角方向）に $-671 \sim -749\text{N/mm}^2$ 、y 方向（橋軸方向）に $-438 \sim -883\text{N/mm}^2$ の、いずれも強い圧縮応力が認められた。支圧板では x 方向（橋軸直角方向）に $+79 \sim -761\text{N/mm}^2$ 、y 方向（橋軸方向）に $+18 \sim -631\text{N/mm}^2$ の引張～圧縮応力が認められた。

表 2.3-7 残留応力測定結果

測定位置		項目	応力測定値 (N/mm^2)	標準偏差 (N/mm^2)
P6 橋脚	ローラ R6	橋軸直角方向	-749	19
		橋軸方向	-438	12
	支圧板 6M	橋軸直角方向	-244	40
		橋軸方向	18	21
P5 橋脚	ローラ R5	橋軸直角方向	-708	41
		橋軸方向	-534	16
	支圧板 5M	橋軸直角方向	79	27
		橋軸方向	-385	11
A2 橋台	ローラ R2	橋軸直角方向	-671	8
		橋軸方向	-883	9
	支圧板 2M	橋軸直角方向	-761	25
		橋軸方向	-631	27

※圧縮の残留応力は負、引張の残留応力は正を示す。

(4) 断面観察

ローラーおよび支圧板の断面マクロ試験結果を図 2.3-2、図 2.3-3 ならびに図 2.3-4 に示す。ローラー、支圧板のいずれの断面にも割れなどの異常は認められなかった。

ローラーの円筒面に深さ 3~4mm 程度の、表面硬化層と推察されるエッチングコントラストの異なる領域が認められた。支圧板は表面硬化層が認められなかった。これらは硬度の計測結果に符合する。

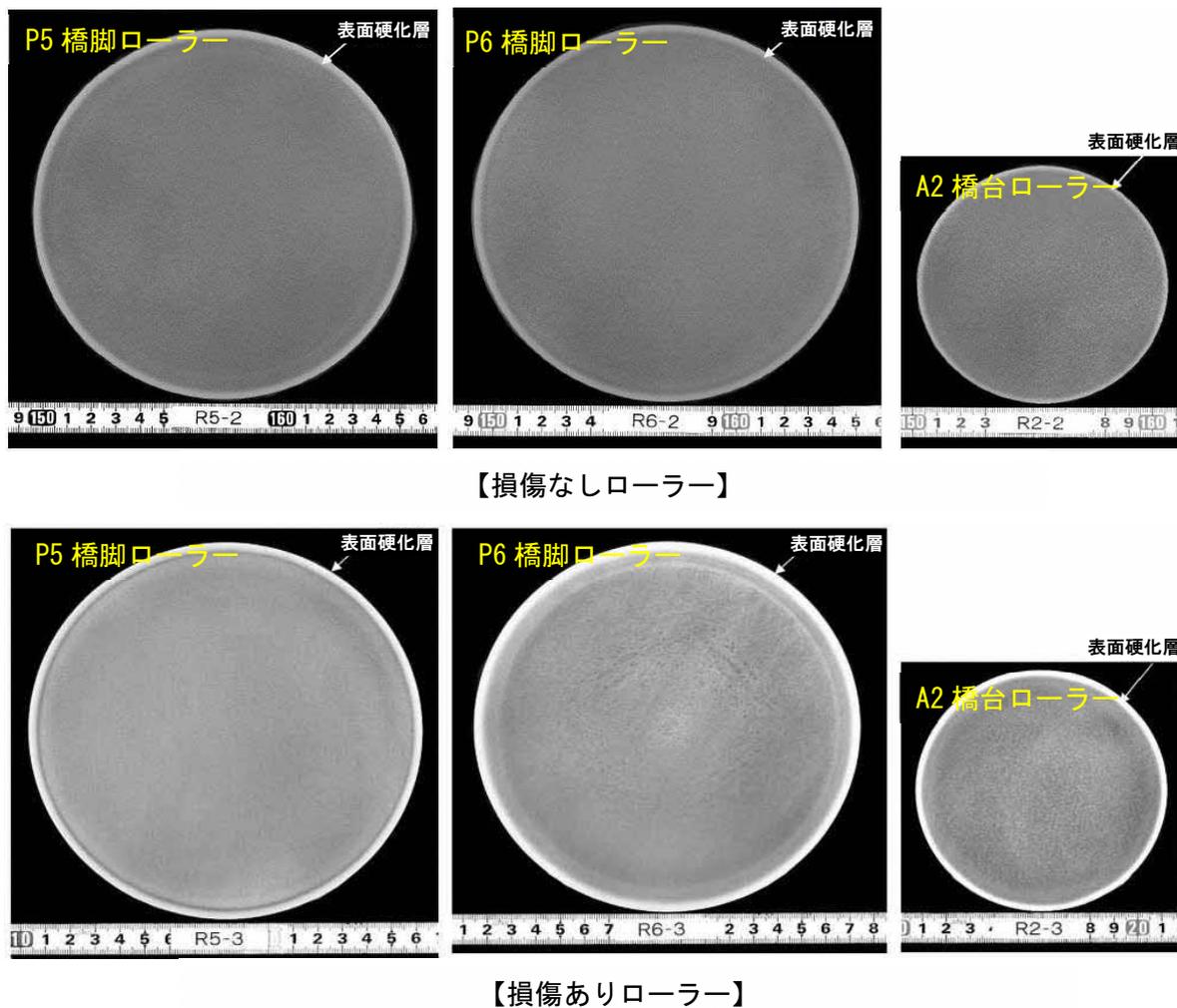


図 2.3-2 ローラーの断面マクロ試験結果

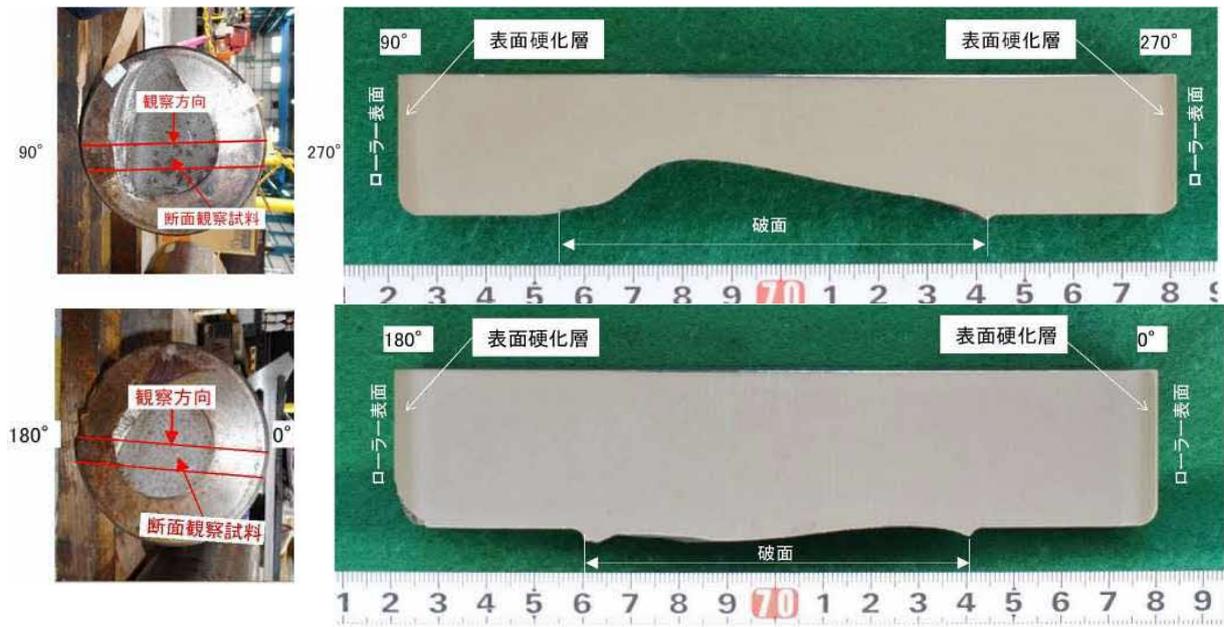


図 2.3-3 P6 橋脚破損ローラー軸部の断面マクロ組織

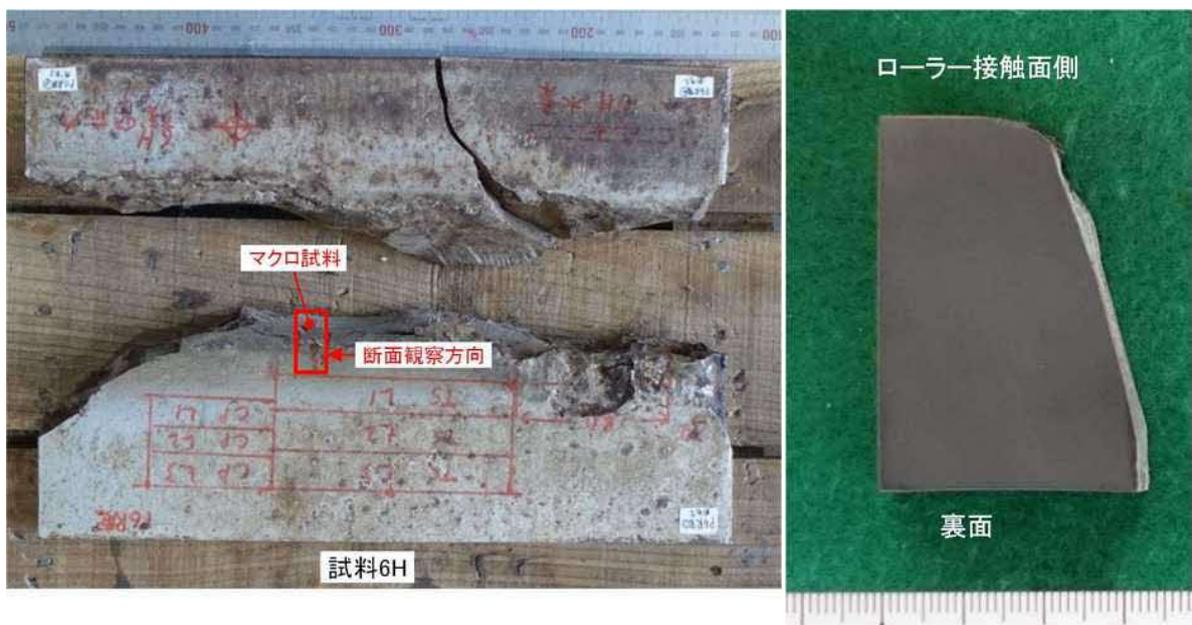


図 2.3-4 P6 橋脚破損支圧板 6H の断面マクロ組織

(5) 超音波探傷試験

探傷は支承部材の全面にわたって行った。支圧板は平面と深さ方向の全面に対して超音波を入射し、ローラーについては、ローラーを円周方向に回転させながら、全周で断面中心方向に超音波を入射した。また、ローラー端部から長手方向にも超音波を入射した。支圧板は水平方向と鉛直方向を探傷方向とした。図 2.3-5 および図 2.3-6 に調査箇所と実施状況を示す。

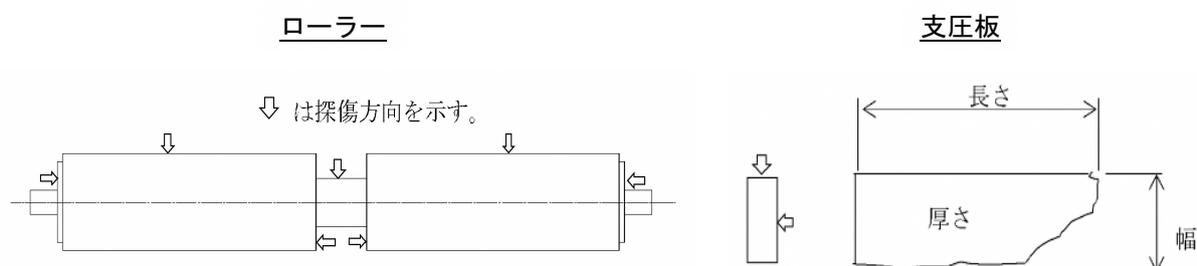


図 2.3-5 ローラーおよび支圧板の超音波探傷試験調査箇所



図 2.3-6 超音波探傷試験実施状況

代表として、P5 橋脚支承のローラーと支圧板の超音波探傷試験の結果を図 2.3-7 に示す。底面反射以外の底面より浅い位置での反射エコーは確認されておらず、内部に傷と思われる反射エコーは検出されなかった。その他ローラーも同じ結果であった。

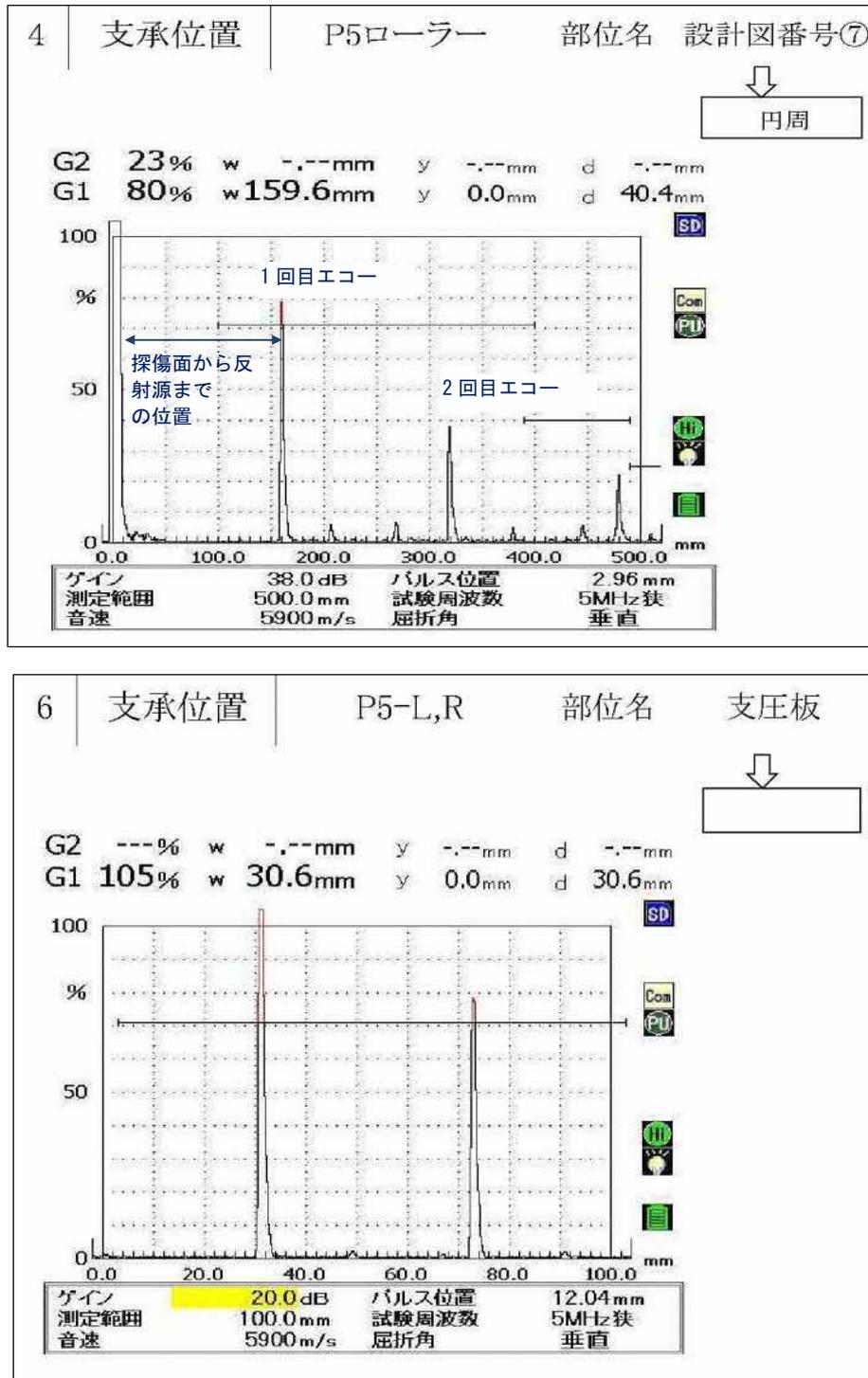


図 2.3-7 ローラーおよび支圧板の超音波探傷試験結果

2.3.3 考察

損傷が確認された支承部材は成分分析の結果、ローラー、支圧板ともに C-13B₂（析出硬化型ステンレス鋼）と判断できた。機械的性質については、支圧板の試験片の一部で伸びの規格値を満足していないが、それ以外の試験片ではいずれの項目も規格値を満足していた。硬度は下限値規定が与えられていることに対して、規格値を上回っていた。

一方で、断面方向の硬度の分布をみると、道路橋支承便覧では、支圧強度を高めるためにローラーや支圧板の表面に焼き入れし、鋼材の内部に比べて表層を硬くすることとなっているが、支圧板では断面表面と内部の硬度の差が明瞭でなかった。この点については、断面のマクロ観察や超音波探傷試験では内部の割れや傷等は確認されていないことから、断面の表面と内部で硬度の差がないことが今回の損傷の主たる要因となったことは考えにくい。

以上から、支承の材料、製造品質が今回の損傷の直接の原因であった可能性は除外できると考えられる。

2.4 支承の損傷状態調査

2.4.1 目的

現地にて近接目視を行った。カバープレートをすべて外したうえで、目視およびファイバースコープカメラを用いて調査した。また、支圧板およびローラーを取り出し、室内で破面観察と3Dスキャナにより形状寸法の計測を行った。

2.4.2 結果

(1) ローラーの損傷状態

図 2.4-1 に支承部材の損傷状態を示す。ローラーの損傷は、ピニオンギア取付部やローラー軸部（細径部）の根元の破損であった。ローラー胴部はガイドに接触し、ローラー胴部端部とガイド端部のそれぞれで金属の剥離状の損傷が見られた。表 2.4-1 にピニオンギアの損傷状態を示し、表 2.4-2 にローラー軸部の損傷状態を示す。ピニオンギア取付部ならびにローラー軸部の破断面は、ほとんどの部分で脆性的な破壊形態を呈しており、破断面ではリバーパターンも見られた。ローラーの胴部はガイドに接触していたが、一方でローラーの胴部には、へこみ、変形等は見られなかった。



図 2.4-1 支承部材の損傷状態

表 2.4-1 ピニオンギア取付け部の損傷状態

ピニオンギア取付け部破断 (P5 橋脚)	
<p>概要図</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>R5H: 左側ローラー R5M: 右側ローラー 5H: 左側支圧板(下側) 5M: 右側支圧板(下側)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>左側</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>右側</p> </div> </div> <p style="text-align: center; color: red;">支圧板の破損により 変位が増大</p> <p style="text-align: center;">上支圧板</p> <p style="text-align: center;">下支圧板</p>
<p>破断部の写真</p>	<p>※図中の A は R5H 側のピニオンギア取付部破断面を示し、D は R5M 側のピニオンギア破断面を示す。</p> <p>※赤矢印は破壊の進行方向を示す。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;"> <p>(a) ローラーのA側破面 (符号R5H)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(b) ギア取り付け側の破面</p> </div> </div>
<p>説明</p>	<p>P5 のローラーR5 では、左右とも下の支圧板が破損していた。ローラーはピニオンギア取付軸の根元から破断しており、破壊の流れ模様より破断起点の方位は R5H 側は 270°、R5M 側は 90° および 270° の 2 方位であった。破面は脆性的な破壊形態を呈している。</p>

表 2.4-2 ローラー軸部の損傷状態

ローラー軸部（くびれ）破断（P6 橋脚）

<p>概要図</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>R6H: 左側ローラー R6M: 右側ローラー 6H: 左側支圧板(下側) 6M: 右側支圧板(上側)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>左側</p> <p>右側</p> </div> </div> <p style="text-align: center; color: red;">支圧板の破損により 変位が増大</p> <p style="text-align: center; color: red;">中央部がせん断破壊</p> <p style="text-align: right;">き裂はあるが 欠損は無し</p>
<p>破断部の写真</p>	<p style="color: red;">※赤矢印は破壊の 進行方向を示す。</p> <p>※図中の B は R6H 側のローラー 軸破断部を示し、C は R6M 側の ローラー軸破断部を示す。</p>
<p>説明</p>	<p>P6 のローラー-R6 では、R6H 側が下の支圧板が、R6M 側は上の支圧板が破損していた。R6M の下の支圧板はき裂が生じていたものの P5 の支圧板よりも破損の程度は軽い。ローラーは胴部の中間の軸部の根元から 2 か所で破断しており、破壊の流れ模様より破断起点の方位は R6H 側が 270°、R6M 側が 90° であり、方位が 180° 変位している。破面はほとんどの部分で脆性的な破壊形態を呈している。</p>

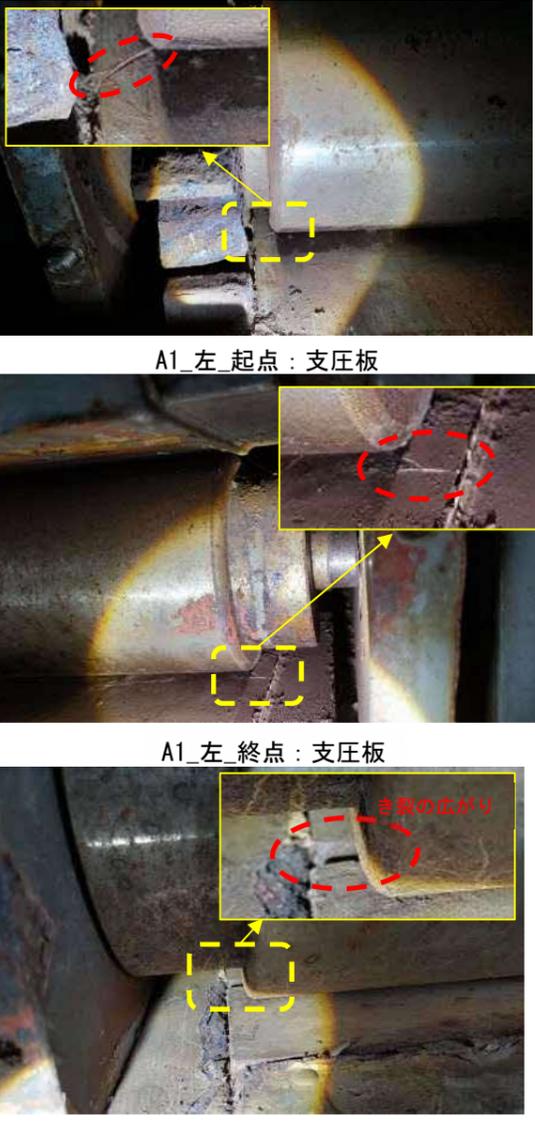
(2) 支圧板の損傷状態

支圧板の損傷の種類を表 2.4-3 に示す。支圧板は、ローラーと接触していたと考えられる中央部周辺にて破断しており、破断面はローラー軸方向に広がっていた。ローラーと接触していたと考えられる表面側では、破断面からローラーの可動方向の前後に一定の幅の範囲で層状に破壊した破片が重なった様子も見せ、摩耗というよりも金属が剥離したような破壊形態であった。

応急対策の実施に伴い取り出した P5 橋脚の左側支承の支圧板の損傷状態を図 2.4-2 に示す。破断面を観察したところ支圧板にはローラーとの接触面側を起点とするビーチマークが確認された。また、破断した支圧板の一部には、ローラー軸直角方向にもき裂が進展している様子も見られた。支圧板がローラーと接触する中央部付近からある幅の範囲で、層状に粉砕しており、また、図 2.4-3 に示すように、ローラーとガイドが接触していた様子がみられたことから、支承は可動支承として設置されているものの、実際には、可動方向（橋軸方向）にほぼ移動していなかったと考えられる。

破断面を拡大すると、ローラーとの接触面（支圧板表面）側からビーチマーク状の破面の進展も見られた。このことは支圧板表面から下面側に向かって徐々に破壊が進行した可能性を裏付ける一方で、内部の傷等が起点となり支圧板の破断が生じた可能性は低いことを示している。

表 2.4-3 支圧板の損傷の種類

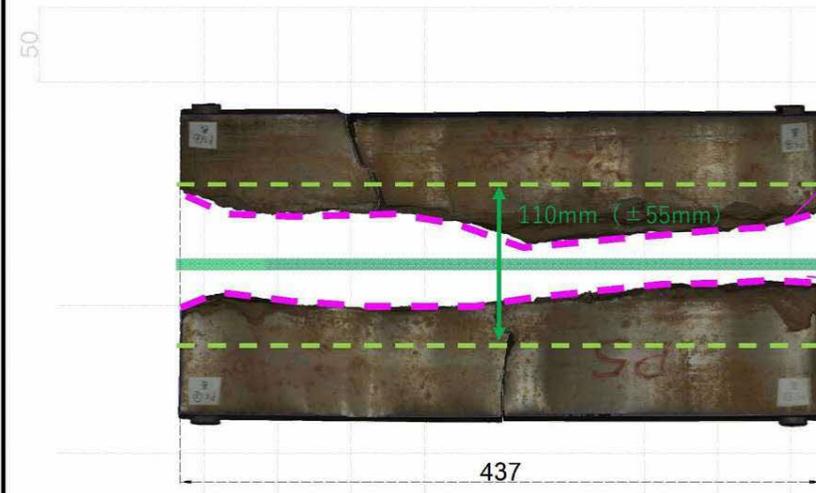
損傷種類	表面の剥離	ローラー軸方向き裂	ローラー軸方向き裂と周辺破損・ローラー直角方向き裂	破断
<p>写真</p>	 <p>ローラー位置で支圧板表面の損傷を確認</p> <p>P5_左_起点：破断が確認されていない支圧板</p> <p>表面からのピーチマーク状態</p> <p>P5_左_終点：破断した支圧板</p> <p>破断した支圧板との破断面を確認すると表面からピーチマーク状の形態が確認される。支圧板表面から損傷が進展したことが確認できる。</p>	 <p>A1_左_起点：支圧板</p> <p>A1_左_終点：支圧板</p> <p>P4_左_終点：支圧板</p> <p>P4_左_終点：支圧板</p> <p>支圧板にき裂が確認できる。現地ではローラーを動かして確認することはできないため、ローラーが載っていないわずかな隙間でき裂を確認することができる。</p>	 <p>P2_左_終点：支圧板</p> <p>P4_左_起点：支圧板</p> <p>P4_左_起点：支圧板</p> <p>支圧板に直角方向のひびわれや、き裂周囲の破損が確認できる。写真の箇所ではローラー軸方向のき裂も確認でき、損傷が広がっていることを確認できる。</p>	 <p>110mm (±55mm)</p> <p>437</p> <p>P5_左_終点：破断が確認された支圧板</p> <p>P6_右_起点：破断した支圧板</p> <p>P6_右_起点：破断した支圧板</p> <p>支圧板は完全に破断し、層状の破片が確認できる。また、細かく粉碎されて粉状となっている。撤去した支圧板では断面からの剥離も確認できる。</p>

P5橋脚

支圧板の損傷状態

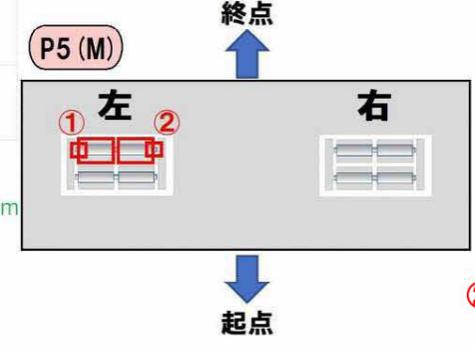
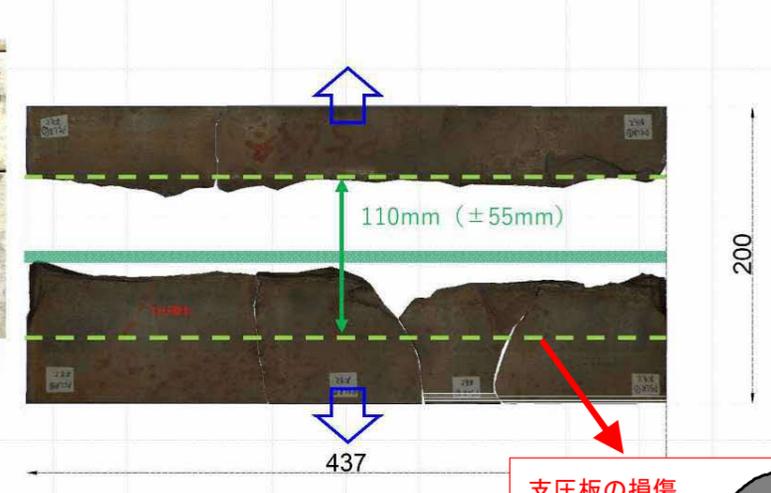
①-1

P5左支承終点側 左下側 上面 ローラー接触面



②-1

P5左支承終点側 右下側 上面 ローラー接触面



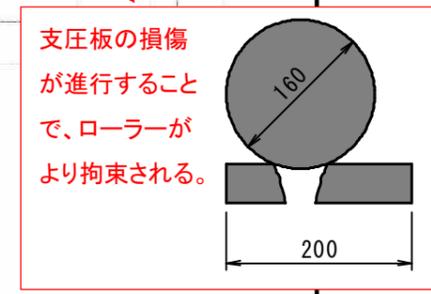
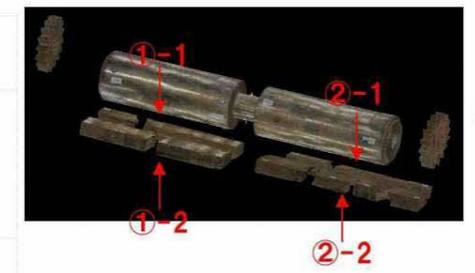
①-2

P5左支承終点側 左下側 下面



②-2

P5左支承終点側 右下側 下面



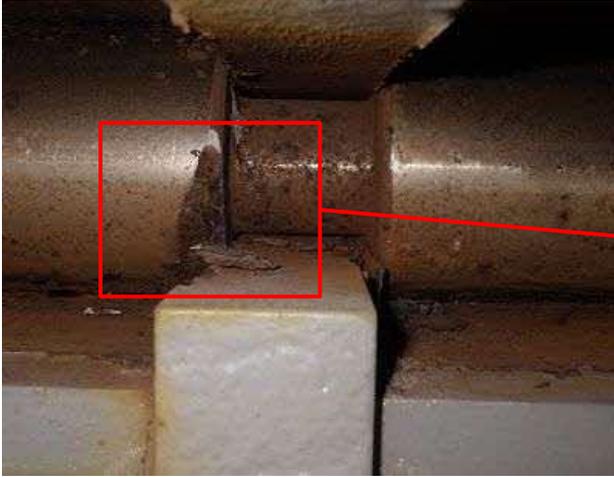
ヘルツ支圧幅 : $2b=4.4\text{mm}$
 支承設計移動量 : $220\text{mm} (\pm 110\text{mm})$

※ヘルツの支圧幅: ローラーの弾性接触領域において支圧板に接触する幅(道路橋支承便覧、昭和48年、日本道路協会)

- ・橋軸直角方向(ローラー軸方向)に破断している。←
- ・撤去時の写真から分かるように、ローラー位置では、層状や粉状に破壊されている。←
- ・橋軸方向(ローラー軸直角方向)の破断も確認される。
- ・残った支圧板では摩耗等の痕は確認できない。←

図 2.4-2 P5 橋脚の支圧板の損傷状態

A2 橋台-起点-左側



P6 橋脚-起点-右側



図 2.4-3 ローラーとガイドとの接触の痕跡

2.4.3 考察

破壊順序は、ローラーの胴部を下側から支持する支圧板が破断したことにより、ピニオンギア部で負荷を支持することになり、ローラー全体が下方に変位してピニオンギア取付軸が同一方向に脆性破壊したことなどが推察される。一方で、ローラーとガイドが接触していた痕跡がみられること、破断が確認された支圧板では、ローラーと接触する支圧板の中央部付近から破断が生じていることから、支承のローラーは実際にはほぼ移動できず、実質的に、支承は、橋接線方向にも固定点として挙動していたと考えられる。また、支圧板はローラーとの接触面側から支圧板内部方向に向かって損傷が進行していった様子も見られることから、常時作用する大きな鉛直力と偏心、傾斜荷重の繰り返しにより、ローラーが支圧板を徐々に損傷させながらめり込んでいったものと考えられる。

また、ローラーのピニオンギア取付部や胴部間の軸部（細径部）の根元の破断や P1 橋脚上の支承で見られたギアのみの破断も、実質的にローラーが可動できなかったことに関係すると考えられる。ローラーがガイド等に接触したり、支圧板の損傷が進行したことなどより負荷がかかり、脆性破壊した可能性が考えられる。

2.5 破断面の観察調査

2.5.1 目的

損傷が確認された支承のうち、P6 橋脚上の支承より取り出したローラーおよび支圧板から試験片を切り出し、走査線電子顕微鏡（SEM）による破面観察を行い、破壊形態や破壊の起点、割れ進展方向を調べた。試験片の切り出し位置は、**図 2.5-1** のとおりである。また、参考として、損傷要因と一般的な破面性状の関係を**表 2.5-1** に示す。

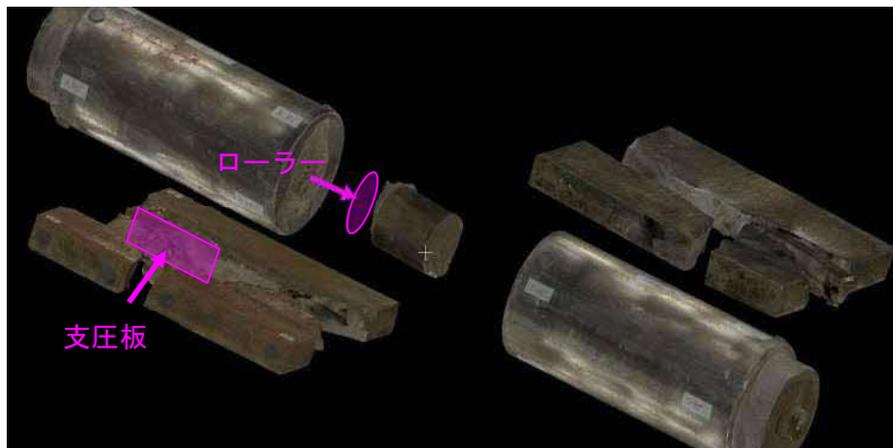
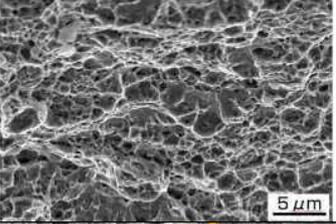
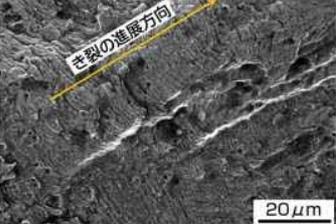
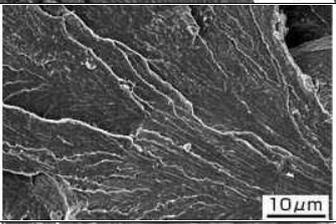
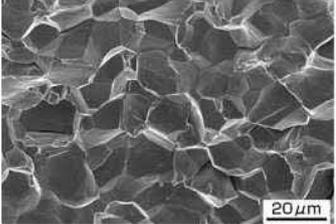


図 2.5-1 試験体取り出し位置

表 2.5-1 損傷要因と一般的な破面性状の関係

	破面性状の例	概要
延性破壊 (ディンプル)		<ul style="list-style-type: none"> ・塑性変形の進行にともない、析出物、介在物等が核となって微小空洞が生成し、合体連結した結果生じる。 ・ディンプルによる破壊は延性のある材料が過大な応力を受けて破壊したことを示している。
疲労破面 (ストライエーション)		<ul style="list-style-type: none"> ・疲労破壊では延性材料でもマクロ的には平坦な破面を示し、塑性変形は認められない。通常、材料表面からき裂が発生し、引張応力に垂直な方向に進展する。 ・き裂進展部にはストライエーションと呼ばれる応力繰返しの各サイクルに対応する縞模様が観察される。
脆性破面 1 (リバーパターン)		<ul style="list-style-type: none"> ・へき開面と呼ばれる特定の結晶面で分離破壊（粒内破壊）し、ほとんど塑性変形を伴わない。 ・破面はへき開ファセットからなり、破壊はいくつかのへき開面にまたがるので、ファセットの表面にはき裂伝搬方向に沿って段ができ、き裂伝搬につれてこれらが合流して川状の模様（リバーパターン）を形成する。
脆性破面 2 (粒界破面)		<ul style="list-style-type: none"> ・金属材料が脆性的に破壊する場合、へき開破壊が一般的であるが、水やある種の環境下、金属材料を脆化させる元素が含まれる場合、結晶粒界に沿って脆性的にき裂が進展して破壊することがある。 ・焼戻し脆化、焼割れ、応力腐食割れ、遅れ破壊（水素脆化）などの場合に認められる。

引用： https://www.monotaro.com/s/pages/readingseries/kikaibuhinhyomensyori_0806/

2.5.2 結果

ローラー軸部の破面観察結果を表 2.5-2 に示す。ローラー軸部では、表面にて腐食ピットと考えられる滑らかな形態が一部で認められ、その内部の破面ではリバーパターンが認められ、細かい分岐や屈曲がみられた。したがって、破壊の起点は表面であり、かつ、起点から一気に脆性的な破断が生じたものと考えられる。

支圧板の破面観察結果を表 2.5-3 に示す。支圧板では、実体顕微鏡によるマクロ観察において、表面側（ローラーとの接触面側）にビーチマークが見られた。ただし、支圧板表面では、細かく剥離した様相も呈している。内部の破面では、へき開を示すリバーパターンの脆性破面が認められ、細かい分岐や屈曲がみられる。したがって、表面側から漸次、破壊が内側に向かって進行し、最終的に脆性破壊につながったものと考えられる。

表 2.5-2 破面観察結果（ローラー）

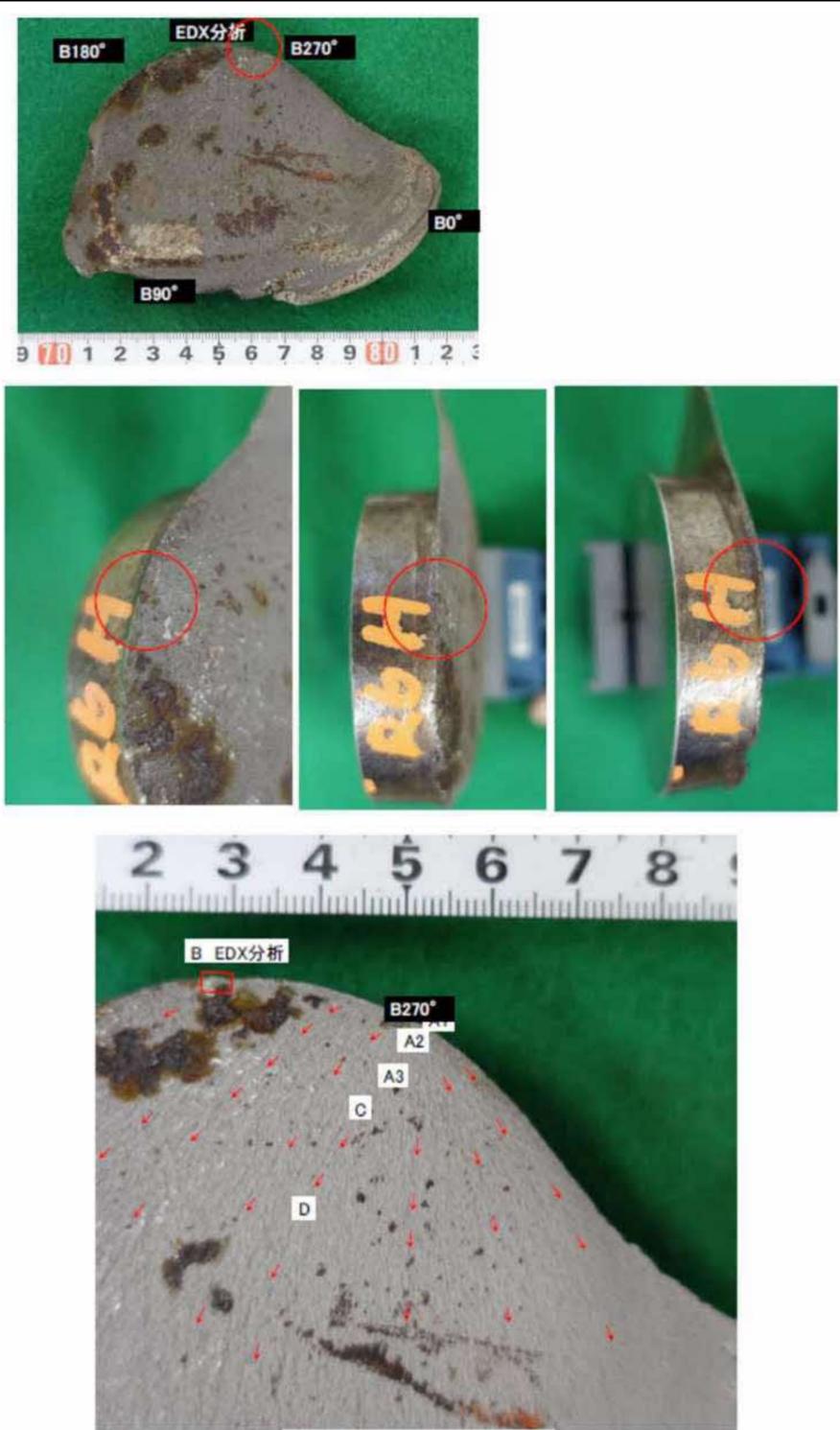
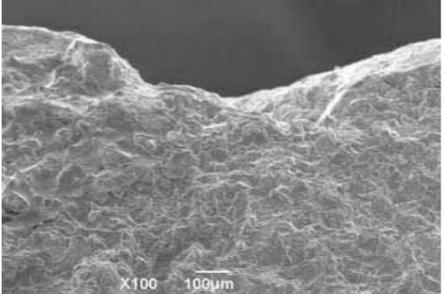
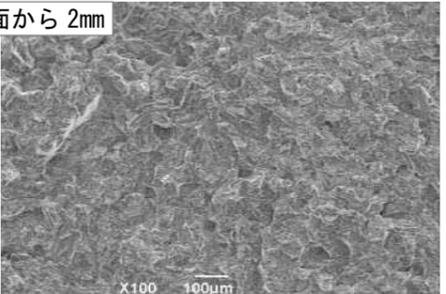
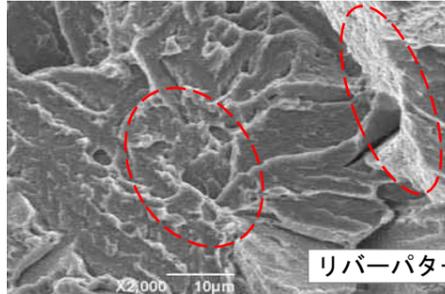
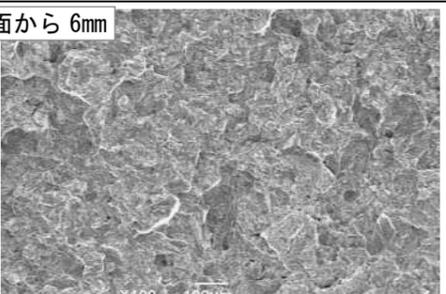
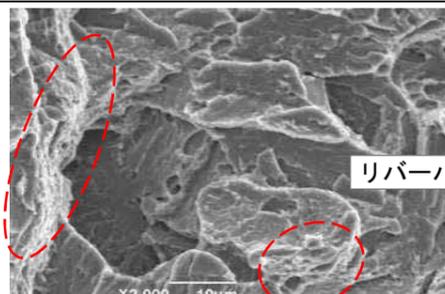
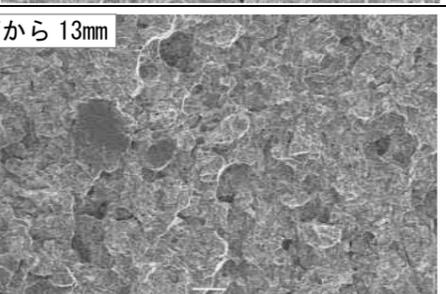
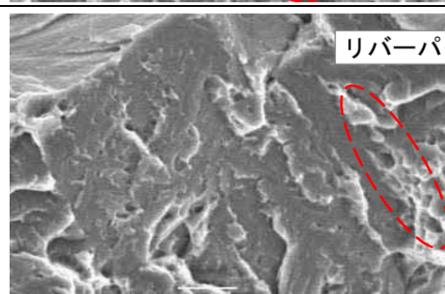
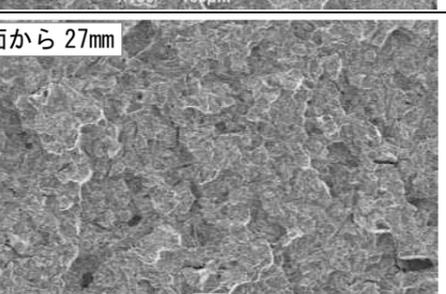
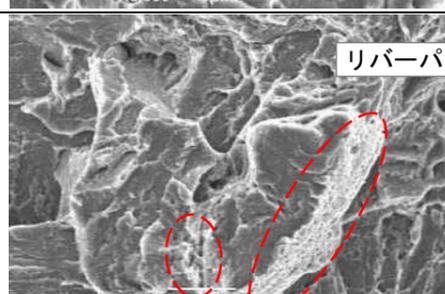
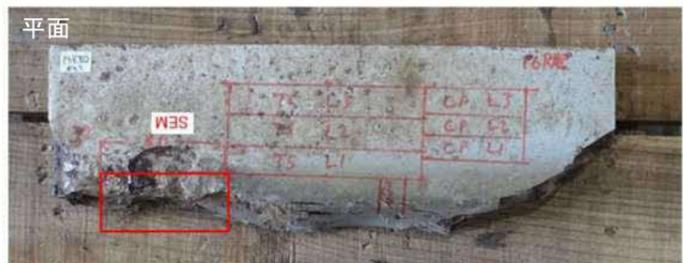
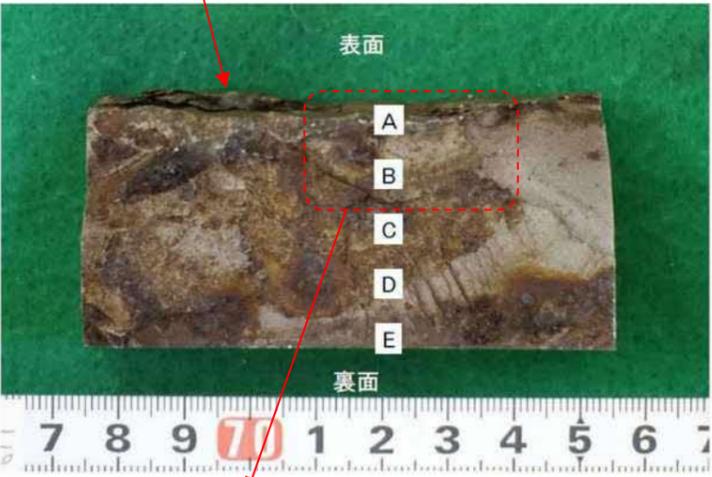
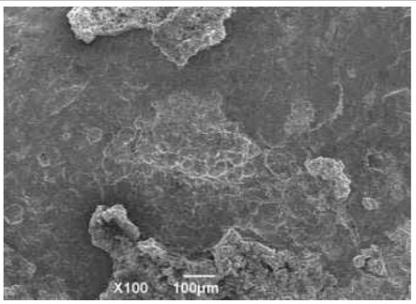
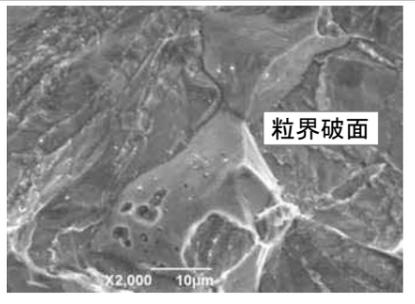
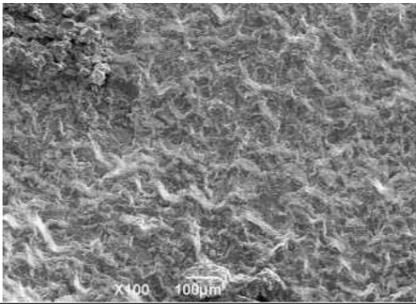
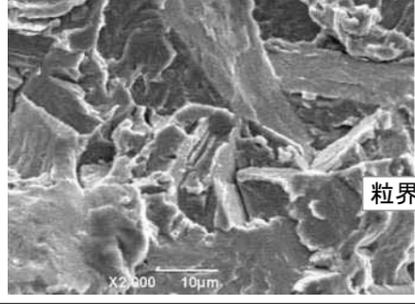
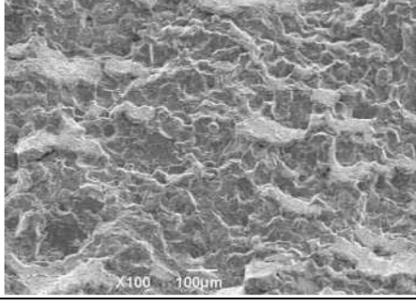
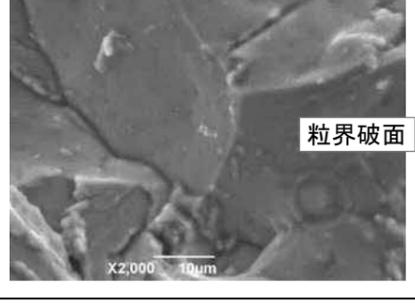
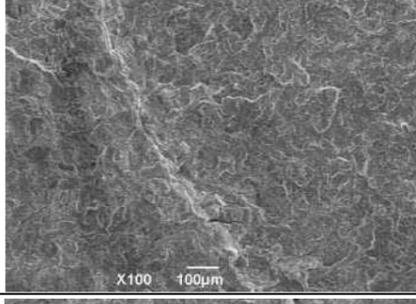
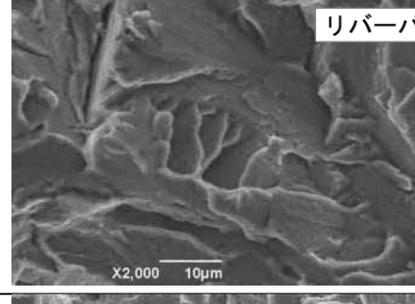
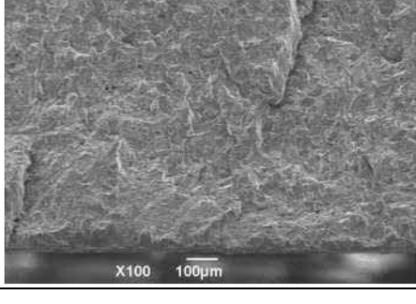
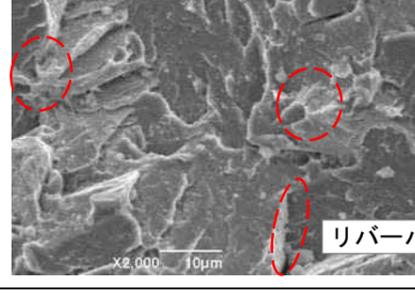
P6 橋脚 ローラー	
位置図	破面
 <p>位置図</p>	<p>A1</p>   <p>起点部はなめらかな形態が認められる</p>
	<p>A2 表面から 2mm</p>   <p>リバーパターン</p>
	<p>A3 表面から 6mm</p>   <p>リバーパターン</p>
	<p>C 表面から 13mm</p>   <p>リバーパターン</p>
	<p>C 表面から 27mm</p>   <p>リバーパターン</p>

表 2.5-3 破面観察結果（支圧板）

P6 橋脚 支圧板	
位置図	破面
<p>平面</p>  <p>側面</p>  <p>表面</p>  <p>裏面</p>	<p>A</p>   <p>B</p>   <p>C</p>   <p>D</p>   <p>E</p>  
<p>実体顕微鏡での破面観察</p>  <p>表面、斜め上からの観察結果</p>  <p>ビーチマーク状の破面形態が認められる。 表面（接触面側）も破面であり、薄く剥離した形態を呈している。</p>	

2.5.3 考察

損傷が確認されたローラーおよび支圧板の破断面を走査型顕微鏡で観察した結果、ローラー軸部では脆性的な破壊が、支圧板は表面側（ローラー側）から破壊が進行したと考えられる。これらは2.4.3の考察を裏付けるものであった。すなわち、ローラー軸部は大きな局所応力によって脆性的に破断、支圧板はローラーとの接触面から大きな鉛直力を受けるだけでなく、繰り返し変動する作用力を受けることにより、徐々に損傷が進行し破断に至ったと考えられる。

2.6 全体挙動調査

(1) 目的

牛深ハイヤ大橋は長大で特殊な断面形状の曲線橋のため、複雑な挙動をしていたと考えられ、2.5 に示したとおり、支圧板の損傷は繰り返し変動する作用力を受け、進行したと考えられる。繰り返し作用のうち、活荷重や風荷重による損傷に至るような変動作用は見られなかったことから、日々の変動作用の要因は温度変化であると考えられる。そこで、温度影響により、橋としてどういった動きをしているのか、どういった応答がでているのかといったことを、支承や支点、部材、径間毎での計測結果から、橋の全体挙動として整理して、その傾向を把握し、上部構造各部材での温度差の把握、支承拘束の確認、解析の妥当性確認、恒久対策への活用を行うことを目的とする。表 2.6-1 にローラーおよび支圧板の損傷の分布を示す。部材表面の異常やき裂の発生は全径間で確認されているが、ローラーおよび支圧板の破断は固定支承である P3 より終点側 (A2 側) で確認されており、終点側 (A2 側) は起点側 (A1 側) と比べて厳しい条件であると考えられる。よって、固定支承である P3 より終点側 (A2 側) に着目して調査を実施する。しかし、P5 (左) 支承、P6 (右) 支承、A2 (右) 支承は応急対策済みであり、損傷前と支承条件は同じではなく、計測される全体挙動は損傷前とは異なると考えられる。ただし、P4 支承部は応急対策を実施していないこと、応急対策を実施した支承より固定点側であることから、計測される挙動と損傷前の挙動の違いは相対的には小さいと考えられる。以降に全体挙動調査において実施する各調査の目的を記す。

1) 支承間距離計測：設計図書との整合確認

各調査を実施し結果整理するうえで、前提条件となる牛深ハイヤ大橋の上部構造について、設計図書通りの支承間距離となっているかを確認する。

2) 桁の部材温度調査：恒久対策への活用

恒久対策を検討する際の条件としての活用することを目的に、全体の温度変化および部材間温度差の計測を実施する。なお、天候の影響を受けることが想定されるため、一定期間、経時変化を測定する。

3) 支承移動量調査：支承拘束の確認

支承拘束の影響を確認するために実施する。左右支承それぞれの挙動を確認するために左右の支承で計測を実施する。温度変化に伴い変位が生じることが想定されるため、一定期間、経時変化を測定する。

4) 下部構造変位計測：支承拘束の確認

支承拘束の影響を確認するために実施する。温度変化に伴い変位が生じることが想定されるため、一定期間、経時変化を測定する。

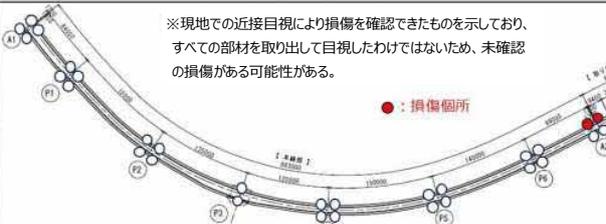
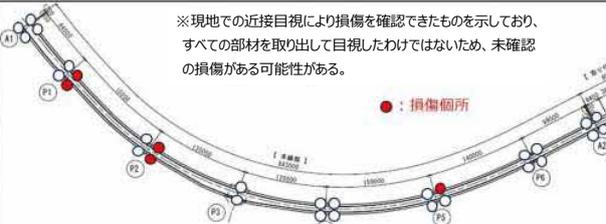
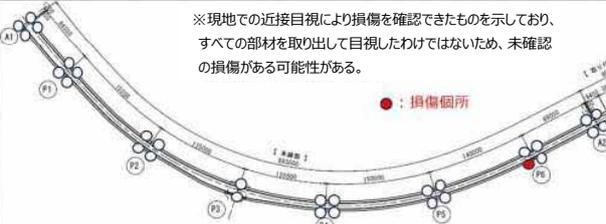
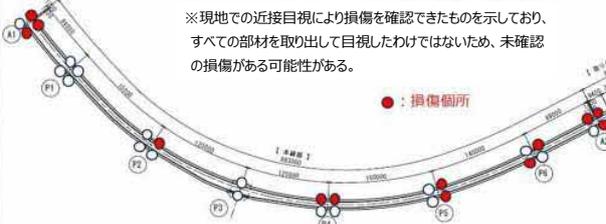
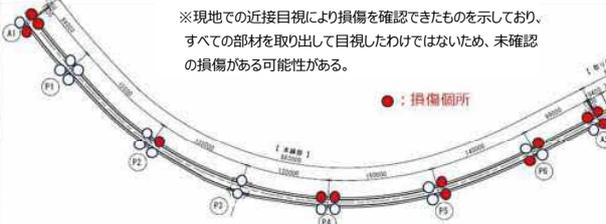
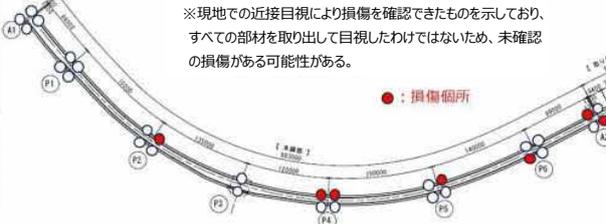
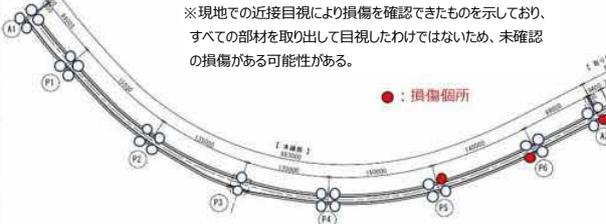
5) 桁伸縮量調査：温度変化に伴う桁の挙動の確認

温度変化に伴う桁の挙動を確認するために実施する。桁伸縮量は、一定期間、経時変化を測定する。また、数値解析におけるモデルの妥当性の確認にも使用する。

6) 支承反力調査：温度変化に伴う鉛直反力増減の確認

数値解析の結果、温度差により鉛直反力が生じることが確認されたため、実現象として温度変化に伴う反力変動を確認するために実施する。温度変化に伴い変位が生じることが想定されるため、一定期間、経時変化を測定する。

表 2.6-1 各損傷の分布

部材	損傷	左右	A1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	A2	概要図			
			起終		起終									
ローラー	表面のかけ	左	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>	
		右	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	ピニオン取付軸の破断	左	-	-	○	○	-	-	-	-	○	-	-	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
	ローラー軸部の破断	左	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	
支圧板	表面の剥離	左	○	○	-	-	○	-	○	○	-	○	○	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○	
	ローラー軸方向き裂	左	○	○	-	-	○	-	○	○	-	○	○	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	○	-	-	-	-	-	○	○	-	○	
	ローラー軸方向き裂と周辺破損・ローラー直角方向き裂	左	-	-	-	-	○	-	○	○	-	○	-	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	
	破断	左	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	 <p>※現地での近接目視により損傷を確認できたものを示しており、すべての部材を取り出して目視したわけではないため、未確認の損傷がある可能性がある。</p> <p>●：損傷箇所</p>
		右	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	

(2) 方法

1) 支承間距離計測

全下部構造を対象に、左右支承それぞれの座標を計測し、下部構造位置（下部構造中心位置）を算出し支間長の確認を行う。図 2.6-1 および図 2.6-2 に計測箇所と下部構造位置の設定を示し、図 2.6-3 に計測概要を示す。なお、他の調査で、温度変化に伴い支承に変位が生じるとともに下部構造にも変位が生じることを確認しているが、支承間距離計測調査では、高い精度は求めていないため、経時変化は考慮しない。

- ・計測実施日時：2023年2月27日 14時～17時、28日 10時～12時
 - ・天候：晴れ、14℃前後
 - ・対象範囲：A1 橋台、P1 橋脚、P2 橋脚、P3 橋脚、P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚、A2 橋台
- ※各位置の桁および下部構造の左右で実施。（32 か所）
- ・計測箇所：上部構造（支承取付構造部）左右、下部構造（支承サイドブロック）左右

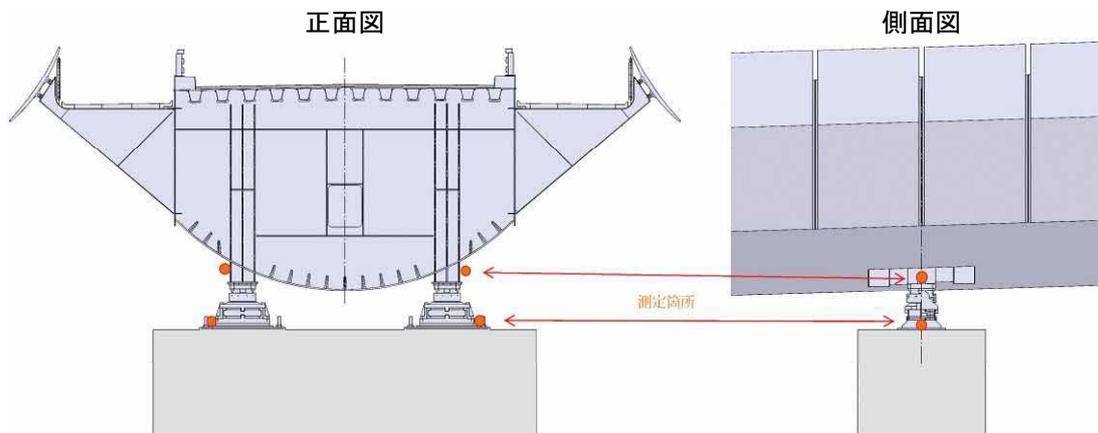
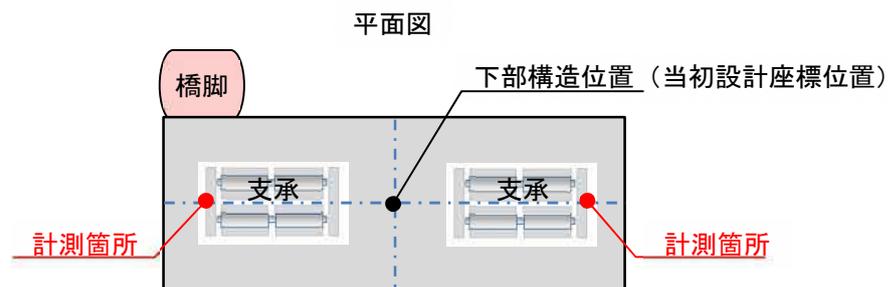


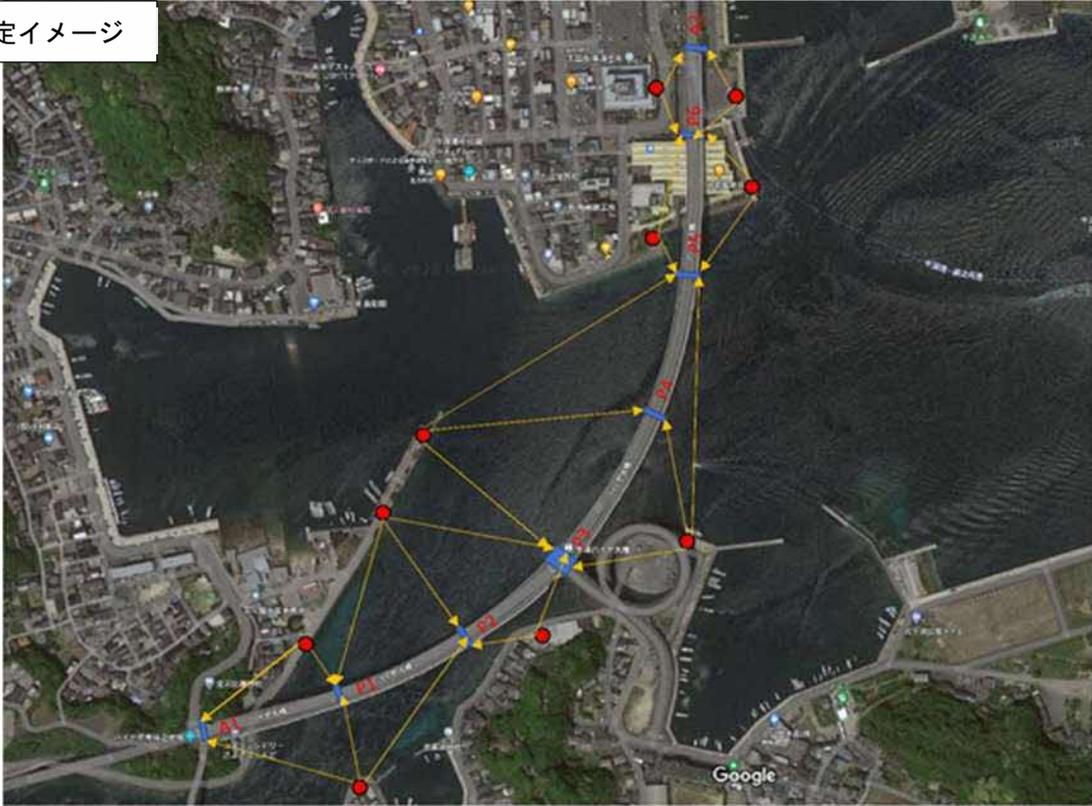
図 2.6-1 計測箇所



※左右支承で計測した座標値を結び、その中心位置を下部構造位置とする。

図 2.6-2 計測箇所と下部構造位置

測定イメージ



レーザー出力	クラス 1
測定距離	1.3~3500m
測距制度	0.8+1ppm*D
測角制度	0.5"
測定時間	0.9 秒以下
補正機能	±6°
最小表示	0.00001m
重量	6.8kg

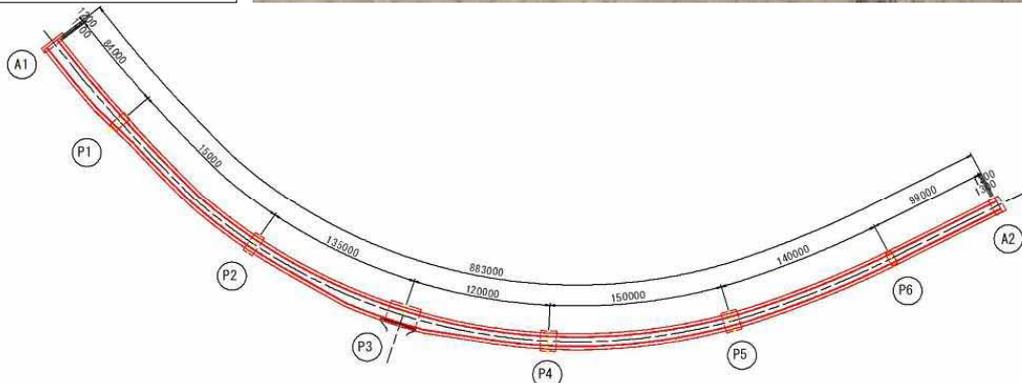
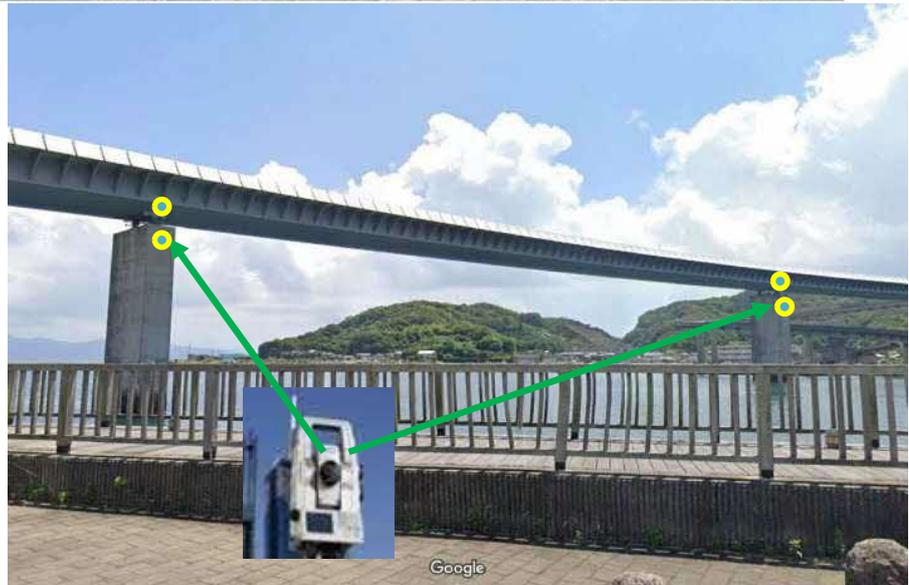


図 2.6-3 支承間距離計測概要

2) 桁の部材温度調査

箱桁の床版、下フランジ、左ウェブ、右ウェブの温度変化と部材間の温度差を確認するために、熱電対と赤外線計測機能付き UAV を使用した温度計測を実施した。図 2.6-4 に温度分布調査概要を示す。熱電対による温度計測は、P3 橋脚から A2 橋台の各径間で、支間中央の桁の温度（床版、下フランジ、左ウェブ、右ウェブ）を計測した。併せて、桁の左右の温度を面的に把握するために、P3 橋脚から A2 橋台を対象に赤外線計測機能付き UAV を使用し橋梁全体の温度分布の計測を行った。

熱電対による部材温度調査の概要を以下に示す。

- ・ 調査目的：温度変化と箱桁上下左右での差異の確認
- ・ 調査箇所：P3-A2 間の各径間の中央で箱桁断面の内側上下左右 4 面の各中央位置
- ・ 調査実施日：2022 年 6 月 13 日～30 日
- ・ 計測間隔：5 分（5 分毎に 1 回計測）
- ・ 使用機器：熱電対 17 台（支間中央部 4 断面×4 か所＋外気温用 1 か所）
- ・ 調査方法：箱桁内に設置した熱電対により計測

UAV による温度分布調査の概要を以下に示す。

- ・ 調査目的：桁の左右の温度を面的に把握
- ・ 調査箇所：P3～A2 間の各径間の左右
- ・ 調査実施日：2022 年 6 月 16 日
- ・ 計測間隔：2 時間（2 時間毎に 1 回計測）
- ・ 使用機器：赤外線計測機能付き UAV（赤外線サーモグラフィ H2640、測定精度：0.03℃）
- ・ 調査方法：赤外線計測機能付き UAV により左右ウェブの表面の温度を計測

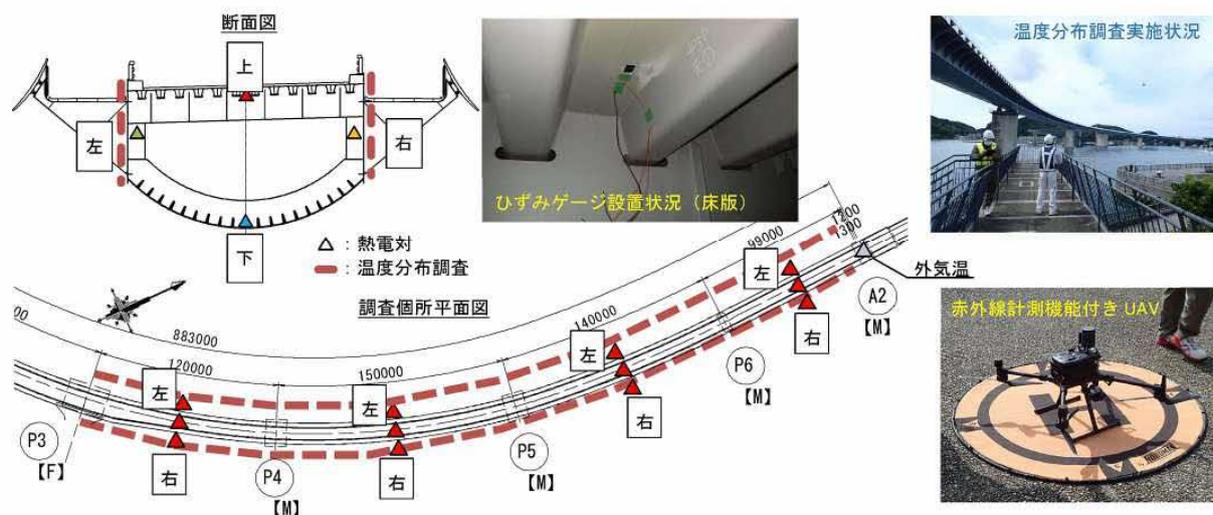


図 2.6-4 温度分布調査概要

3) 支承移動量調査

応急対策を実施した P3-A2 間の橋脚、橋台を対象に支承の温度変化に伴う支承移動量計測を行った。図 2.6-5 に支承変位の計測概要を示す。支承変位計測は、P3 橋脚から A2 橋台の各径間で、左右支承の橋軸方向と橋軸直角方向を計測した。

支承移動量調査の概要を以下に示す。

- ・調査目的：温度変化と支承移動量の関係および左右支承での差異を確認
- ・調査箇所：P3-A2 間（P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚、A2 橋台）
- ・調査実施日：2022 年 6 月 13 日～26 日
- ・計測間隔：5 分（5 分毎に 1 回計測）
- ・使用機器：変位計 16 台（下部構造 4 基×2 支承×2 方向）
 - ※ピボット支承である P3 橋脚を除く
- ・計測方法：下部構造側（支承ベースプレート）に固定し、上沓位置の橋軸方向および橋軸直角方向の水平変位を計測

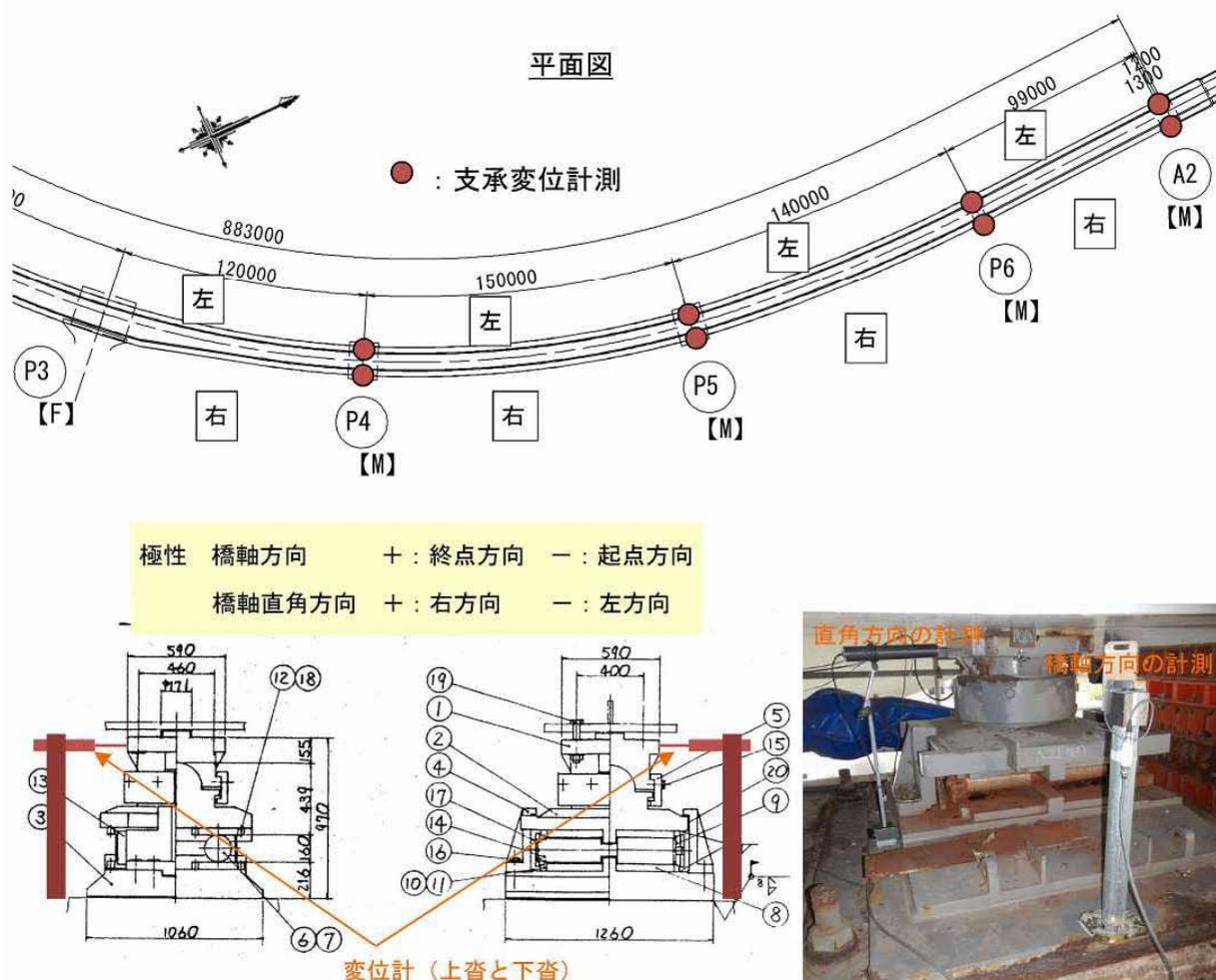


図 2.6-5 支承変位計測概要

4) 下部構造変位計測

可動支承の固定化により下部構造に不静定力が作用し水平変位が生じる可能性があるため、日中の温度変化に伴った下部構造天端の変位計測を実施した。図 2.6-6 に下部構造変位計測の調査状況を示す。対象は、応急対策を実施した P3-A2 間の橋脚・橋台とし、下部構造の軸方向と直角方向で計測した。

下部構造変位計測の概要を以下に示す。

- ・ 調査目的：桁伸縮による下部構造変位の把握
- ・ 調査箇所：P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚
- ・ 調査実施日：2022 年 6 月 16 日
- ・ 計測間隔：15 分（15 分毎に 1 回計測）
- ・ 使用機器：自動追尾式 TS（トータルステーション）
- ・ 計測方法：P3 橋脚、A2 橋台を基準点として、P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚に TS を設置し、P3 橋脚から A2 橋台の区間で放射トラバースを構成

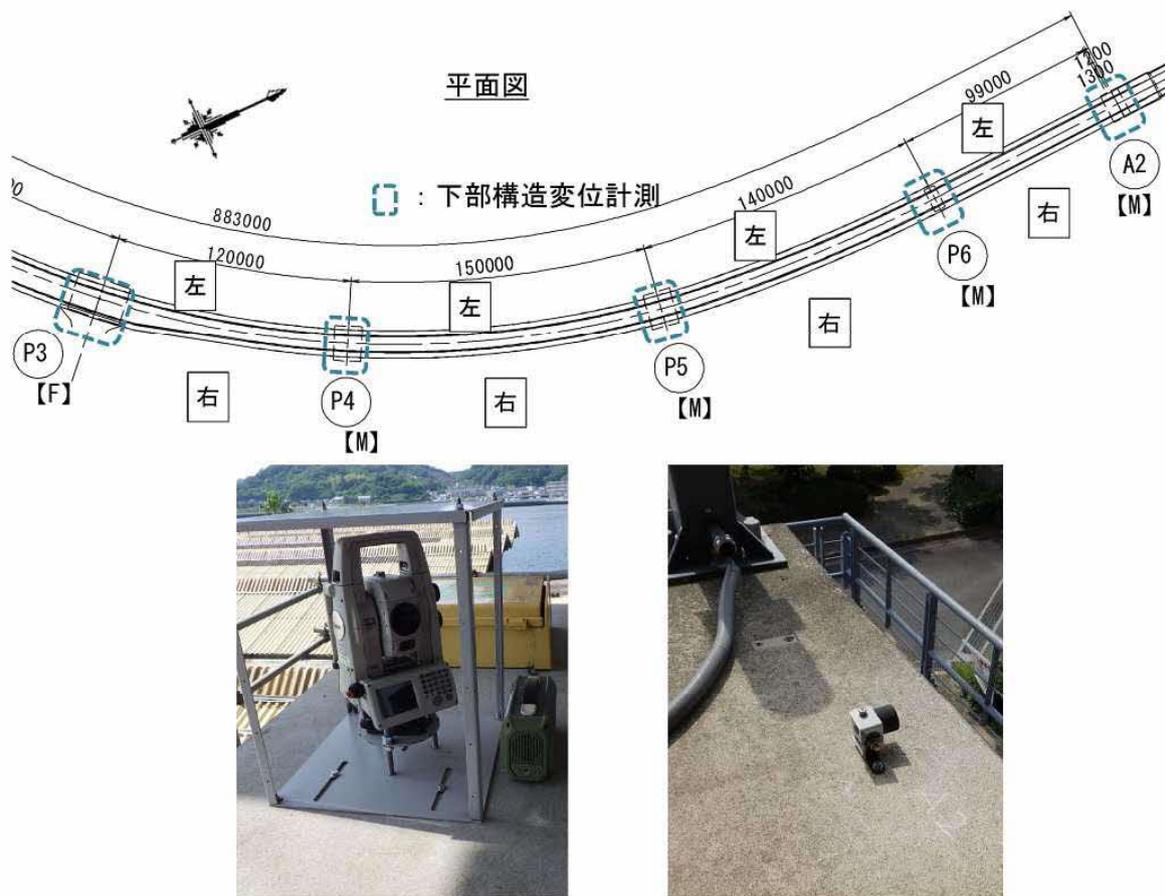


図 2.6-6 下部構造変位計測の調査状況

5) 桁伸縮量調査

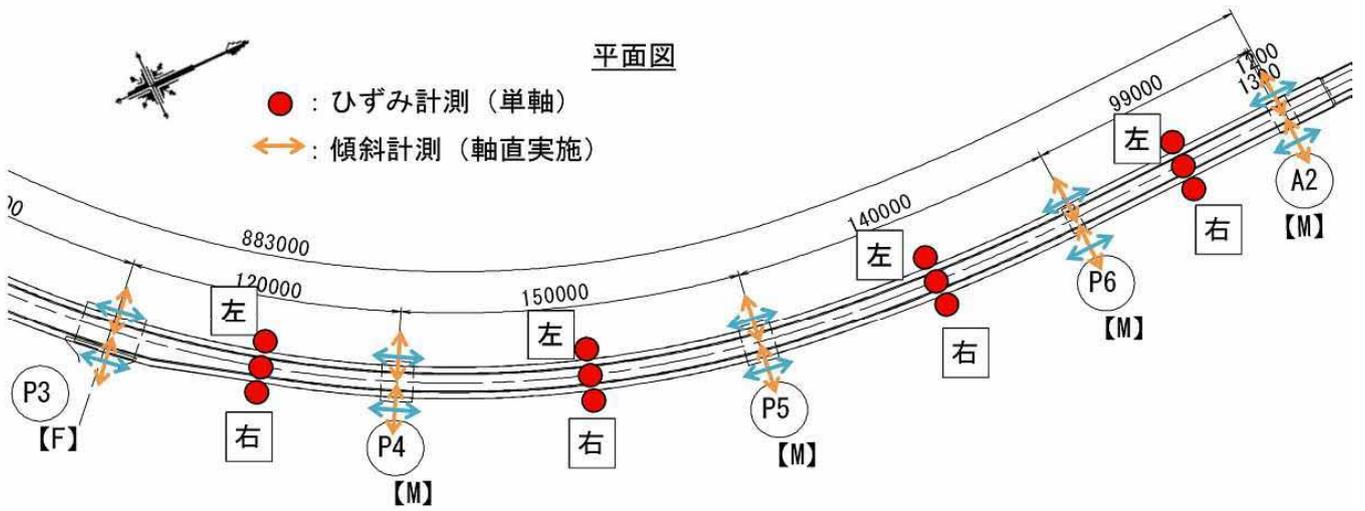
温度変化に伴う上部構造の挙動を確認するために、桁伸縮量と桁の傾斜の計測を行った。図 2.6-7 に桁伸縮量および傾斜計測概要を示す。桁伸縮量の計測は、常時における上部構造の伸縮量を把握するため、支間中央部に一軸ひずみゲージを設置し、桁の伸縮量（橋軸方向のひずみ）を計測した。傾斜は、各支承の上査もしくは支承取付構造に傾斜計（ピボット部）を設置し、桁側の橋軸・橋軸直角方向の傾斜を計測した。

桁伸縮量調査（ひずみ計測）の概要を以下に示す。

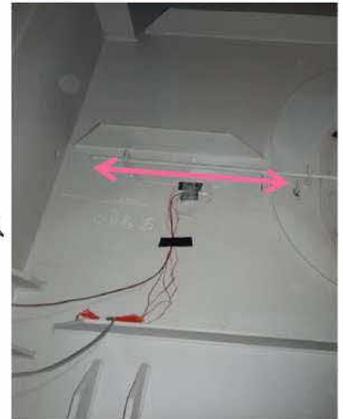
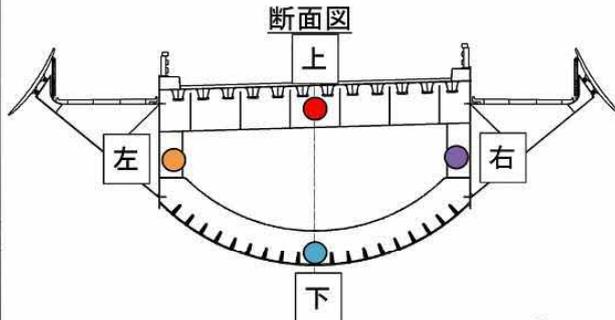
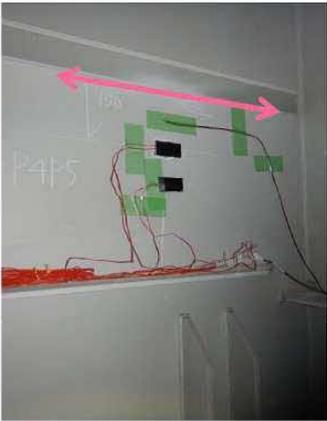
- ・調査目的：温度変化と桁伸縮量の関係および桁左右での差異を確認
- ・調査箇所：P3 から A2 の各径間の支間中央で実施（箱桁内部に設置）
- ・調査実施日：2022 年 6 月 13 日～26 日
- ・計測間隔：5 分（5 分毎に 1 回計測）
- ・使用機器：単軸型ひずみゲージ 16 台（支間中央部 4 断面×4 か所）
熱電対 17 台（ひずみゲージと同位置＋外気温用 1 か所）
- ・計測方法：橋軸方向の桁の伸縮を計測する目的で一軸ひずみゲージを箱桁断面の内側、上下左右 4 面の各中央位置に設置し常時計測

傾斜計測調査の概要を以下に示す。

- ・調査目的：温度変化と桁の傾斜の関係および桁左右での差異を確認する。
- ・調査箇所：P3-A2 径間（P3 橋脚、P4 橋脚、P5 橋脚、P6 橋脚、A2 橋台）
- ・調査実施日：2022 年 6 月 13 日～26 日
- ・計測間隔：5 分（5 分毎に 1 回計測）
- ・使用機器：2 軸傾斜計 10 台（下部構造 5 基×2 支承×1 か所）
- ・計測方法：傾斜計は、桁の傾斜を計測するため、上査もしくは、支承取付構造に設置、計測方向は各下部構造で橋軸方向および橋軸直角方向

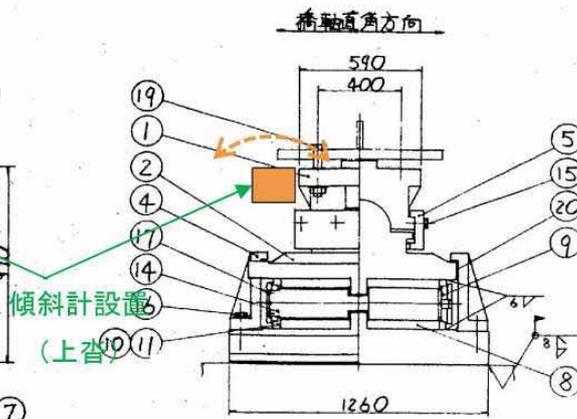
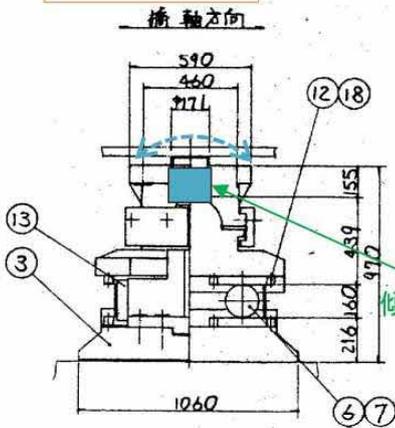


ひずみ計測箇所



● : ひずみ計測 (単軸)

傾斜計測箇所



傾斜計設置
(上巻)



図 2.6-7 桁伸縮量 (橋軸方向ひずみ) および傾斜計測概要

6) 支承反力調査

P6 橋脚に反力計を設置し、1 日計測を実施した。図 2.6-8 に支承反力調査の実施箇所を示す。調査は P6 橋脚の左右支承で実施し、1 日の経時変化を計測した。

調査概要を以下に示す。

- ・ 調査目的：桁の温度伸縮により、想定以上の反力や左右支承での差異が発生していないかを確認
- ・ 調査箇所：P6 橋脚
- ・ 計測間隔：15 分（15 分毎に 1 回計測）
- ・ 調査実施日：2022 年 6 月 27 日～28 日
- ・ 使用機器：油圧ポンプ 4 台、温度計 1 か所

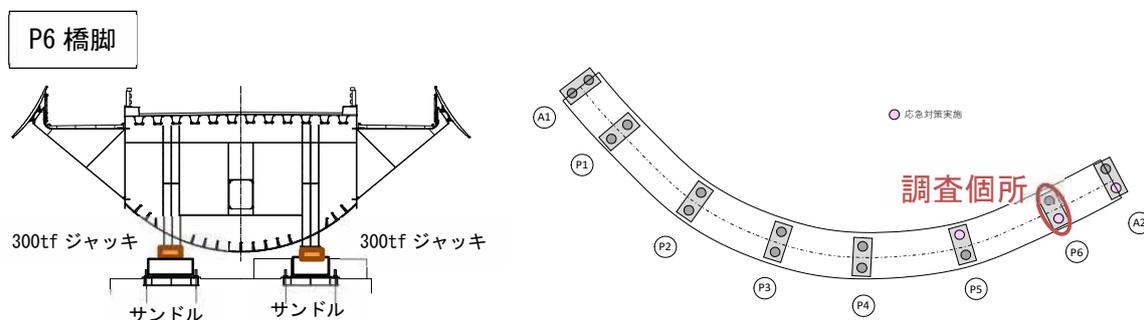


図 2.6-8 支承反力調査の実施箇所

(3) 結果

1) 支承間距離計測

表 2.6-2 に示すとおり、設計時の上部構造線形図に示される下部構造座標値より算出される支承間距離と下部構造測量より算出される支承間距離は、よく一致した。支承間距離の合計値は、既往図面と下部構造測量結果では 6mm の差となる。なお、2.6(2)1)の方法に記載したとおり、温度伸縮を考慮していないこと、温度変化に伴う下部構造変位は考慮しておらず、高い精度は不要としているため、参考として表 2.6-2 に施工管理基準値を記載するが、各径間の径間長の差は施工管理基準値以内となる。

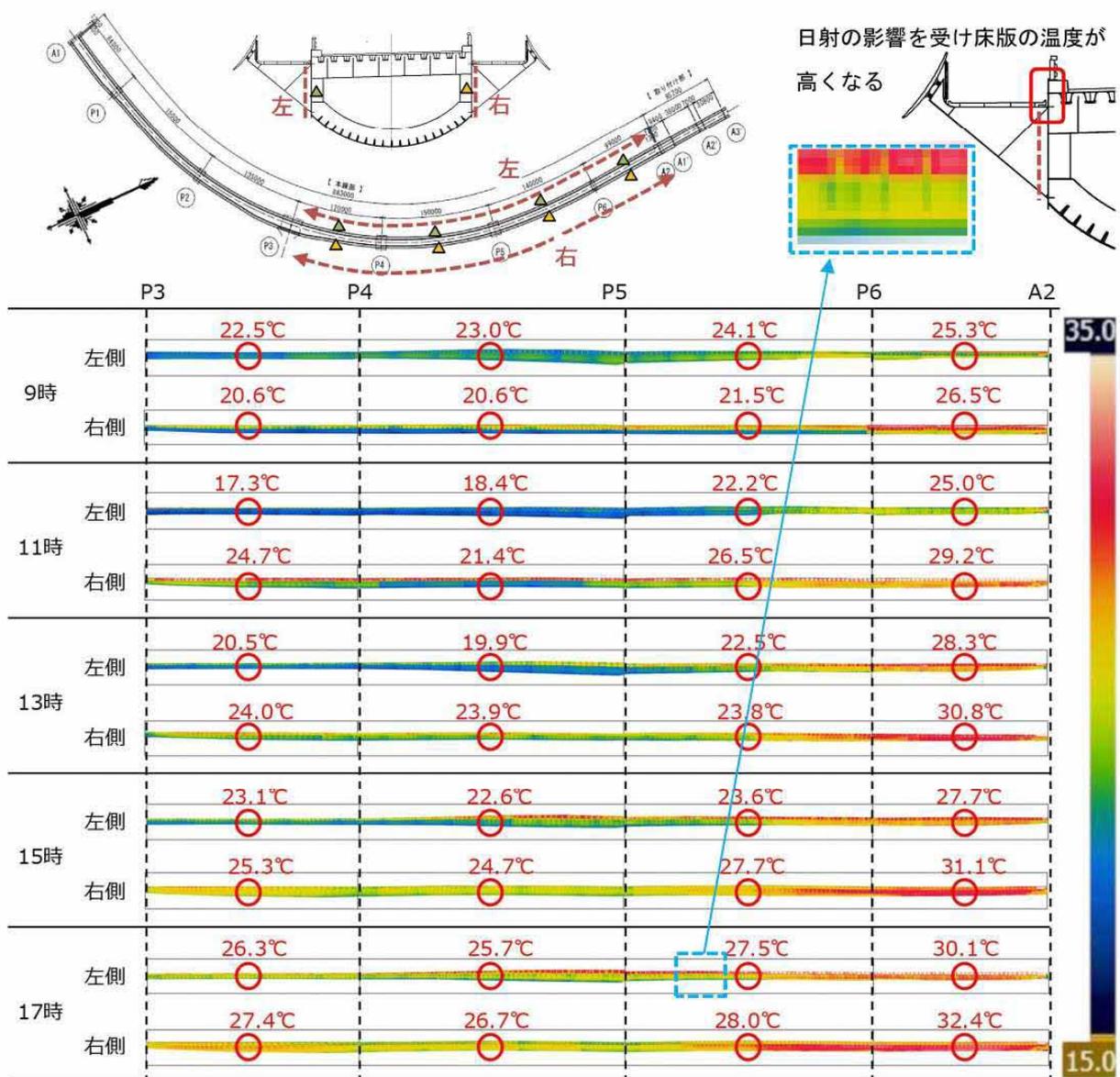
表 2.6-2 既往図面と測量結果（下部構造）の支承間距離

径間	①既往図面 (m)	②調査結果 (m)	差(②-①) (mm)	【参考】 施工管理 基準値 (mm)
A1 橋台-P1 橋脚	84.002	83.988	-14	±50
P1 橋脚-P2 橋脚	149.532	149.535	3	±50
P2 橋脚-P3 橋脚	134.748	134.746	-2	±50
P3 橋脚-P4 橋脚	119.868	119.842	-26	±50
P4 橋脚-P5 橋脚	149.340	149.379	39	±50
P5 橋脚-P6 橋脚	139.810	139.798	-12	±50
P6 橋脚-A2 橋台	99.002	99.008	6	±50
合計	876.302	876.296	-6	-

2) 桁の部材温度調査

a) 左右ウェブの温度分布

赤外線による左右ウェブの温度分布調査計測箇所結果を図 2.6-9 に示す。計測結果は、P3-A2 間の左右ウェブの 2022/6/16 の 2 時間毎 (9:00、11:00、13:00、15:00、17:00) のものである。図中に記載の温度は径間中央の桁の内側に設置した熱電対で計測した部材温度を示す。図 2.6-9 より、同時刻でも径間毎に左右ウェブに温度差が生じていることが確認でき、全体的な傾向としては、P6-A2 径間の温度が常に高いこと、P4-P5 径間は気温の上昇時に部材間で相対的に温度が低くなること、P3-P4 径間および P5-P6 径間は数値に多少の大小はあるが同程度であることを確認できる。また、ウェブの上下方向にも温度が分布し、日射による影響が大きい時刻 (右ウェブ 11:00、左ウェブ 15:00、17:00) で床版側のウェブ上部の温度上昇が確認される。以上より、日射の影響により、径間毎ならびに部材間の温度差が生じると考えられる。



○ : 径間中央の桁の内側に設置した熱電対で計測した部材温度

図 2.6-9 赤外線による温度分布調査結果

b) 部材毎の温度時刻歴変化

図 2.6-10 から図 2.6-13 に熱電対で計測した各部材の部材温度の時刻歴変化を示す。床版は他部材と比べて温度が高く、径間毎の温度に大きな差は確認できない。一方で、他の部材では径間毎に温度に差が生じており、下フランジや左右ウェブでは P6-A2 径間の温度が高い傾向が確認でき、同一部材においても径間毎の温度に差が生じる。また、左側ウェブでは 1 日の中で温度変化が大きい 6/15~19、22、27~30 の午後に P3-P4 径間、P4-P5 径間の温度が高くなるのが確認できる。これらが確認できる日は外気温の変化が大きい晴れの日であり、午後に日射の影響を受けていると考えられるため、径間毎に橋梁と太陽位置の関係に着目する。

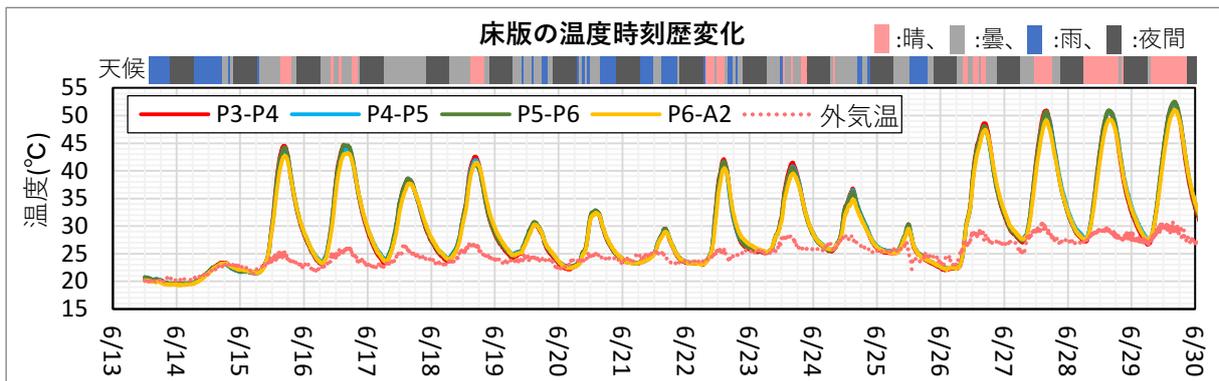


図 2.6-10 床版の部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13~30）

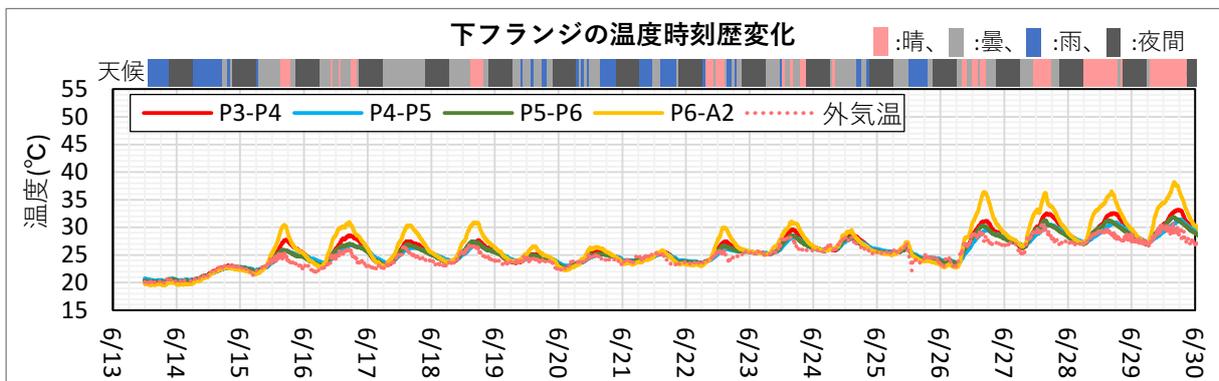


図 2.6-11 下フランジの部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13~30）

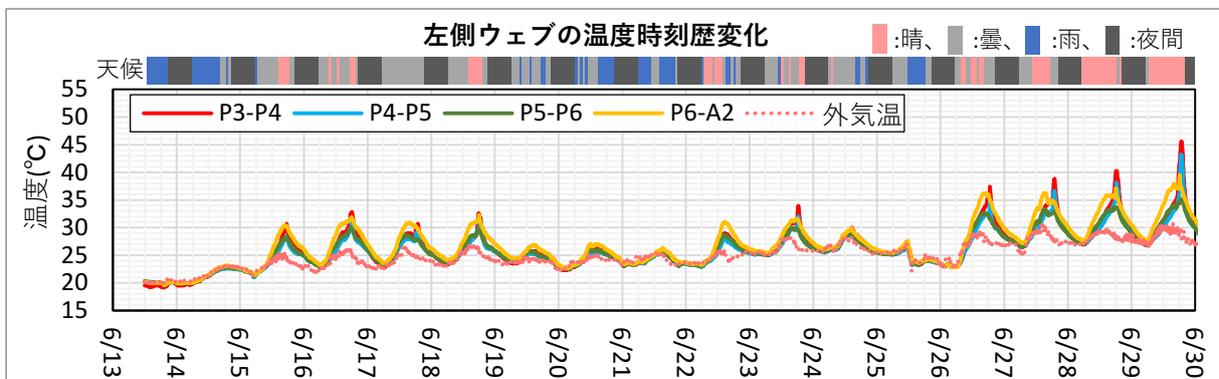


図 2.6-12 左側ウェブの部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13~30）

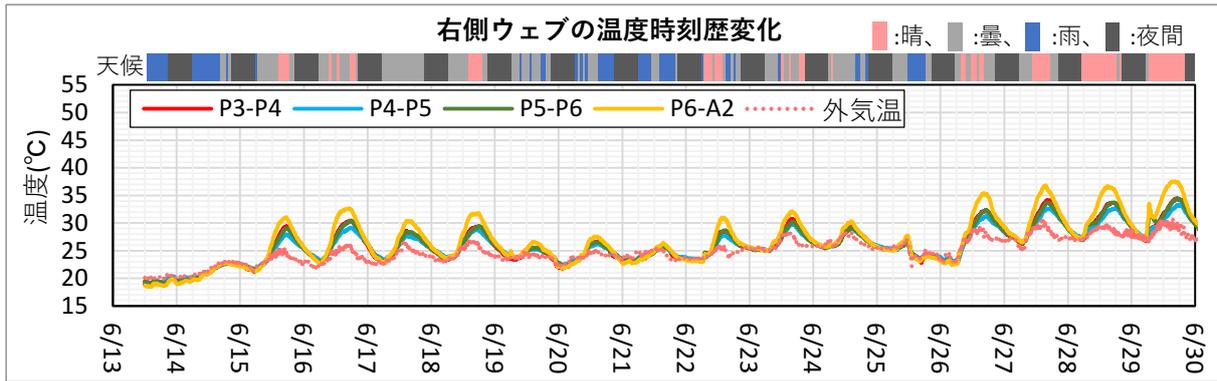


図 2.6-13 右側ウェブの部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

図 2.6-14 は、2022/6/16 の牛深ハイヤ大橋の各径間に対して太陽の位置を左右に分け径間毎に整理し示したものである。A1-P1 径間および P1-P2 径間は、日の出時点では太陽が橋梁の左側にあるが、その後右側に移動し、午後になって左側に戻り日の入りを迎える。その他の径間は、日の出時点では右側に太陽が位置し、午後になると左側へ移動しているが、そのタイミングは P5-P6 径間と P6-A2 径間以外は径間毎に差異が生じる。図 2.6-15 に示す牛深ハイヤ大橋を中心とした太陽位置図では牛深ハイヤ大橋と太陽の時間帯による位置関係が確認できる。太陽は牛深ハイヤ大橋の北東から上がり、南側を通り、北西に沈むという軌跡を示すが、牛深ハイヤ大橋は曲線橋であり、各径間の桁方向の方位が異なるため、径間毎に日射による影響が異なる。P5-P6 径間と P6-A2 径間はほぼ同じ方位を向いており、太陽の位置に差が生じていないと考えられる。温度の時刻歴変化は、牛深ハイヤ大橋の各径間で日射方向が異なり、太陽の位置に差異が生じるため、径間毎かつ部材毎に把握することが重要である。

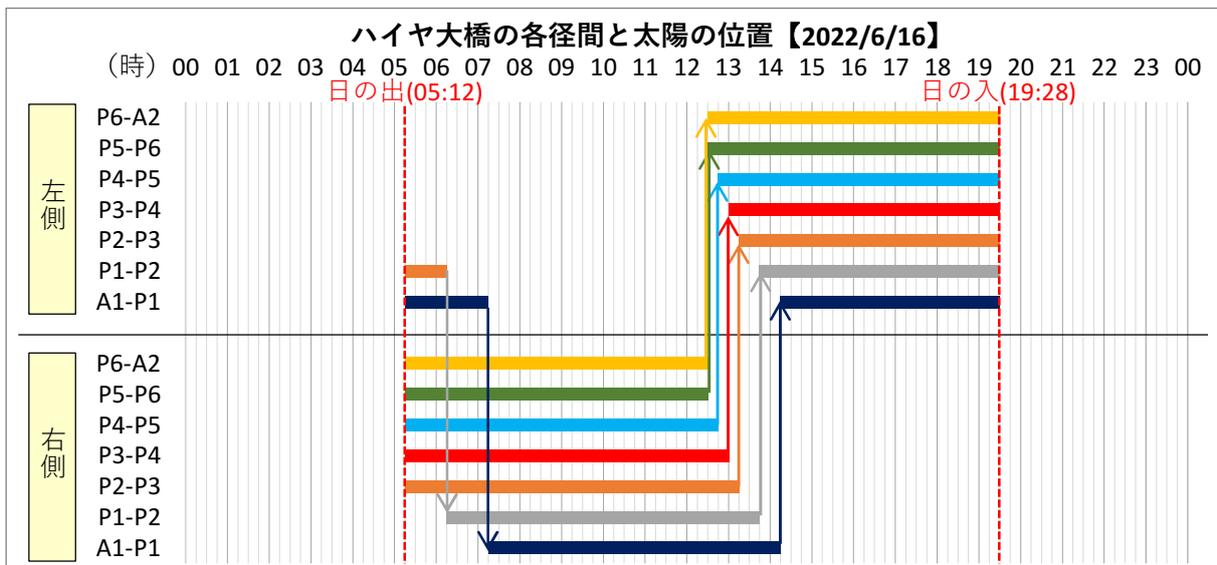


図 2.6-14 ハイヤ大橋の各径間と太陽の位置（2022/6/16）

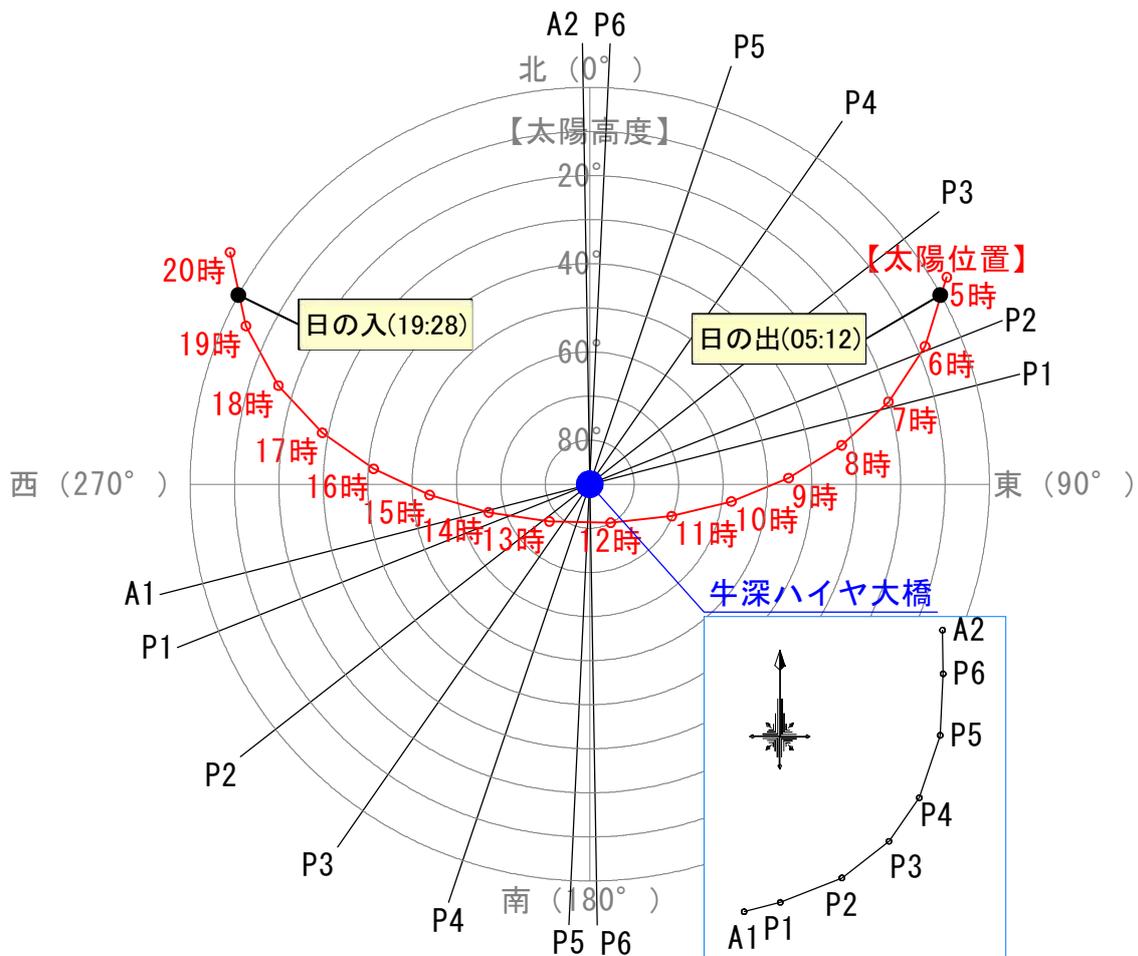


図 2.6-15 ハイヤ大橋を中心とした太陽位置図 (2022/6/16)

各径間の部材温度と外気温の関係を図 2.6-16 に示す。床版では、部材温度と外気温の関係はばらつきが大きく他の部材と比べて相関が弱い。床版は、他部材と比べて上面からの日射の影響を最も受ける部材であり、径間毎で日射の受け方に差がないためと考えられる。左側ウェブでは外気温が高い範囲で P3-P4 径間と P4-P5 径間にばらつきが生じる。これは、図 2.6-13 に示したように外気温の高い日のデータであり、晴れた日の西日の影響によるものと考えられる。P6-A2 径間は、下フランジ、左側ウェブおよび右側ウェブで他の径間と比べて部材温度が高い。これは、図 2.6-9 と同様の結果であり、図 2.6-16 は計測期間を通じた結果であることから、常にそのような状態であると考えられる。P6-A2 径間は地上部になるため日射の照り返しの影響によるものと考えられる。

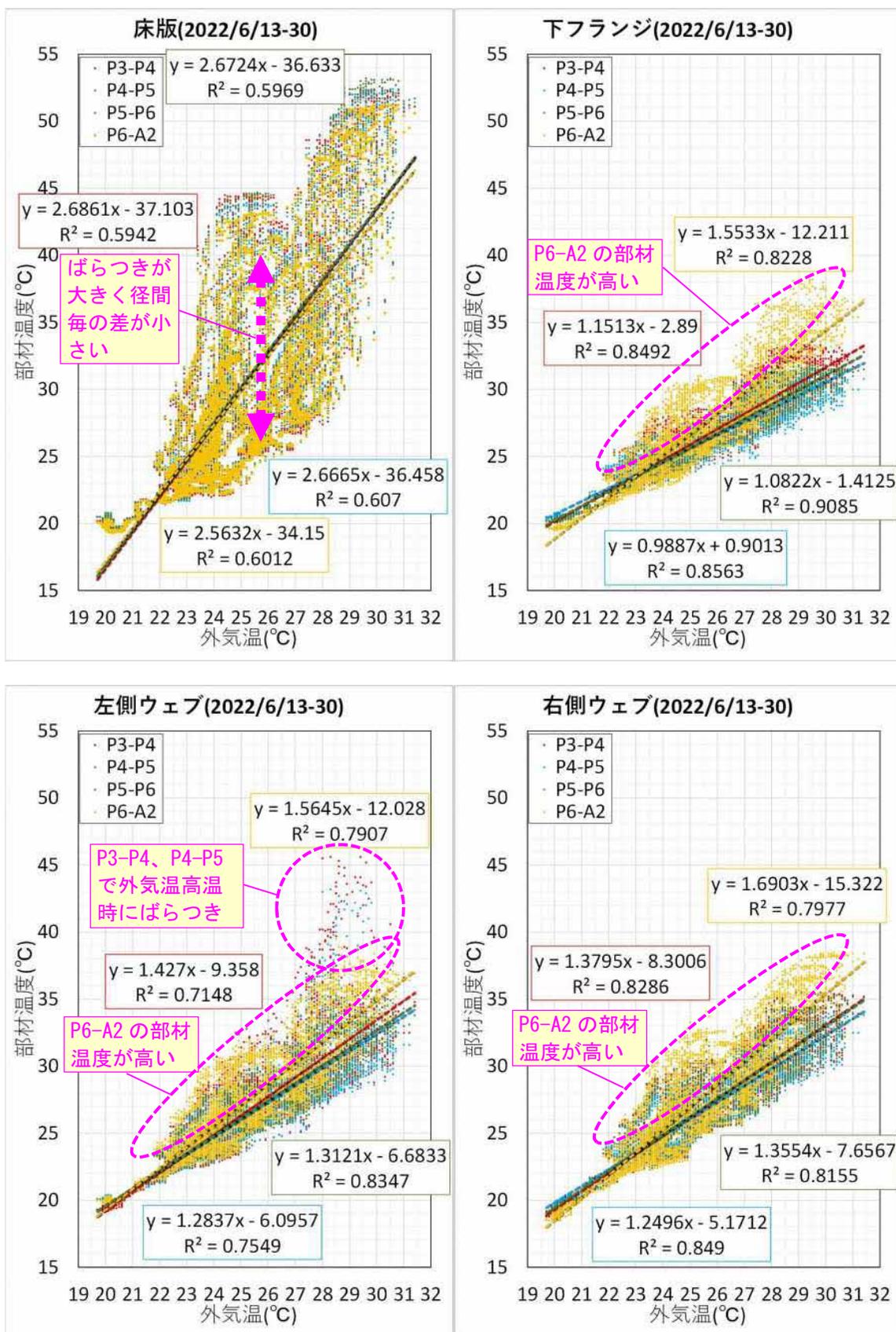


図 2.6-16 各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/13~30)

c) P3-P4 径間の温度時刻歴変化

① 各部材の温度時刻歴変化

計測期間（2022/6/13～30）における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-17 に示す。計測期間を通して、床版の温度が高く、午後後に左側ウェブの温度が上昇する傾向が確認できる。なお、6/14 は他の日で確認されたような床版の温度上昇が見られないが、これは天候によるものと考えられる。熱電対による部材温度調査結果では、床版の温度が非常に高く、下フランジと最大で 20℃ほどの温度差が生じる。左側ウェブでも最大で 13℃程度の温度差が生じる。1 日の中での部材の温度変化は、急激な温度上昇が確認される床版や左ウェブ以外の部材では、10℃程度である。

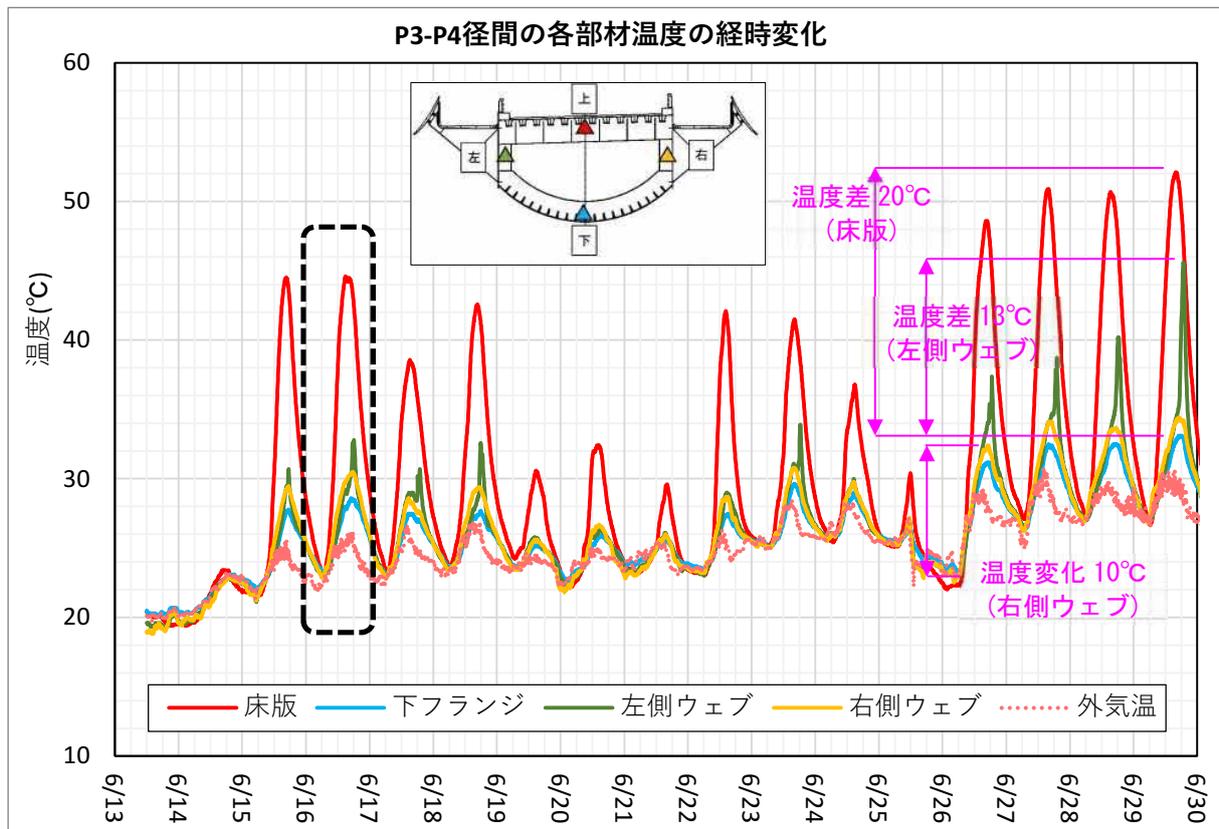


図 2.6-17 P3-P4 径間の各部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

② 1 日の中での各部材の温度時刻歴変化

1 日（2022/6/13）における、床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-18 に示す。図より、日の出（5:12）後の 7 時以降から各部材で徐々に温度上昇が見られ、部材温度のピークの時刻は部材毎に異なるが、日の入りを迎える前の 15 時から 18 時となっており、そこから徐々に温度が低下する。1 日をとおして、各部材の部材温度は外気温より高く、日中の日射の影響で温度が上昇した橋梁が日没後も外気温と比べて高い部材温度を保ったまま徐々に外気温に近づき、6 時から 7 時頃で各部材の部材温度と外気温は同程度となる。

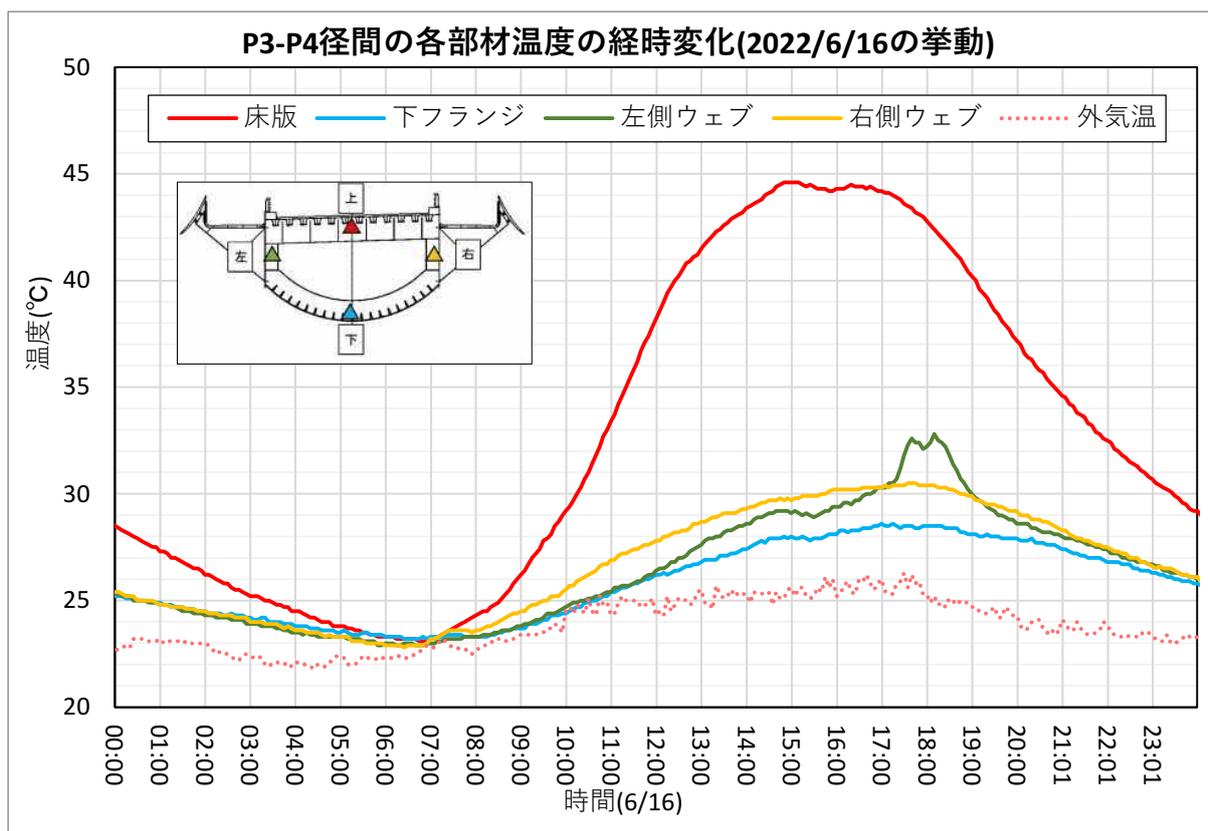


図 2.6-18 P3-P4 径間の各部材温度の 1 日の時刻歴変化（期間：2022/6/16）

各部材の最大温度および最低温度、それらの差（温度変化）を表 2.6-3 に示す。床版は日射の影響を最も受ける部材であり、他部材と比べても、1 日の中での温度変化が大きい。一方で、下フランジは直接太陽に照らされないため、日射の影響が小さく、温度変化も小さい。左右のウェブを比べると、最低温度は同程度であるが左側ウェブの方が右側ウェブと比べて最大温度が 2°C 程度高く、温度変化も 2°C 大きい。これは、太陽の上昇に伴い徐々に橋梁全体の温度が上昇していき、午後からは、左側が直接太陽に照らされるためであると考えられる。

表 2.6-3 P3-P4 径間の 1 日の各部材の最大・最低温度と温度変化（2022/6/16）

部材	床版	下フランジ	左側ウェブ	右側ウェブ
最大温度	44.6°C	28.6°C	32.8°C	30.5°C
[最大温度時間]	[14:50]	[17:00]	[18:10]	[17:35]
最低温度	23.1°C	23.2°C	22.9°C	22.8°C
[最低温度時間]	[6:45]	[6:25]	[5:50]	[6:25]
温度変化(最大-最小)	21.5°C	5.4°C	9.9°C	7.7°C

③ 1 日の中での各部材の温度差

図 2.6-19 は、対象径間の起点から終点の方向に断面をとり、その断面から見える 1 日（2022/6/13）の太陽の位置の変化を示したものである。P3-P4 径間では、日の出（5:12）時点で

は橋梁の右側に太陽が位置し、午後になって左側に移動し日の入り（19:28）を迎える。各部材の温度差は、**図 2.6-18** より、6 時頃ではほぼ 0℃であるが、太陽の上昇に伴い 7 時以降に床版と右側ウェブの温度が上昇し、他部材との温度差が生じる。

床版の温度上昇は他部材と比べて大きく、床版の温度がピークを迎える 15 時頃では、各部材との温度差は、下フランジで 18℃程度、左側ウェブで 16℃程度、右側ウェブで 15℃程度となる。温度差はそこから徐々に小さくなるが、日の入り（19:28）後も他部材との温度差を保つ。**図 2.6-20** は午前（5～12 時）、午後（12～19 時）、夜間（19～5 時）の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係を示したものであるが、床版は時間帯によらずばらつきが大きい。部材温度は時間帯によらず外気温より高いが、午後の傾きが大きく、日射の影響が大きい。また、午前と夜間では気温が低い時間帯では、外気温と部材温度は同程度となっているが、夜間の傾きが午前の傾きより大きいことから、日の入り後、日中に温められた桁が徐々に外気温に近づき、日の出を迎え太陽の上昇とともに徐々に部材温度が上がっていくと考えられる。

下フランジは、日射の影響が小さくばらつきが小さい。午前中は外気温と部材温度は同程度となるが、午後は部材温度が 1～2℃高く、その傾向は夜間まで続く。日射により温度が上昇した他の部材からの熱影響によるものと考えられ、日射が直接当たらない下フランジにおいても外気温以上となる。

右側ウェブは、**図 2.6-19** より、P3-P4 径間では太陽が右側から上昇するため、左側ウェブより 1℃ほど部材温度が高い。午後から夜間にかけては左側ウェブとの温度差は小さくなる。一方で、**図 2.6-18** より、左側ウェブの温度は 13 時以降も上昇し続け 17 時頃で左側ウェブの温度を逆転し、ピークとなる 18 時頃では、下フランジで 4℃程度、右側ウェブで 2℃程度の温度差が生じる。**図 2.6-20** においても、午後と夜間の外気温の高温時に部材温度が高くなっていることが確認できる。

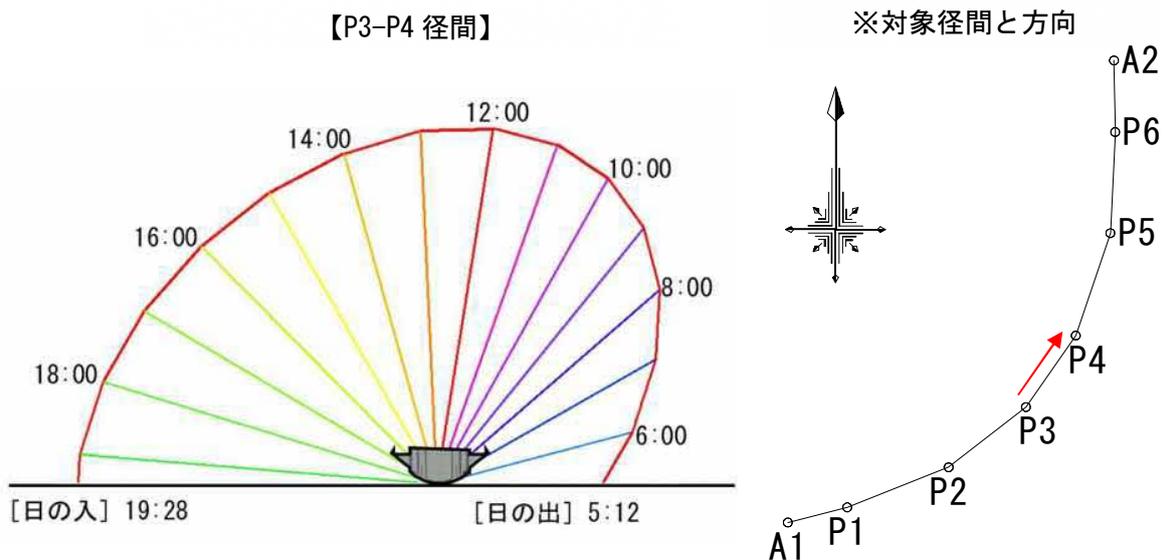


図 2.6-19 P3-P4 径間の 1 日の太陽位置の変化（2022/6/16）

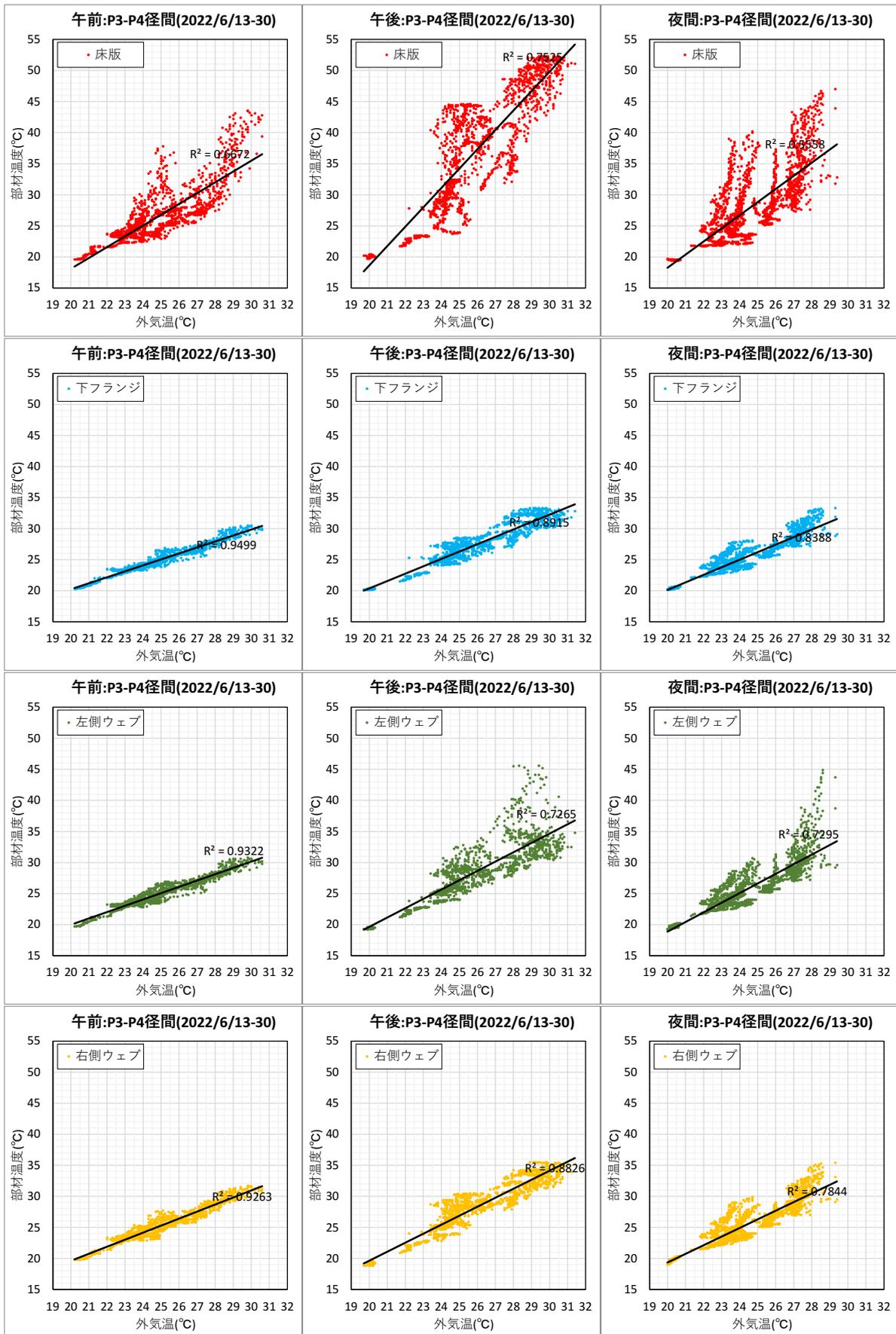


図 2.6-20 P3-P4 径間の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/16)

d) P4-P5 径間の温度時刻歴変化

① 各部材の温度時刻歴変化

計測期間（2022/6/13～30）における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-21 に示す。計測期間を通して、床版の温度が高く、午後には左側ウェブの温度が上昇する傾向が確認できる。なお、6/14 は他の日で確認されたような床版の温度上昇が見られないが、これは天候によるものと考えられる。熱電対による部材温度調査結果では、床版の温度が非常に高く、下フランジと最大で 20℃程度の温度差が生じる。左側ウェブでも最大で 12℃程度の温度差が生じる。1 日の中での部材の温度変化は、急激な温度上昇が確認される床版や左ウェブ以外の部材では、8℃程度である。これらの傾向は、概ね P3-P4 径間と同じであるが、左側ウェブで確認される温度差は P3-P4 径間より小さい。

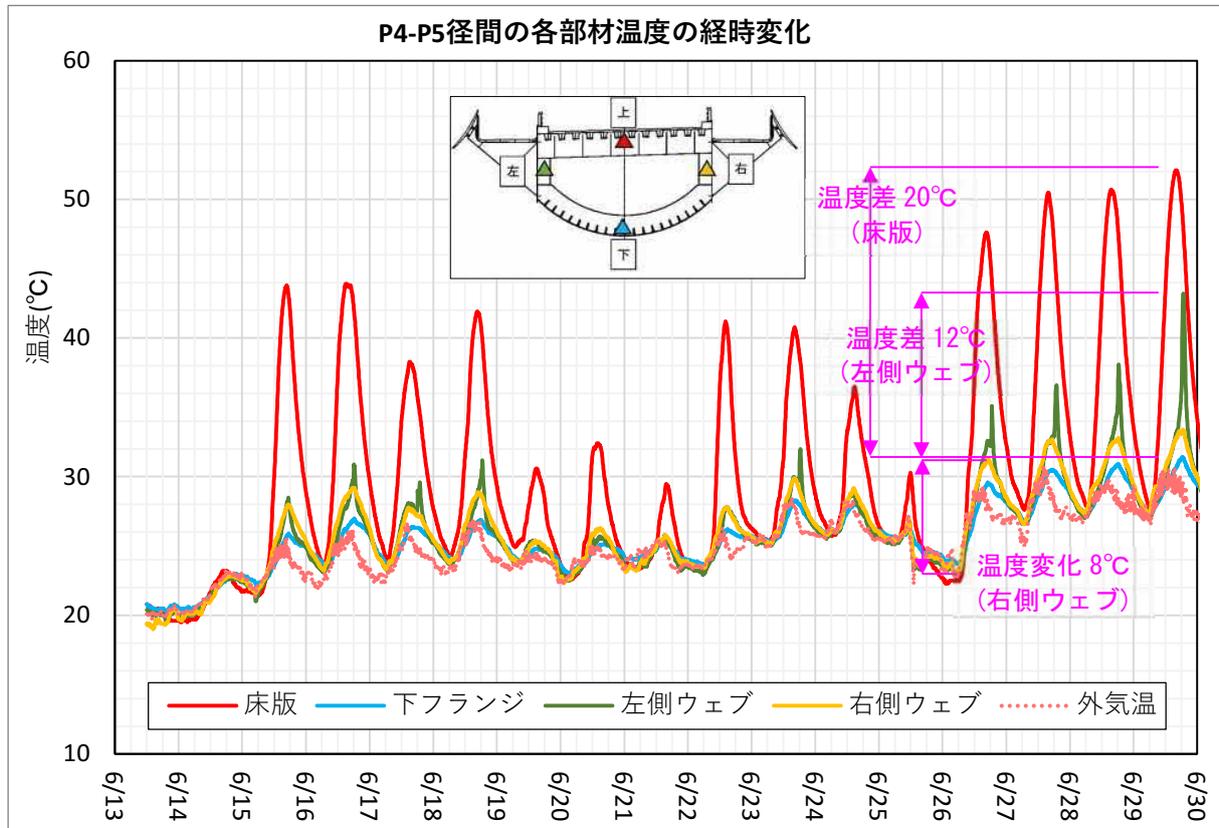


図 2.6-21 P4-P5 径間の各部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

② 1 日の中での各部材の温度時刻歴変化

1 日（2022/6/13）における、床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-22 に示す。図より、日の出（5:12）後の 7 時以降から各部材で徐々に温度上昇が見られ、部材温度のピークの時刻は部材毎に異なるが、日の入りを迎える前の 15 時から 18 時となっており、そこから徐々に温度が低下する。1 日をとおして、各部材の部材温度は外気温より高く、日中の日射の影響で温度が上昇した橋梁が日没後も外気温と比べて高い部材温度を保ったまま徐々に外気温に近づき、6 時から 7 時頃で各部材の部材温度と外気温は同程度となる。

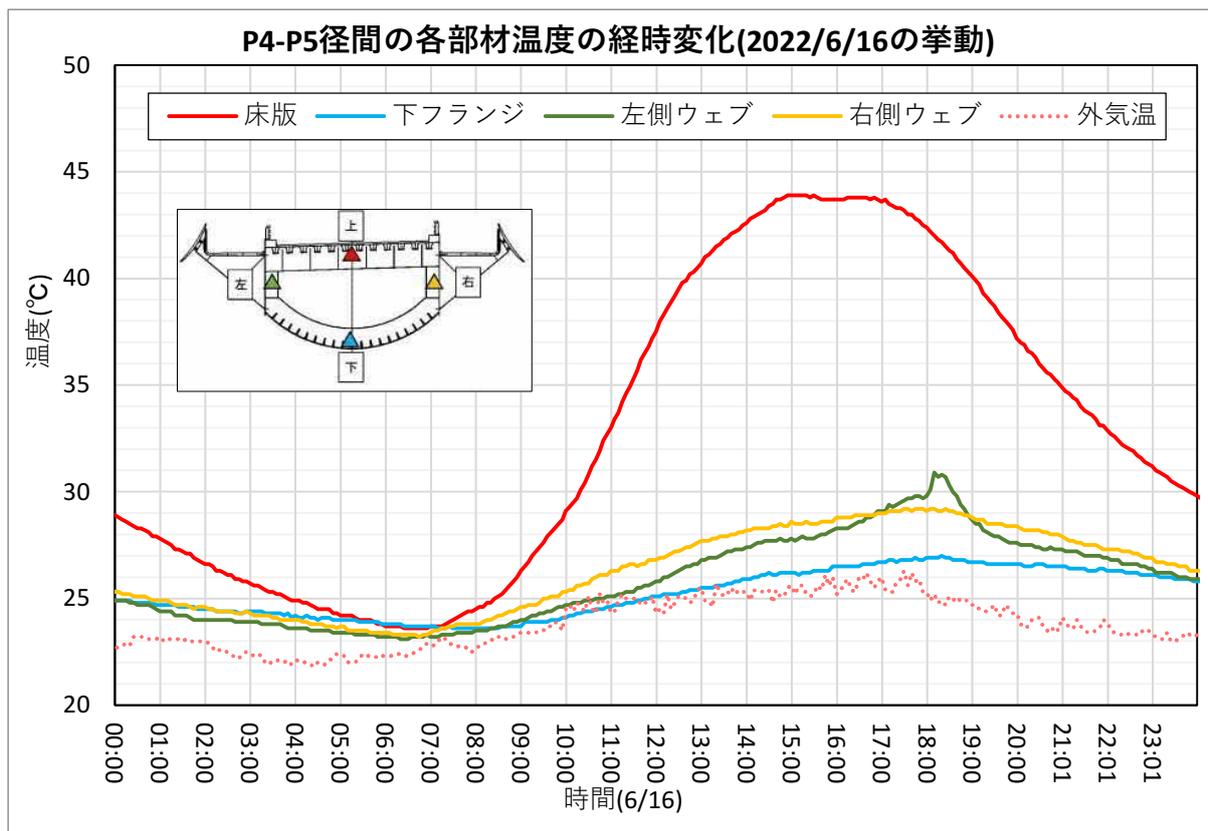


図 2.6-22 P4-P5 径間の各部材温度の 1 日の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/16)

各部材の最大温度および最低温度、それらの差（温度変化）を表 2.6-4 に示す。床版は日射の影響を最も受ける部材であり、他部材と比べても、1 日の中での温度変化が大きい。一方で、下フランジは直接太陽に照らされないため、日射の影響が小さく、温度変化も小さい。左右のウェブを比べると、最低温度は同程度であるが左側ウェブの方が右側ウェブと比べて最大温度が 2°C 程度高く、温度変化も 2°C 大きい。これは、太陽の上昇に伴い徐々に橋梁全体の温度が上昇していき、午後からは、左側が直接太陽に照らされるためであると考えられる。

表 2.6-4 P4-P5 径間の 1 日の各部材の最大・最低温度と温度変化 (2022/6/16)

部材	床版	下フランジ	左側ウェブ	右側ウェブ
最大温度	43.9°C	27.0°C	30.9°C	29.2°C
[最大温度時間]	[14:55]	[18:20]	[18:10]	[17:30]
最低温度	23.6°C	23.6°C	23.1°C	23.2°C
[最低温度時間]	[6:25]	[7:10]	[6:20]	[6:45]
温度変化(最大-最小)	20.3°C	3.4°C	7.8°C	6.0°C

③ 1 日の中での各部材の温度差

図 2.6-23 は、対象径間の起点から終点の方向に断面をとり、その断面から見える 1 日 (2022/6/13) の太陽の位置の変化を示したものである。P4-P5 径間では、日の出 (5:12) 時点で

は橋梁の右側に太陽が位置し、午後になって左側に移動し日の入り（19:28）を迎える。各部材の温度差は、**図 2.6-22** より、6 時頃ではほぼ 0℃であるが、太陽の上昇に伴い 7 時以降に床版と右側ウェブの温度が上昇し、他部材との温度差が生じる。

床版の温度上昇は他部材と比べて大きく、床版の温度がピークを迎える 15 時頃では、各部材との温度差は、下フランジで 18℃程度、左側ウェブで 16℃程度、右側ウェブで 15℃程度となる。温度差はそこから徐々に小さくなるが、日の入り（19:28）後も他部材との温度差を保つ。**図 2.6-24** は午前（5～12 時）、午後（12～19 時）、夜間（19～5 時）の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係を示したものであるが、床版は時間帯によらずばらつきが大きい。部材温度は時間帯によらず外気温より高いが、午後の傾きが大きく、日射の影響が大きい。また、午前と夜間では気温が低い時間帯では、外気温と部材温度は同程度となっているが、夜間の傾きが午前の傾きより大きいことから、日の入り後、日中に温められた桁が徐々に外気温に近づき、日の出を迎え太陽が上昇するとともに徐々に部材温度が上がっていくと考えられる。

下フランジは、日射の影響が小さくばらつきが小さい。午前中は外気温と部材温度は同程度となるが、午後は部材温度が 1～2℃高く、その傾向は夜間まで続く。日射により温度が上昇した他の部材からの熱影響によるものと考えられ、日射が直接当たらない下フランジにおいても外気温以上となる。

右側ウェブは、**図 2.6-23** より、P4-P5 径間では太陽が右側から上昇するため、左側ウェブより 1℃ほど部材温度が高い。午後から夜間にかけては左側ウェブとの温度差は小さくなる。一方で、**図 2.6-22** より、左側ウェブの温度は 13 時以降も上昇し続け 17 時頃で左側ウェブの温度を逆転し、ピークとなる 18 時頃では、下フランジで 4℃程度、右側ウェブで 2℃程度の温度差が生じる。**図 2.6-24** においても、午後と夜間の外気温の高温時に部材温度が高くなっていることが確認できる。

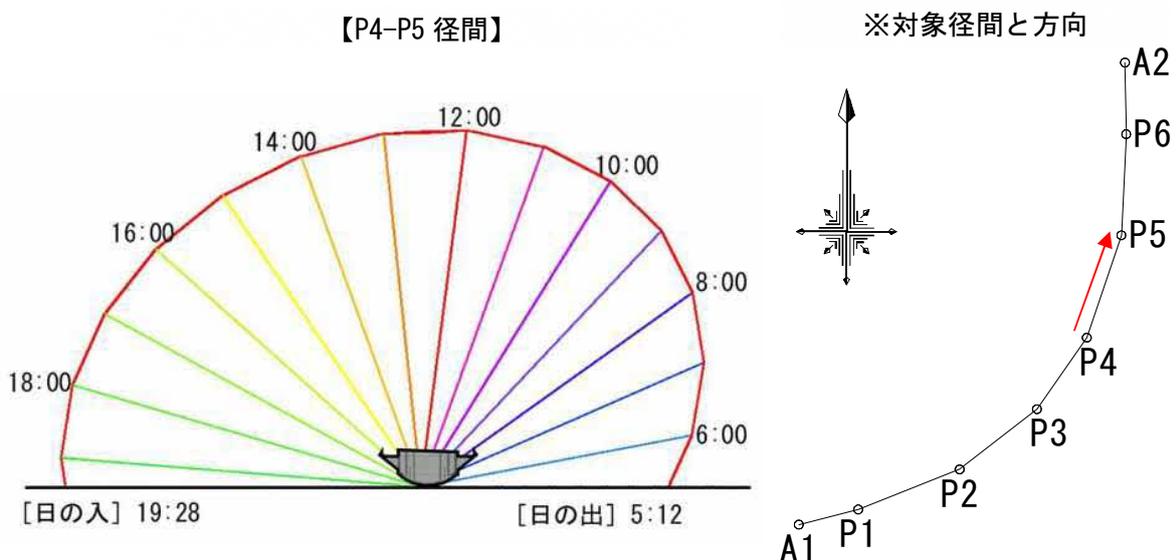


図 2.6-23 P4-P5 径間の 1 日の太陽位置の変化（2022/6/16）

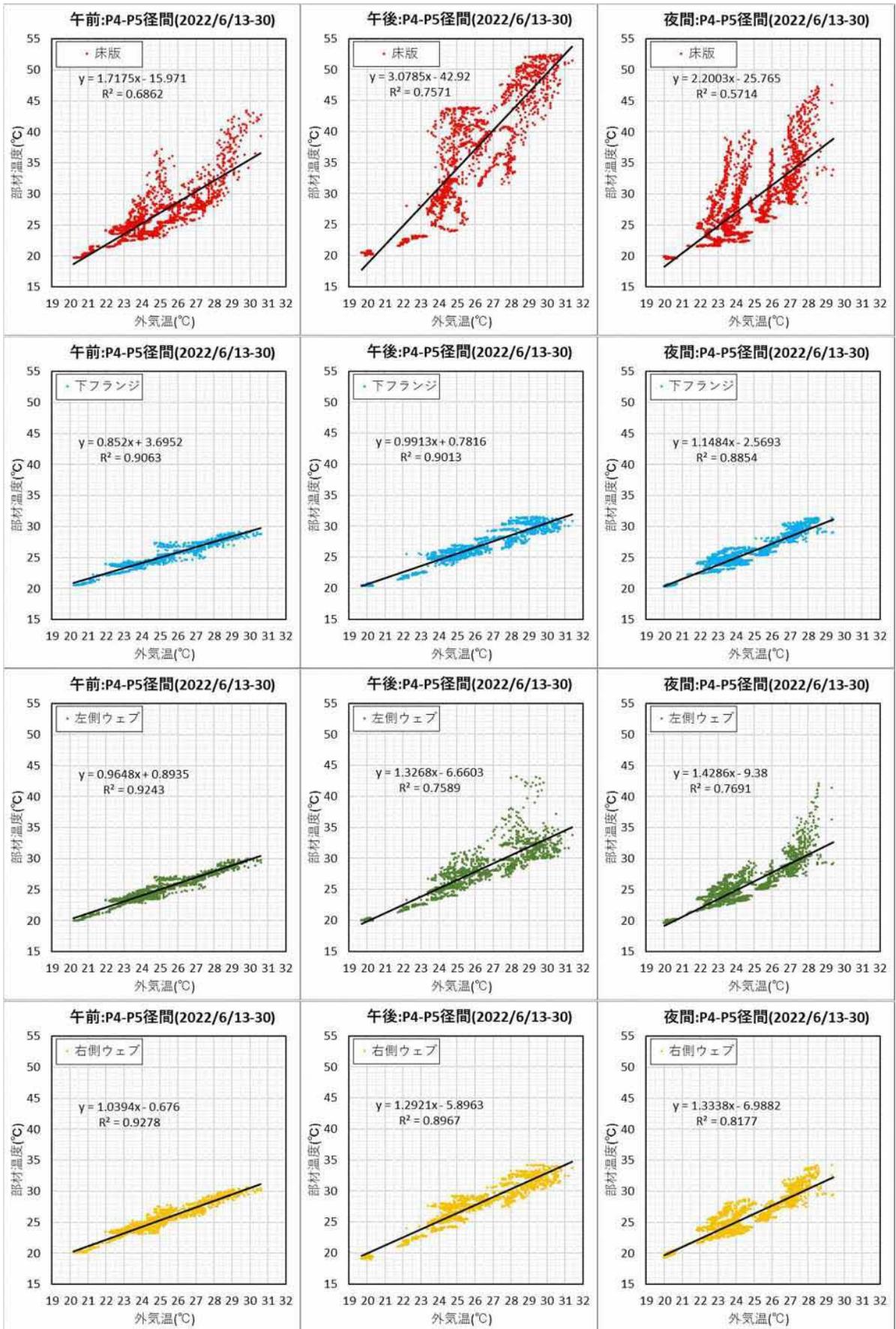


図 2.6-24 P4-P5 径間の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/16)

e) P5-P6 径間の温度時刻歴変化

① 各部材の温度時刻歴変化

計測期間（2022/6/13～30）における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-25 に示す。計測期間を通して、床版の温度が高いことが確認できる。P3-P4 径間・P4-P5 径間では、午後に左側ウェブの温度上昇が確認されたが P5-P6 径間では確認されない。なお、6/14 は他の日にちで確認されたような床版の温度上昇が見られないが、これは天候によるものと考えられる。熱電対による部材温度調査結果では、床版の温度が非常に高く、下フランジと最大で 18℃程度の温度差が生じる。1 日の中での部材の温度変化は、急激な温度上昇が確認される床版以外の部材では、10℃程度である。

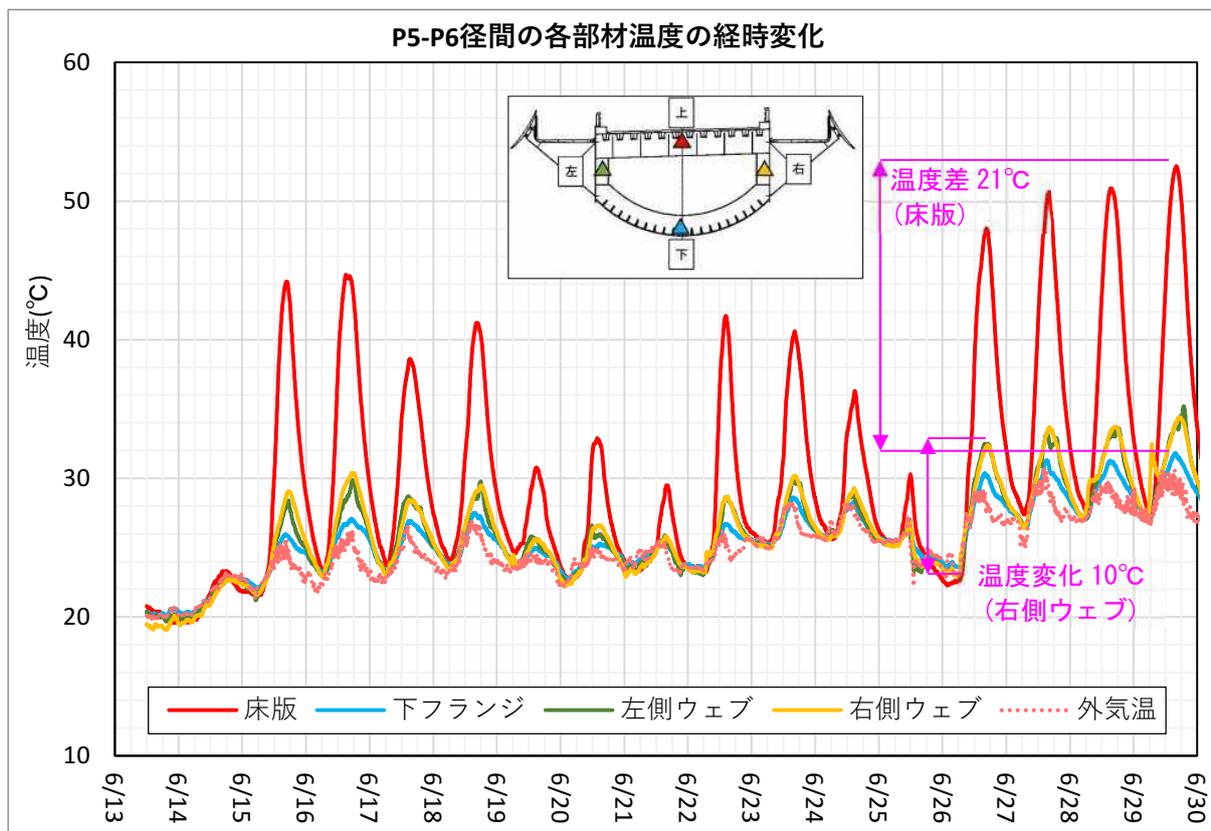


図 2.6-25 P5-P6 径間の各部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

② 1 日の中での各部材の温度時刻歴変化

1 日（2022/6/13）における、床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-26 に示す。図より、日の出（5:12）後の 7 時以降から各部材で徐々に温度上昇が見られ、部材温度のピークの時刻は部材毎に異なるが、日の入りを迎える前の 15 時から 18 時となっており、そこから徐々に温度が低下する。1 日をとおして、各部材の部材温度は外気温より高く、日中の日射の影響で温度が上昇した橋梁が日没後も外気温と比べて高い部材温度を保ったまま徐々に外気温に近づき、6 時から 7 時頃で各部材の部材温度と外気温は同程度となる。

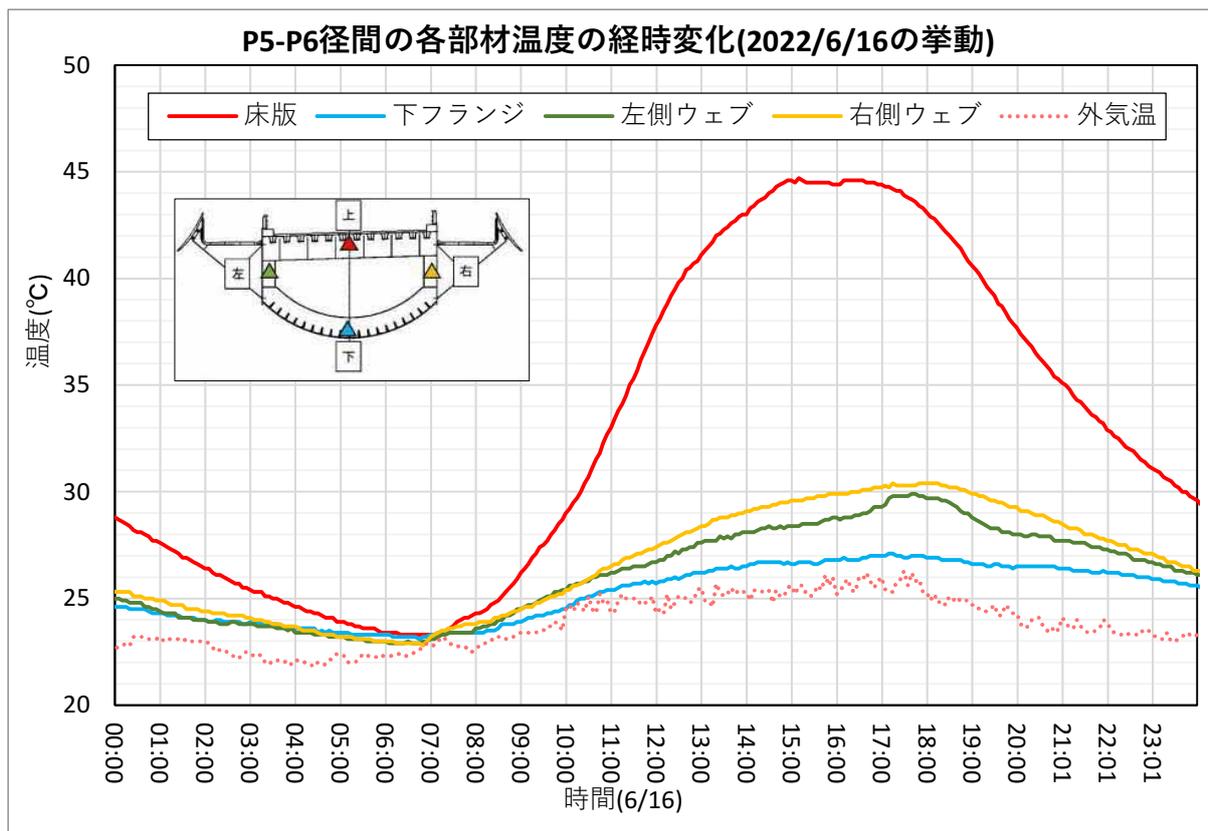


図 2.6-26 P5-P6 径間の各部材温度の 1 日の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/16)

各部材の最大温度および最低温度、それらの差（温度変化）を表 2.6-5 に示す。床版は日射の影響を最も受ける部材であり、他部材と比べても、1 日の中での温度変化が大きい。一方で、下フランジは直接太陽に照らされないため、日射の影響が小さく、温度変化も小さい。左右のウェブを比べると、最低温度は同程度であるが左側ウェブの方が右側ウェブと比べて最大温度が 0.5°C 程度高いが P3-P4 径間・P4-P5 径間より差は小さい。

表 2.6-5 P5-P6 径間の 1 日の各部材の最大・最低温度と温度変化 (2022/6/16)

部材	床版	下フランジ	左側ウェブ	右側ウェブ
最大温度	44.7°C	27.1°C	29.9°C	30.4°C
[最大温度時間]	[15:10]	[17:10]	[17:40]	[17:15]
最低温度	23.3°C	23.1°C	22.9°C	22.8°C
[最低温度時間]	[6:20]	[6:45]	[6:05]	[6:50]
温度変化(最大-最小)	21.4°C	4.0°C	7.0°C	7.6°C

③ 1 日の中での各部材の温度差

図 2.6-27 は、対象径間の起点から終点の方向に断面をとり、その断面から見える 1 日 (2022/6/13) の太陽の位置の変化を示したものである。P5-P6 径間では、日の出 (5:12) 時点では橋梁の右側に太陽が位置し、午後になって左側に移動し日の入り (19:28) を迎える。各部材

の温度差は、図 2.6-26 より、6 時頃ではほぼ 0℃であるが、太陽の上昇に伴い 7 時以降に床版と右側ウェブの温度が上昇し、他部材との温度差が生じる。

床版の温度上昇は他部材と比べて大きく、床版の温度がピークを迎える 15 時頃では、各部材との温度差は、下フランジで 18℃程度、左側ウェブで 16℃程度、右側ウェブで 15℃程度となる。温度差はそこから徐々に小さくなるが、日の入り (19:28) 後も他部材との温度差を保つ。図 2.6-28 は午前 (5~12 時)、午後 (12~19 時)、夜間 (19~5 時) の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係を示したものであるが、床版は時間帯によらずばらつきが大きい。部材温度は時間帯によらず外気温より高いが、午後の傾きが大きく、日射の影響が大きい。また、午前と夜間では気温が低い時間帯では、外気温と部材温度は同程度となっているが、夜間の傾きが午前の傾きより大きいことから、日の入り後、日中に温められた桁が徐々に外気温に近づき、日の出を迎え太陽の上昇とともに徐々に部材温度が上がっていくと考えられる。

下フランジは、日射の影響が小さくばらつきが小さい。午前中は外気温と部材温度は同程度となるが、午後は部材温度が 1~2℃高く、その傾向は夜間まで続く。日射により温度が上昇した他の部材からの熱影響によるものと考えられ、日射が直接当たらない下フランジにおいても外気温以上となる。

右側ウェブは、図 2.6-27 より、P5-P6 径間では太陽が右側から上昇するが、P3-P4 径間・P4-P5 径間とは異なり、左側ウェブとの差は 7 時以降に確認できず、11 時以降に 1℃程度の差が生じる。また、17 時から 18 時頃での左右ウェブの温度差の逆転は生じない。

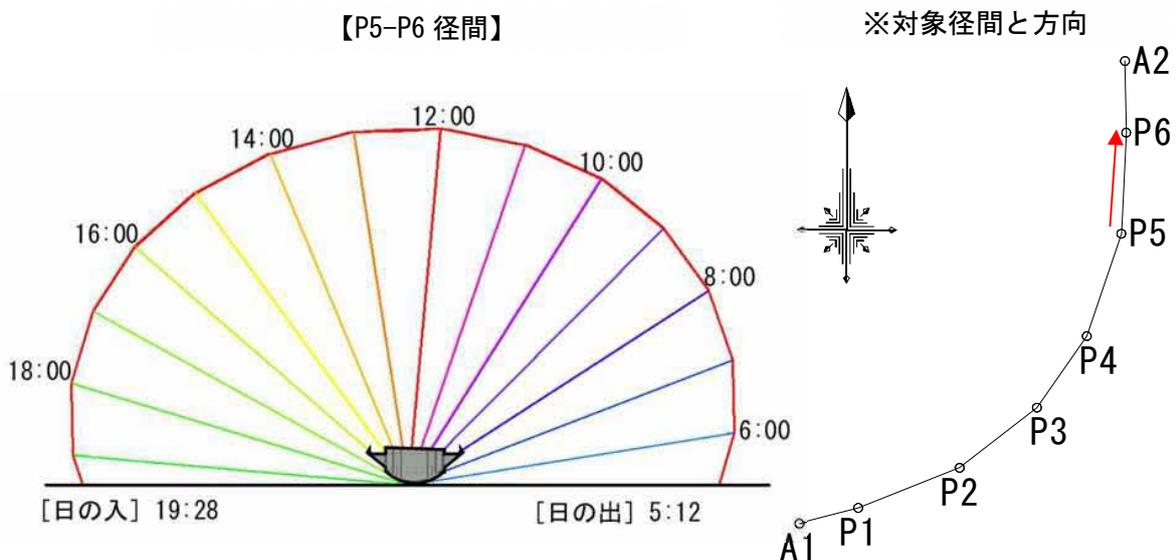


図 2.6-27 P5-P6 径間の 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

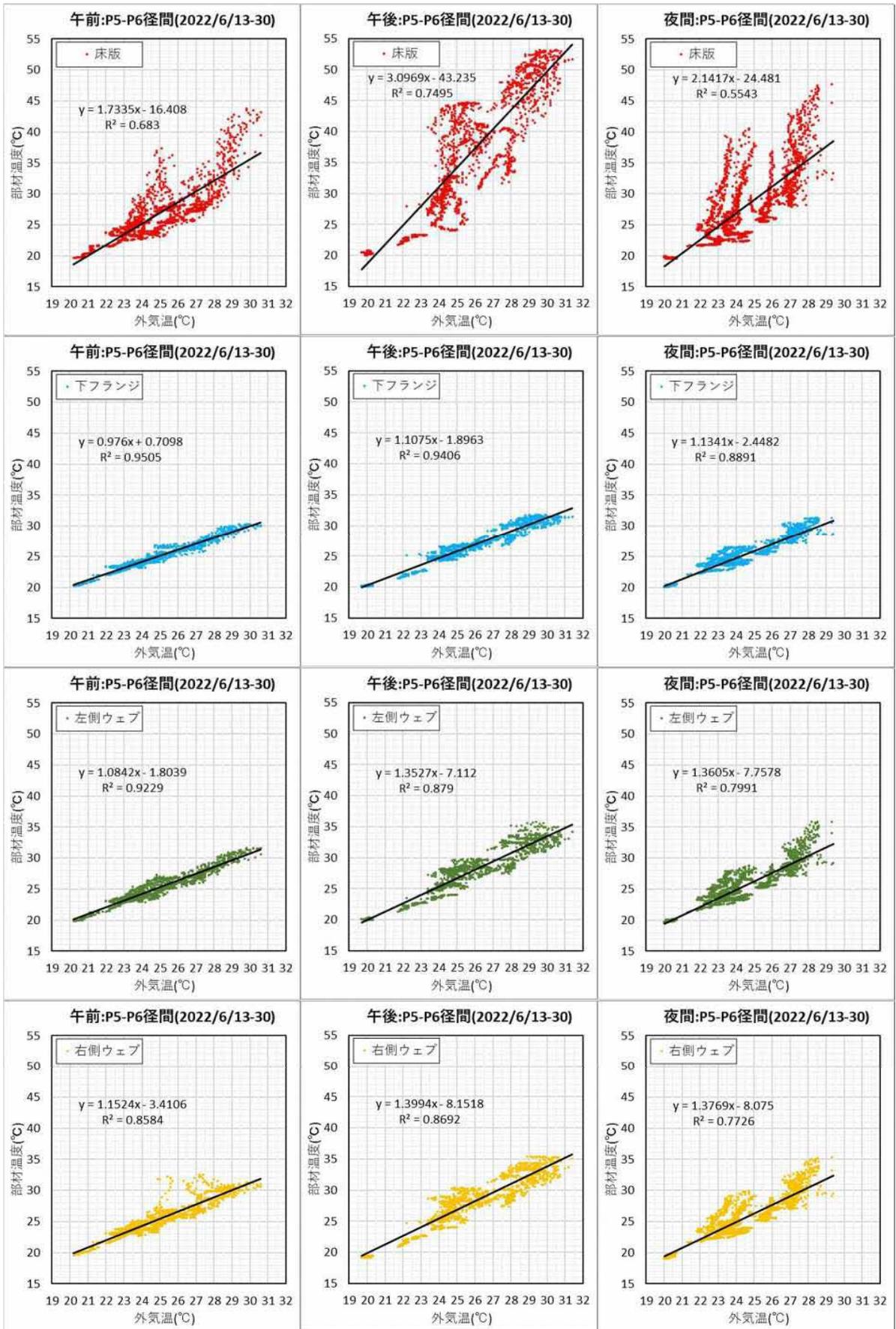


図 2.6-28 P5-P6 径間の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/16)

f) P6-A2 径間の温度時刻歴変化

① 各部材の温度時刻歴変化

計測期間（2022/6/13～30）における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-29 に示す。計測期間を通して、床版の温度が高いことが確認できる。P3-P4 径間・P4-P5 径間では、午後に左側ウェブの温度上昇が確認されたが P6-A2 径間では P5-P6 径間と同様に確認されない。なお、6/14 は他の日で確認されたような床版の温度上昇が見られないが、これは天候によるものと考えられる。熱電対による部材温度調査結果では、床版の温度が非常に高く、下フランジと最大で 13℃程度の温度差が生じる。1 日の中での部材の温度変化は、急激な温度上昇が確認される床版以外の部材では、12℃程度である。

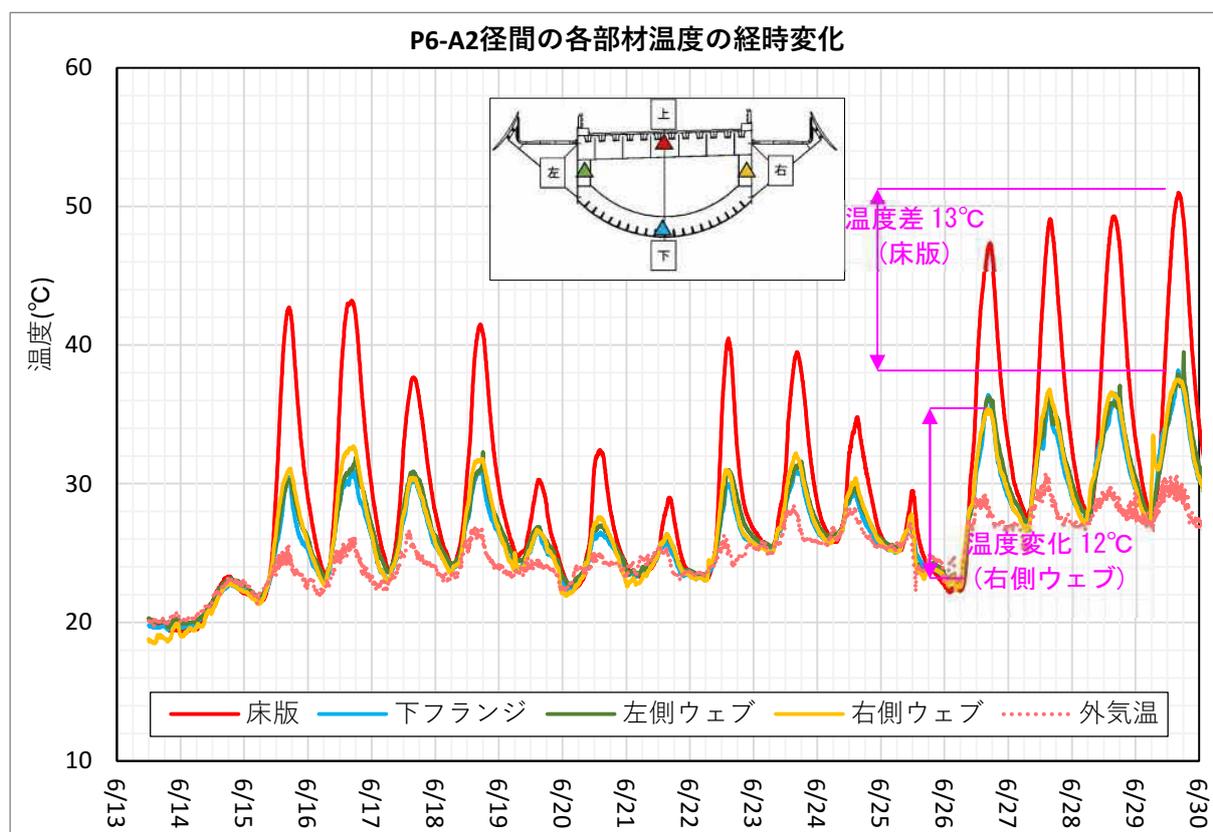


図 2.6-29 P6-A2 径間の各部材温度の時刻歴変化（期間：2022/6/13～30）

② 1 日の中での各部材の温度時刻歴変化

1 日（2022/6/13）における、床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの熱電対で計測した部材温度の時刻歴変化を図 2.6-30 に示す。図より、日の出（5:12）後の 7 時以降から各部材で徐々に温度上昇が見られ、部材温度のピークの時刻は部材毎に異なるが、日の入りを迎える前の 15 時から 18 時となっており、そこから徐々に温度が低下する。1 日をとおして、各部材の部材温度は外気温より高く、日中の日射の影響で温度が上昇した橋梁が日没後も外気温と比べて高い部材温度を保ったまま徐々に外気温に近づき、6 時から 7 時頃で各部材の部材温度と外気温は同程度となる。

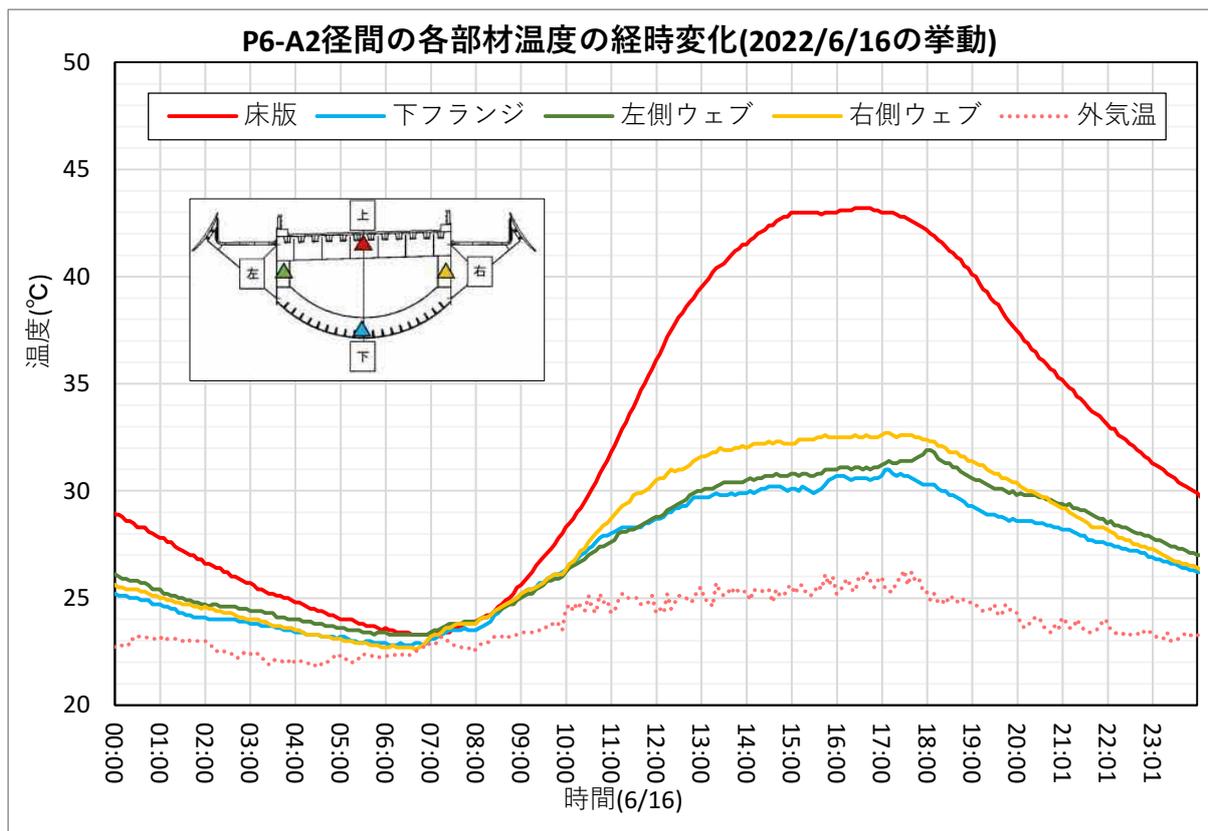


図 2.6-30 P6-A2 径間の各部材温度の 1 日の時刻歴変化 (期間 : 2022/6/16)

各部材の最大温度および最低温度、それらの差（温度変化）を表 2.6-6 に示す。床版は日射の影響を最も受ける部材であり、他部材と比べても、1 日の中での温度変化が大きい。一方で、下フランジは直接太陽に照らされないため、日射の影響が小さく、温度変化も小さい。左右のウェブを比べると、最低温度は同程度であるが左側ウェブの方が右側ウェブと比べて最大温度が 0.8°C 程度高いが P3-P4 径間・P4-P5 径間より差は小さい。

表 2.6-6 P6-A2 径間の 1 日の各部材の最大・最低温度と温度変化 (2022/6/16)

部材	床版	下フランジ	左側ウェブ	右側ウェブ
最大温度	43.2°C	31.0°C	31.9°C	32.7°C
[最大温度時間]	[16:25]	[17:05]	[18:00]	[17:05]
最低温度	23.3°C	22.8°C	23.3°C	22.6°C
[最低温度時間]	[6:35]	[6:05]	[5:45]	[6:40]
温度変化(最大-最小)	19.9°C	8.2°C	8.6°C	10.1°C

③ 1 日の中での各部材の温度差

図 2.6-31 は、対象径間の起点から終点の方向に断面をとり、その断面から見える 1 日 (2022/6/13) の太陽の位置の変化を示したものである。P5-P6 径間では、日の出 (5:12) 時点では橋梁の右側に太陽が位置し、午後になって左側に移動し日の入り (19:28) を迎える。各部材

の温度差は、**図 2.6-30** より、6 時頃ではほぼ 0℃であるが、太陽の上昇に伴い 7 時以降に床版と右側ウェブの温度が上昇し、他部材との温度差が生じる。

床版の温度上昇は他部材と比べて大きく、床版の温度がピークを迎える 15 時頃では、各部材との温度差は、下フランジで 13℃程度、左側ウェブで 12℃程度、右側ウェブで 11℃程度となる。温度差はそこから徐々に小さくなるが、日の入り (19:28) 後も他部材との温度差を保つ。**図 2.6-32** は午前 (5~12 時)、午後 (12~19 時)、夜間 (19~5 時) の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係を示したものであるが、床版は時間帯によらずばらつきが大きい。部材温度は時間帯によらず外気温より高いが、午後の傾きが大きく、日射の影響が大きい。また、午前と夜間では気温が低い時間帯では、外気温と部材温度は同程度となっているが、夜間の傾きが午前の傾きより大きいことから、日の入り後、日中に温められた桁が徐々に外気温に近づき、日の出を迎え太陽の上昇とともに徐々に部材温度が上がっていくと考えられる。

下フランジは、他径間と比べてばらつきが確認できる。午前中は外気温と部材温度は同程度となるが、午後は部材温度が 1~2℃高く、その傾向は夜間まで続く。日射により温度が上昇した他の部材からの熱影響によるものと考えられ、日射が直接当たらない下フランジにおいても外気温以上となる。

右側ウェブは、**図 2.6-31** より P6-A2 径間では太陽が右側から上昇するが、P3-P4 径間・P4-P5 径間とは異なり、左側ウェブとの差は 7 時以降に確認できず、11 時以降に 1℃程度の差が生じる。また、17 時から 18 時頃での左右ウェブの温度差の逆転は生じない。

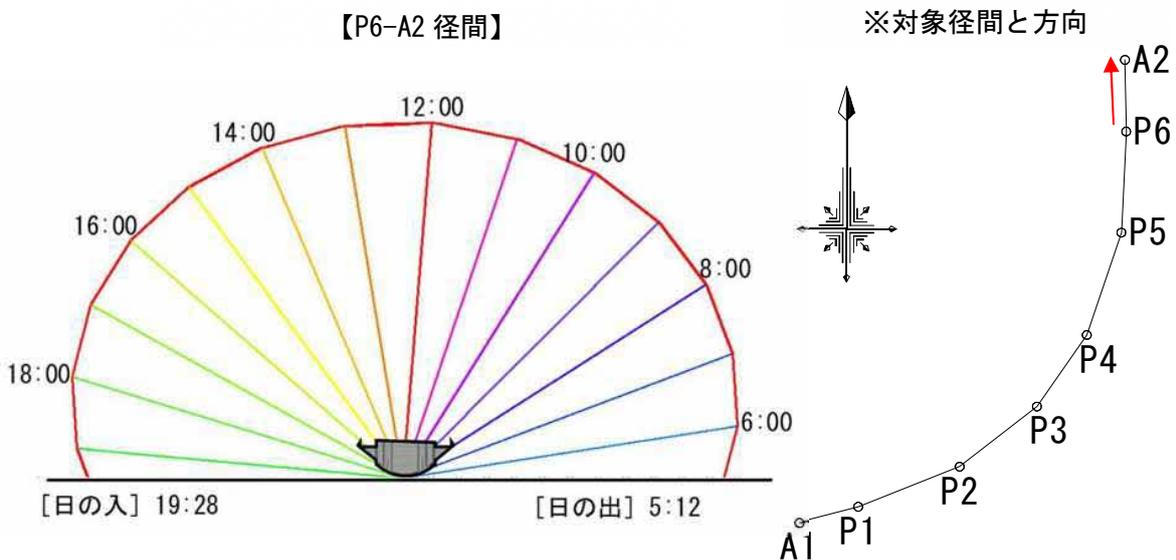


図 2.6-31 P6-A2 径間での 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

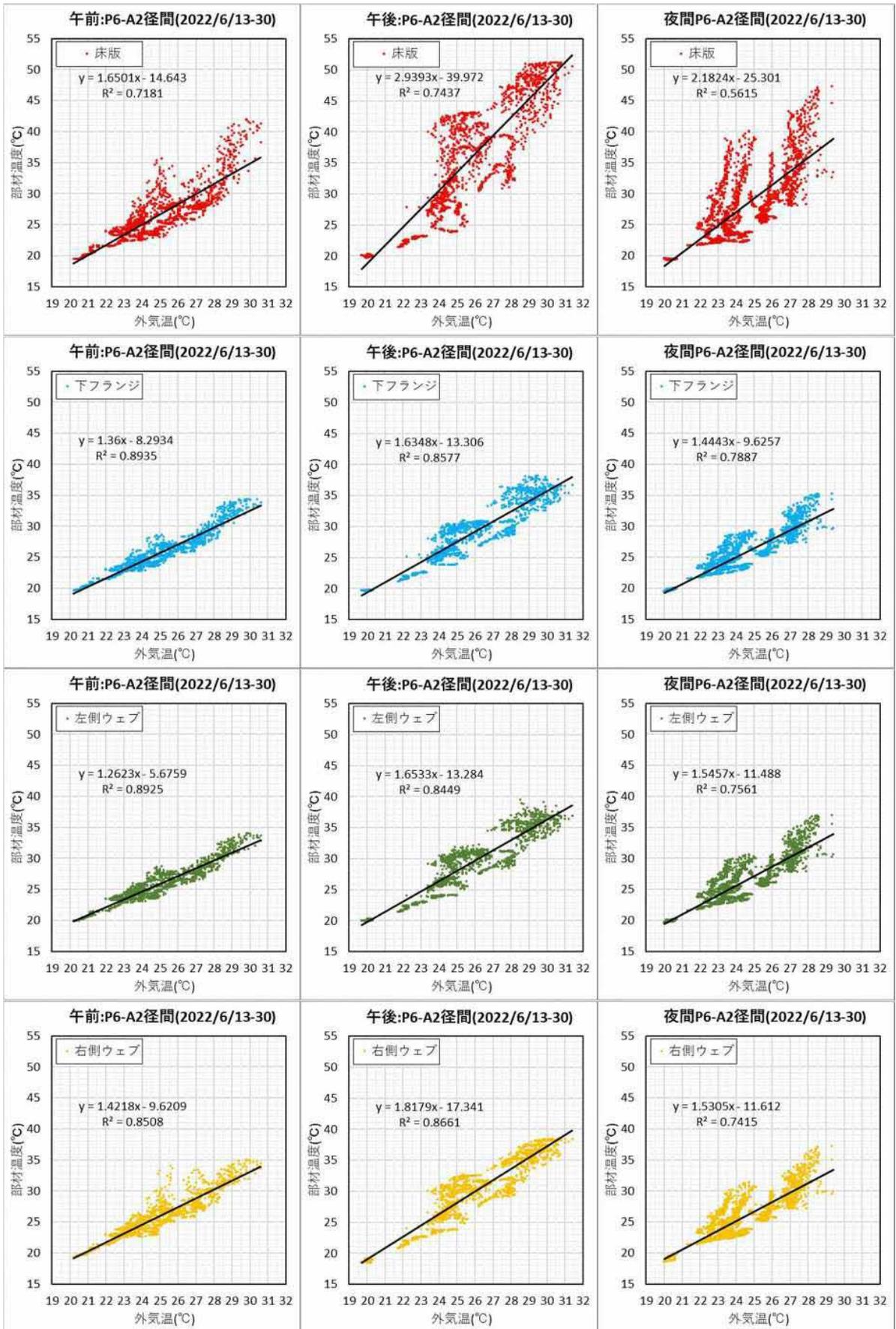


図 2.6-32 P6-A2 径間の時間帯毎の各部材温度と外気温の関係 (期間 : 2022/6/16)

g) 【参考】A1-P3 径間での 1 日の太陽位置の変化

A1-P3 径間では温度計測を実施していない。そのため、参考として、2022/6/16 の 1 日の太陽位置の変化を図 2.6-33、図 2.6-34、図 2.6-35 に示す。

P2-P3 径間では、P3-A2 間の各径間と同様に、日の出時点では太陽が橋梁の右側にあり、午後になって左側に移動し日の入りを迎えるが、A1-P1 径間および P1-P2 径間では、太陽が左側から上昇し、一旦右側に移動した後、午後に左側に移動し日の入りを迎える。8 時頃で橋梁の右側に移動するが太陽はほぼ直上に位置しており、ウェブが直接太陽に照らされる時間は他の径間と比べて短いと考えられる。

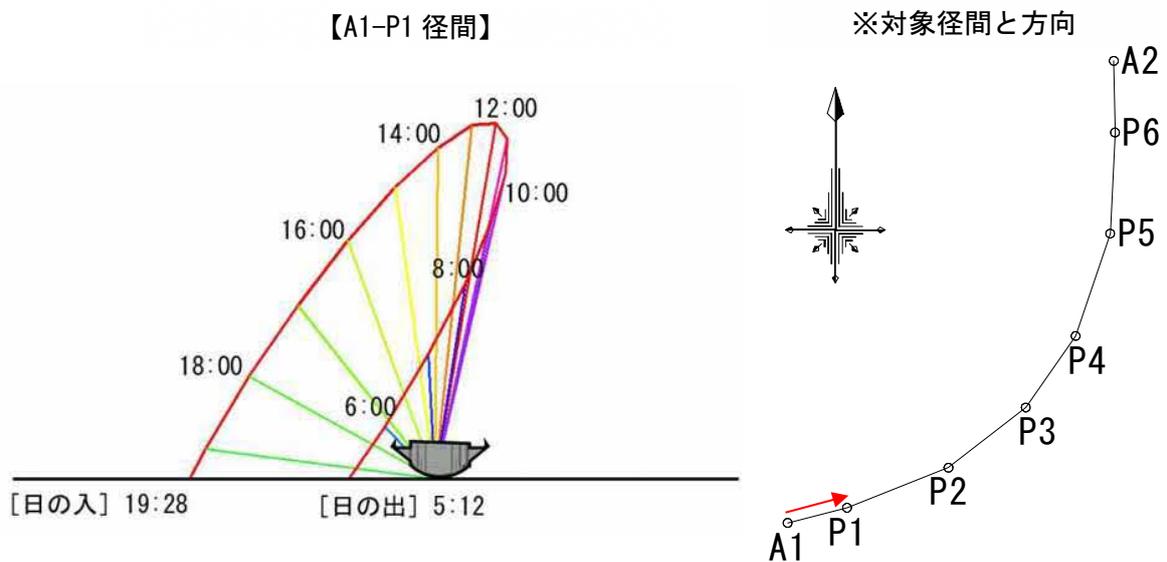


図 2.6-33 A1-P1 径間の 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

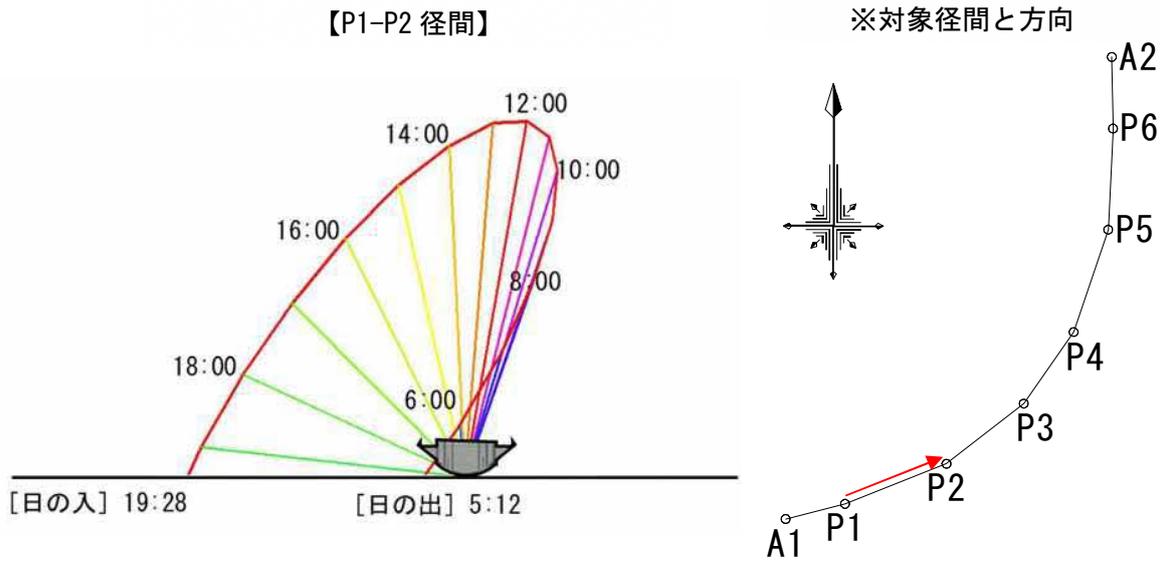


図 2.6-34 P1-P2 径間の 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

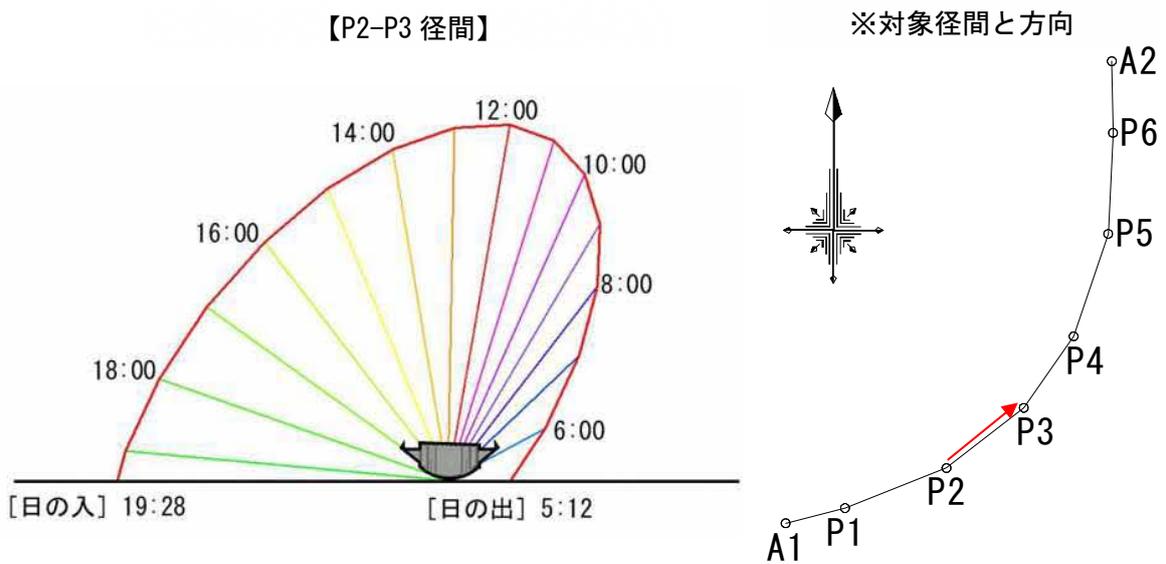


図 2.6-35 P2-P3 径間の 1 日の太陽位置の変化 (2022/6/16)

3) 支承移動量調査

図 2.6-36 に橋脚毎の左右支承変位の経時変化を示す。温度変化に伴い支承変位が生じており、変位量は、P4 支承、P5 支承、P6 支承、A2 支承の順に変位差が生じる。また、各橋脚で左右支承の変位に差が生じている。変位量は日により異なるが、これらの挙動は日による違いはみられず、計測期間では毎日同様の挙動を示す。応急対策していない P4 橋脚の左右支承の変位差を図 2.6-37 に示す。計測期間で最大 1.7mm の差が生じており、外気温の変化に伴い変位差も変化する。

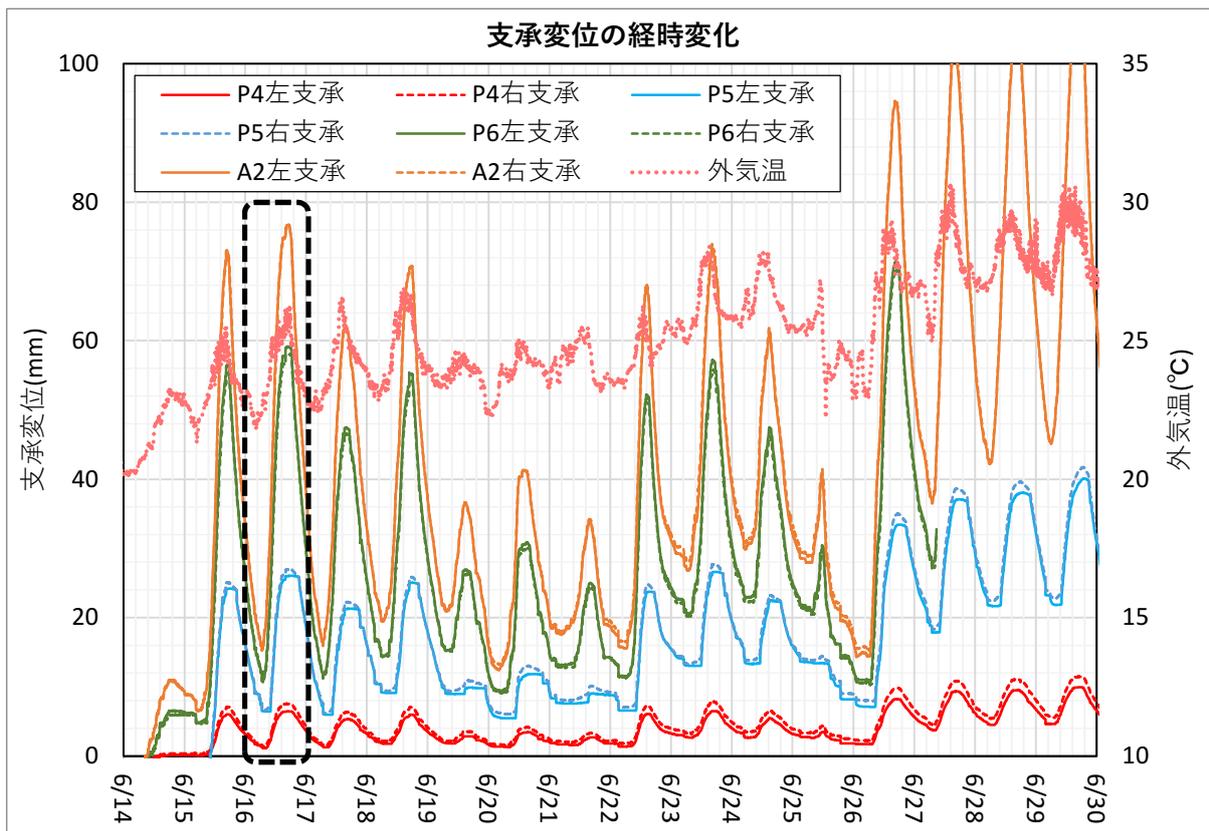


図 2.6-36 P4 支承変位の時刻歴変化

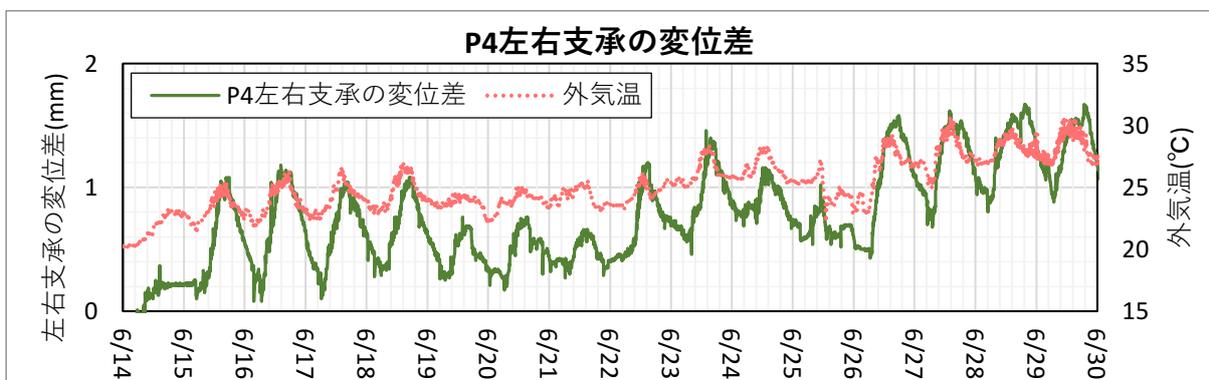


図 2.6-37 P4 左右支承変位差の時刻歴変化

図 2.6-38 に調査結果より整理した部材温度最低時である 6 時の支承変位と床版部材温度最高時である 16 時の支承変位の模式図を示す。図より、支承変位は温度と相関関係にあり、固定支承である P3 橋脚から離れるほど、変位は大きくなる。

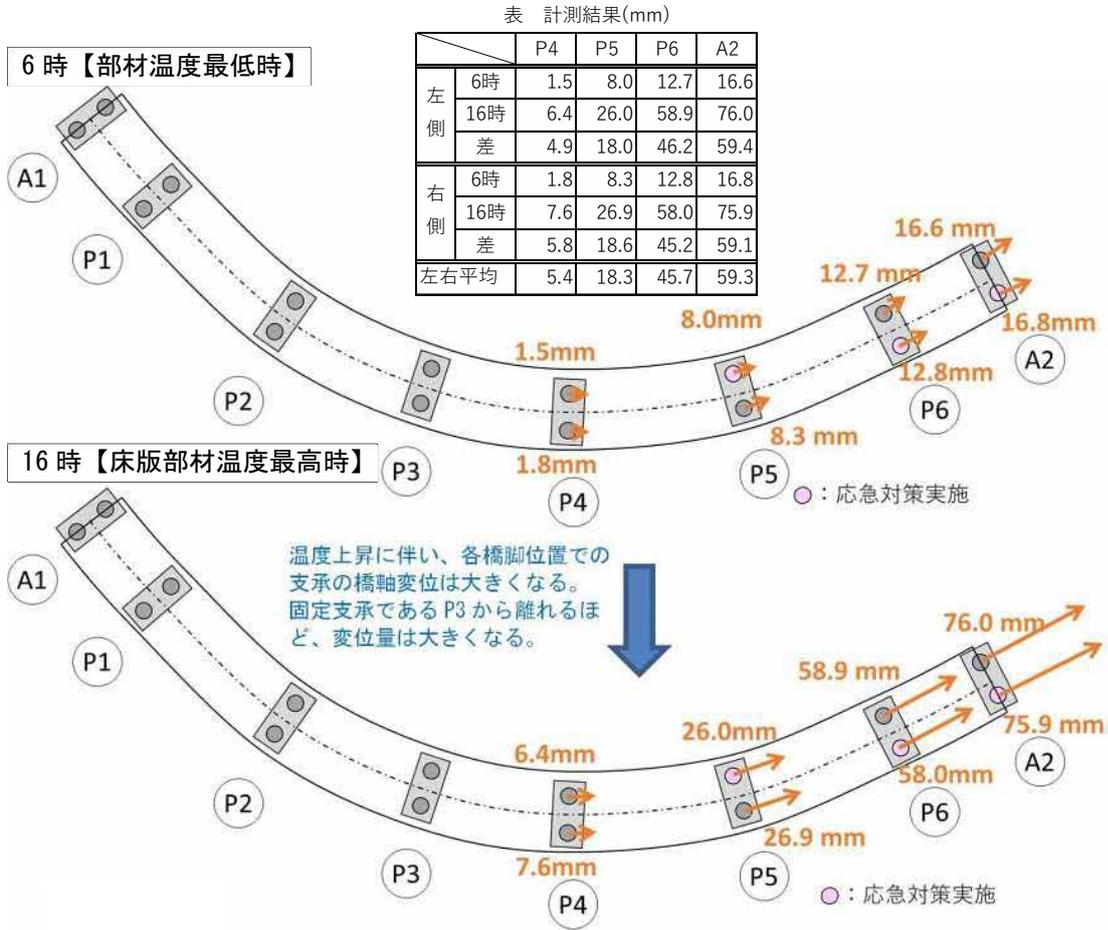


図 2.6-38 支承の橋軸方向変位挙動

4) 下部構造変位計測

図 2.6-39 に P4 橋脚、P5 橋脚および P6 橋脚の下部構造変位の経時変化を示す。計測値は各橋脚の方位角に合わせて補正し、下部構造軸方向および下部構造直角方向として整理した。図は計測を行った 2022/6/16 の 1 日の下部構造中心（左右の 2 支承間中心）の位置を示す。下部構造では下部構造軸方向および下部構造直角方向への変位が生じていた。

下部構造変位を示す図は 0 時を起点として整理した。経時変化の図より、温度上昇に伴い終点側に変位が生じ 17 時をピークに、以降は温度低下に伴い 0 時の位置に近づくことが分かる。支承可動方向である下部構造の軸方向に変位が生じていることから、支承が上部構造を拘束し下部構造に力を伝達したと考えられる。また、0 時と 24 時がほぼ同じ位置になることから、温度による変動作用の影響であると考えられる。

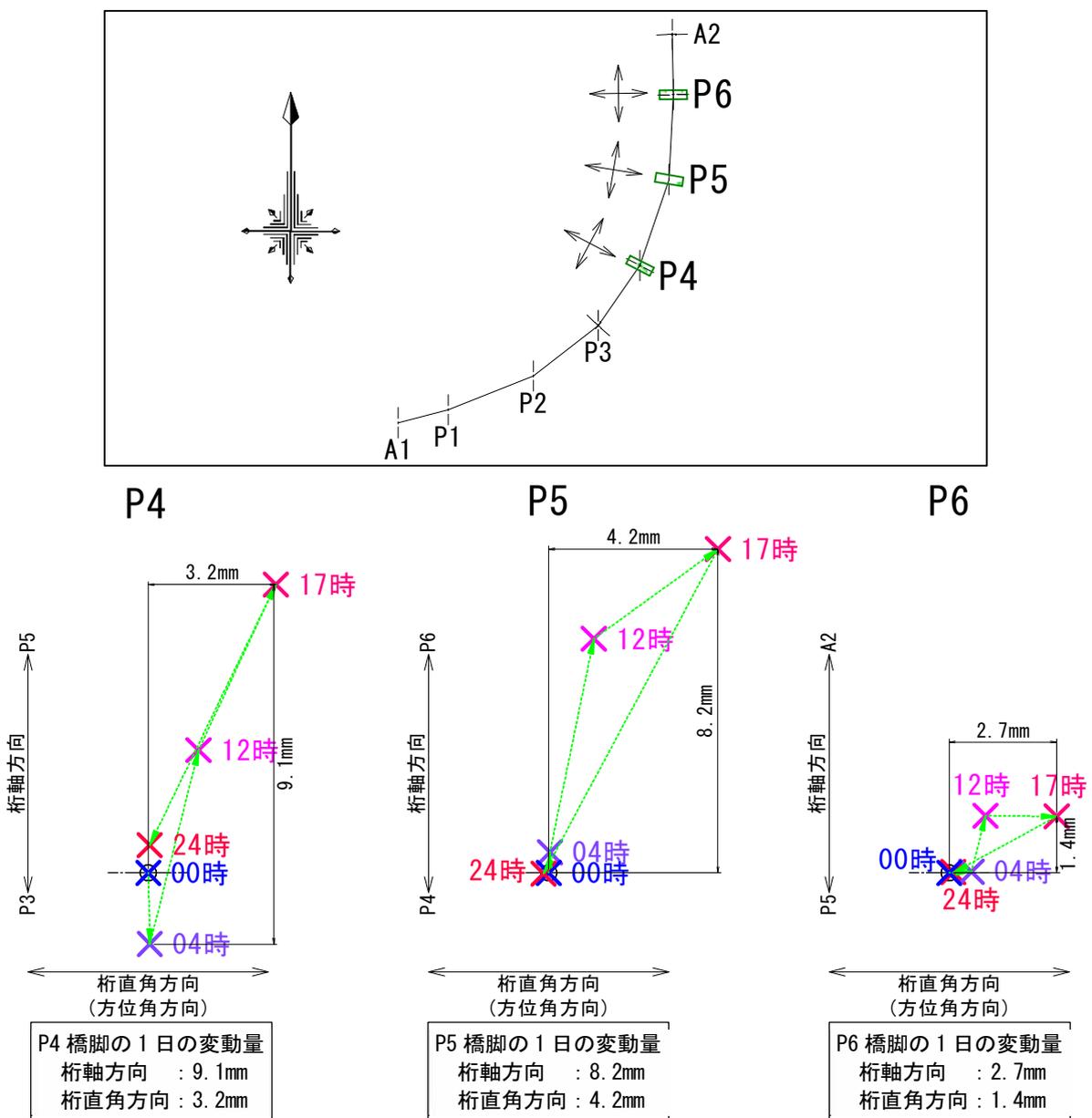


図 2.6-39 下部構造変位の経時変化

5) 桁伸縮量調査

a) 桁ひずみ計測

桁ひずみ計測では、自己温度補償型のひずみゲージを使用した。図 2.6-40 に P3-P4 径間の各計測箇所における桁ひずみの時刻歴変化の結果を示す。各計測箇所において温度とひずみは相関があり、1日の温度変化に伴い、桁に圧縮ひずみや引張ひずみが生じることを確認した。図 2.6-41 に径間毎の各部材のひずみの1日の挙動を示す。ひずみの発生方向は径間および部材毎に異なり、その発生状況は表 2.6-7 のとおりである。

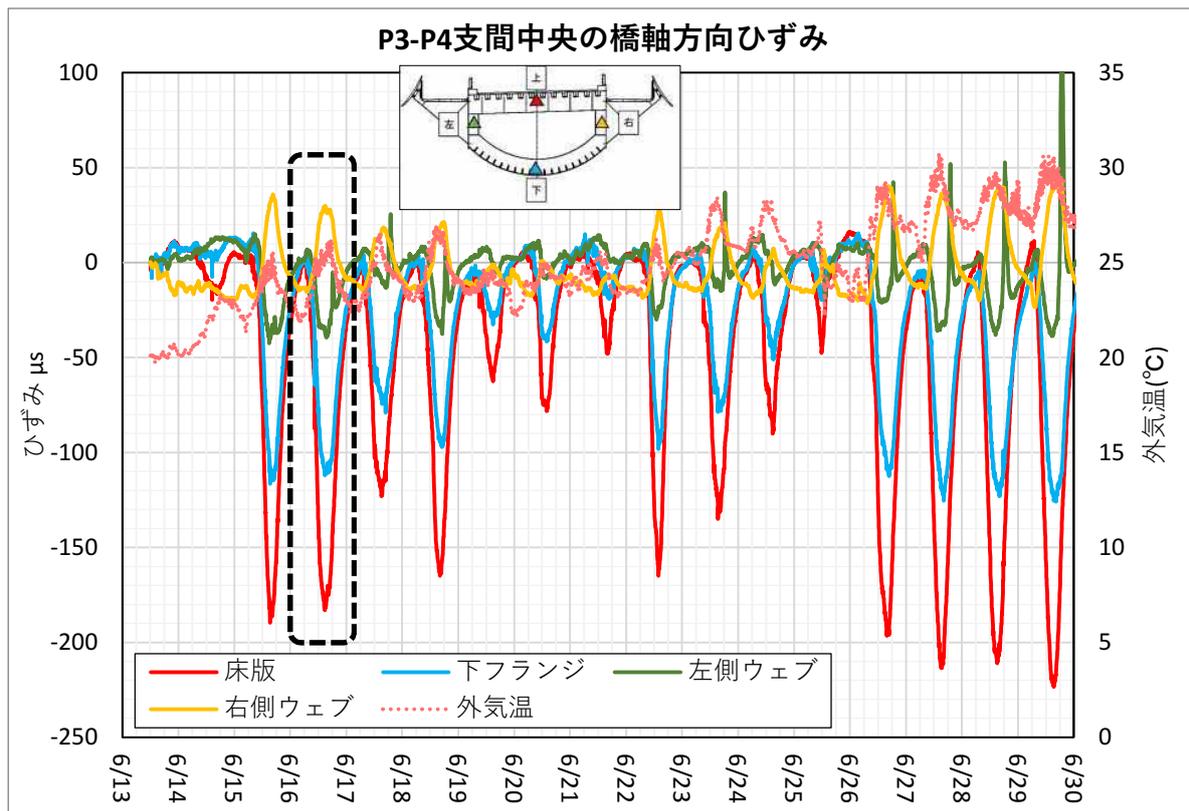


図 2.6-40 桁ひずみおよび外気温の時刻歴変化

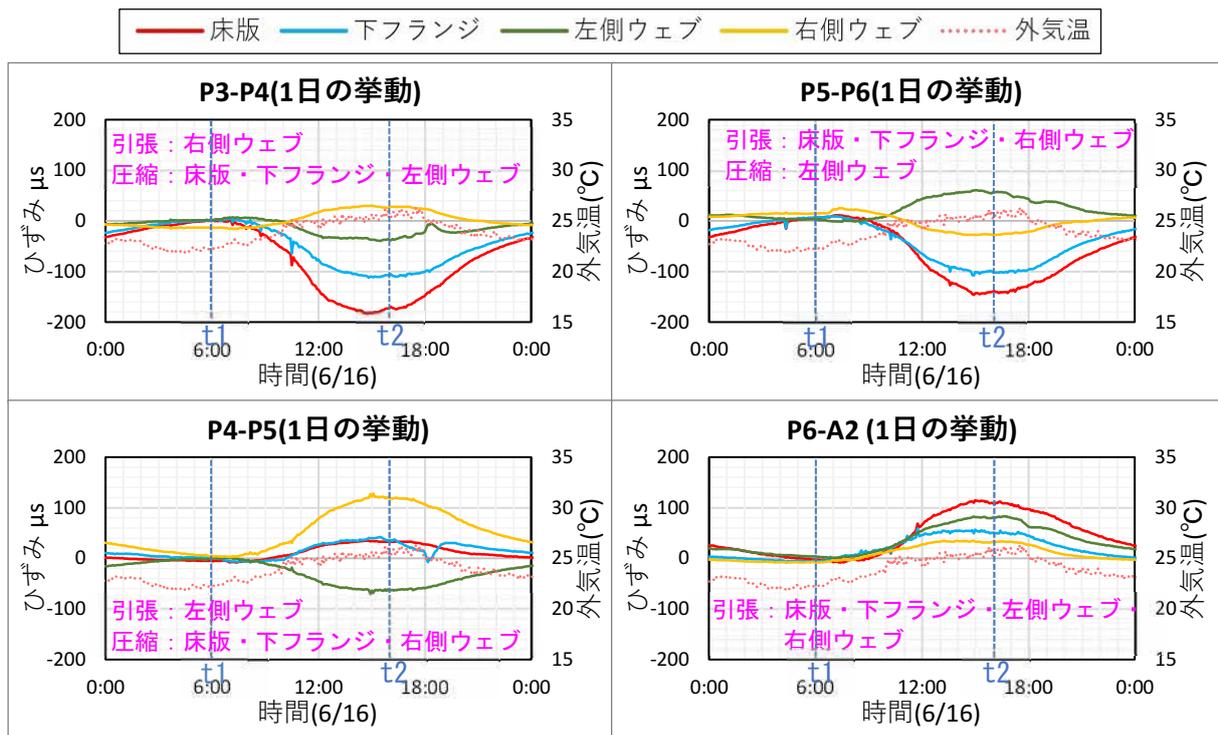


図 2.6-41 径間毎の桁ひずみの1日の温度変化

表 2.6-7 温度上昇時(16時)のひずみの方向

	P3-P4 径間	P4-P5 径間	P5-P6 径間	P6-A2 径間
床版	- (圧縮)	+ (引張)	- (圧縮)	+ (引張)
下フランジ	- (圧縮)	+ (引張)	- (圧縮)	+ (引張)
左ウェブ	- (圧縮)	- (圧縮)	+ (引張)	+ (引張)
右ウェブ	+ (引張)	+ (引張)	- (圧縮)	+ (引張)

温度変化に伴う鉛直方向の挙動を図 2.6-42 に示す。各部材温度が外気温と同程度となる(図 2.6-18 参照) 6 時では、床版および下フランジのひずみは小さく、径間によらずほぼ 0°C である。床版の部材温度最高時(16 時)に計測されたひずみは床版と下フランジでひずみの発生方向は同じであり、P3-P4 径間は圧縮、P4-P5 径間は引張、P5-P6 径間は圧縮、P6-A2 径間は引張となる。左側ウェブの温度上昇時(18 時)の各径間のひずみも同様の方向に発生する。なお、ひずみの大きさは、床版の部材温度最高時(16 時)が左側ウェブの温度上昇時(18 時)よりも高い。

温度変化に伴う水平方向の挙動を図 2.6-43 に示す。各部材温度が外気温と同程度となる 6 時では、床版および下フランジと同様にひずみは小さく、径間によらずほぼ 0°C である。床版の部材温度最高時(16 時)では、P3-P4 径間および P4-P5 径間は、2.6(3)2 桁の部材温度調査で示したとおり、左側ウェブが 16 時以降に日射の影響により温度上昇するため、曲線の外側に膨らむような挙動となる。P5-P6 径間は曲線の内側にシフトしており、直線区間である P6-A2 径間は左右ウェブのひずみはともに引張となる。これは左側ウェブの温度上昇時(18 時)も同様の傾向であるが、左右ウェブのひずみの大きさは、床版の部材温度最高時(16 時)が左側ウェブの温度上

昇時（18時）よりも高い。日射を受ける左側ウェブも同様の傾向のため、橋梁全体のひずみは、温度変化が大きい床版の部材温度の影響を受けると考えられる。

また、2.6(3)2)桁の部材温度調査で示したとおり、P6-A2 径間の左右ウェブの部材温度は、他径間よりも高い傾向があるが、ひずみ計測では、P4-P5 径間で P6-A2 径間よりも大きなひずみが計測されており、ひずみの大きさに影響するのは部材温度の高低のみではないことが分かる。

本調査では、自己温度補償型のひずみゲージを使用しているため、計測されたひずみは、長大な曲線橋の桁の変形に起因すると考えられる。温度変化に伴った曲線の外側への桁の変形を支点部で直角方向に拘束していることからひずみが発生し、さらに左右のウェブで差異が生じていると考えられる。また、床版および下フランジでは、上下の温度差による変形が連続桁中間支点で拘束されるため、ひずみが発生すると考えられる。

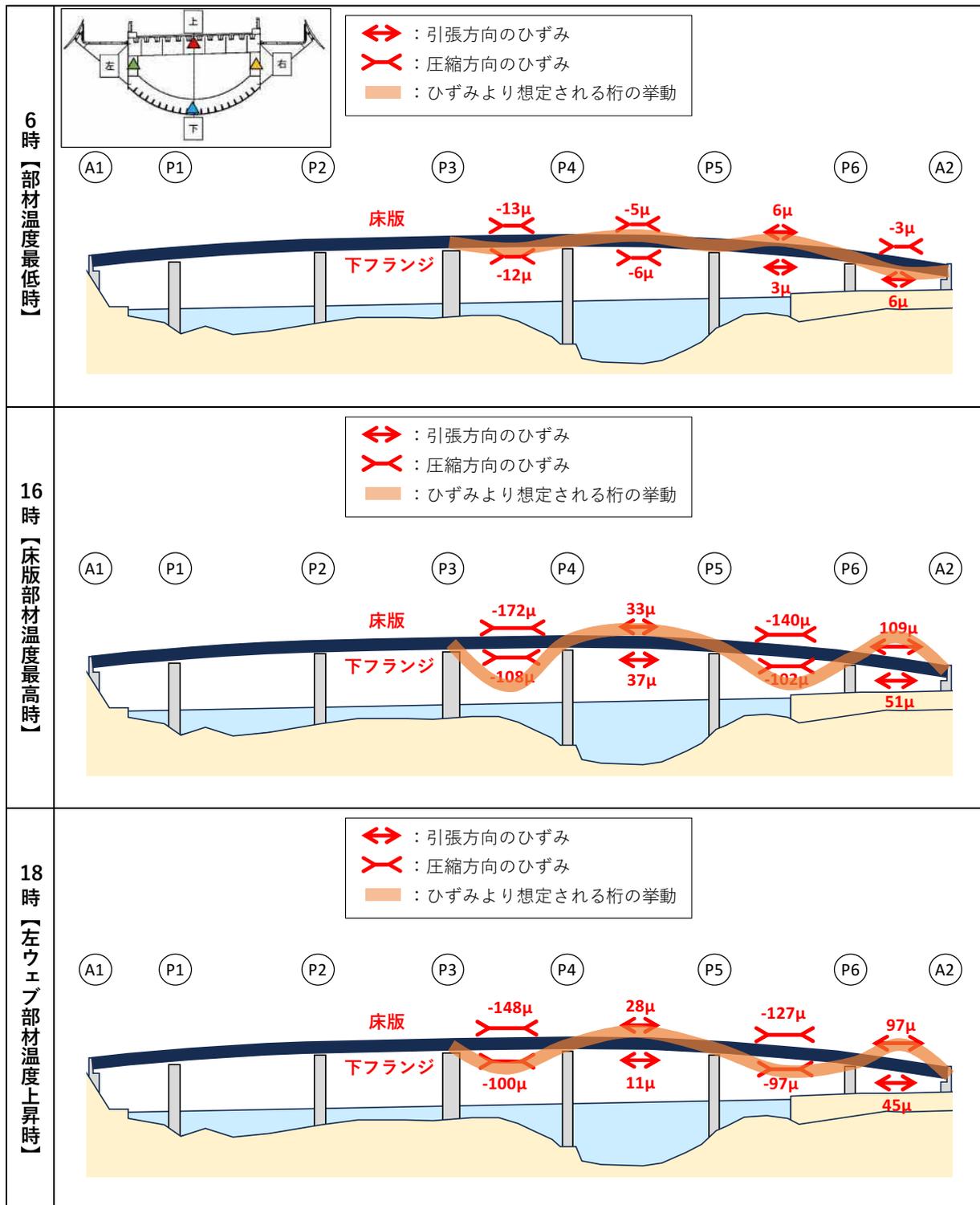


図 2.6-42 温度変化に伴う鉛直方向の想定される桁の挙動

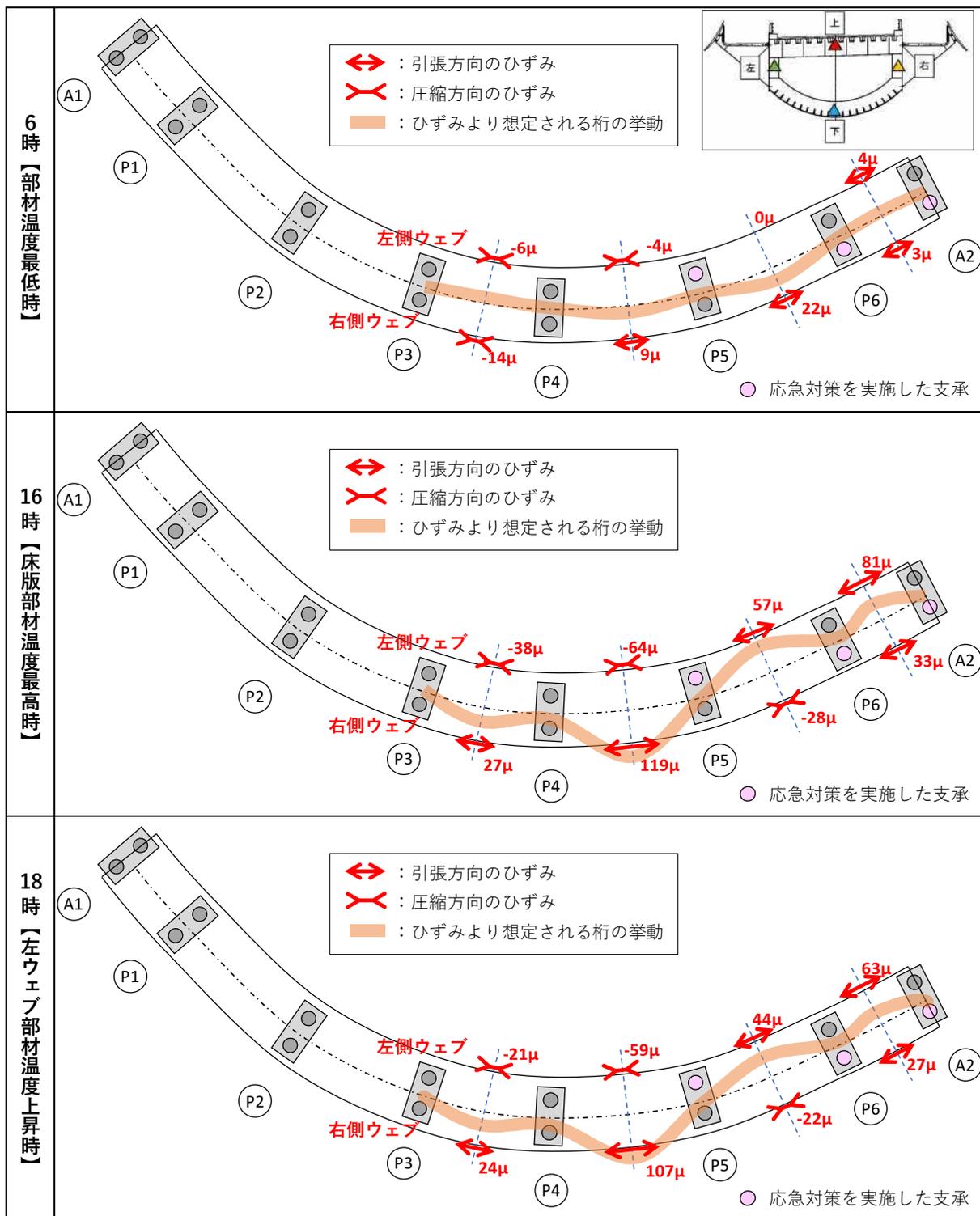


図 2.6-43 温度変化に伴う水平方向の想定される桁の挙動

b) 傾斜計測

支承の傾斜計測の結果、傾斜は温度と相関があり、1日の温度変化に伴い傾斜が生じることを確認した。最低気温時と温度上昇時の挙動を図 2.6-44 に示す。温度上昇時には、全体的に右側（曲線の外側）に傾斜することが分かる。傾斜角は支承の回転可能量（約 3.4° ：道路橋支承標準設計、平成 5 年 4 月、日本道路協会）と比べて小さい。また、P4 橋脚のみ左右の支承の軸方向の傾斜は反対の挙動を示し、その他の下部構造では傾斜の方向は同じとなる。

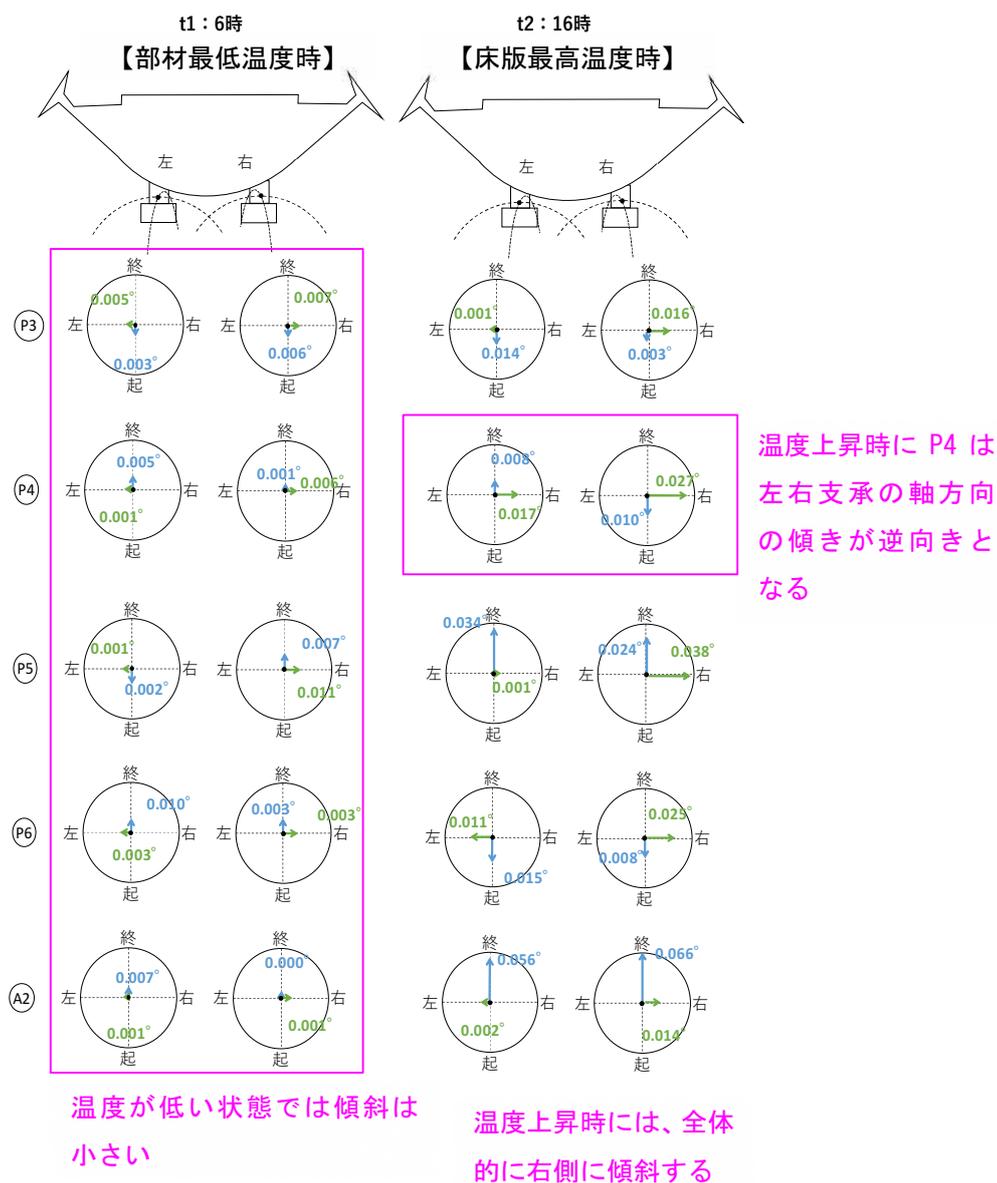


図 2.6-44 支承傾斜の温度上昇時の挙動

P4 支承の傾斜（橋軸方向）の時刻歴変化を図 2.6-45 に示す。支承の傾斜は温度との相関があることが分かる。今回確認した傾斜角は支承の回転可能量（約 3.4° ）と比べて小さい。図 2.6-46 に P3 支承から A2 支承の 1 日の傾斜の挙動を示すが、P4 支承のみ左右支承の軸方向の傾斜は反対の挙動を示し、その他の下部構造では左右支承の傾斜の方向は同じである。

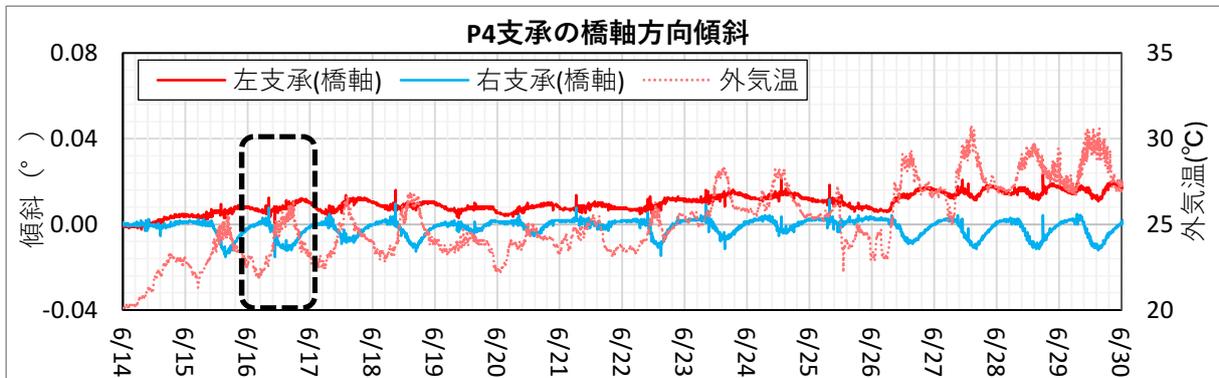


図 2.6-45 橋軸方向支承傾斜の時刻歴変化

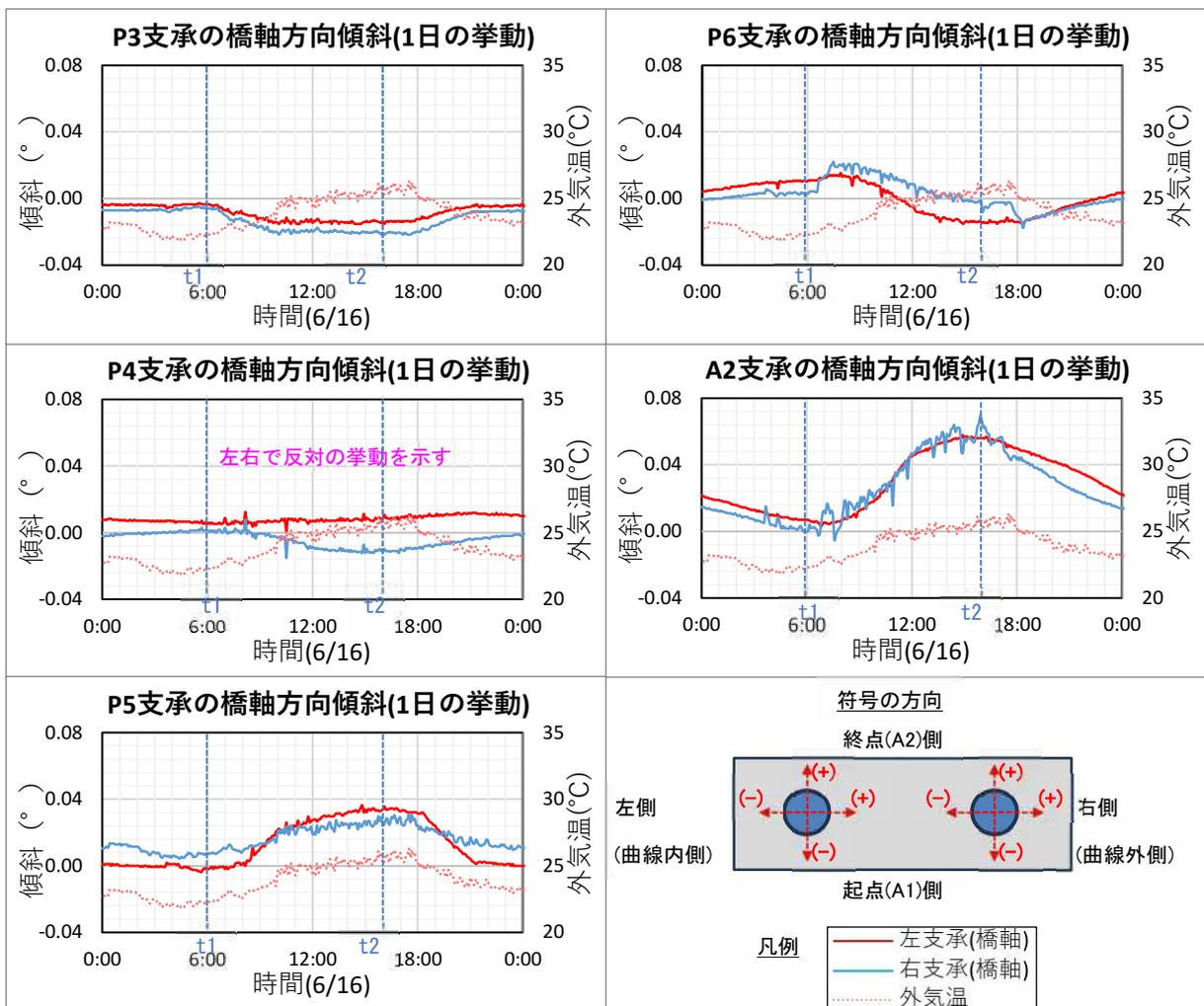


図 2.6-46 6/16 における各支点での橋軸方向支承傾斜の変化

P4 支承の傾斜（橋軸直角方向）の時刻歴変化を図 2.6-47 に示す。支承の傾斜は温度との相関があることが分かる。今回確認した傾斜角は支承の回転可能量（約 3.4° ）と比べて小さい。図 2.6-48 に P3 支承から A2 支承の 1 日の傾斜の挙動を示す。すべての支承で、全体的に右側（曲線の外側）に傾斜することが確認できる。

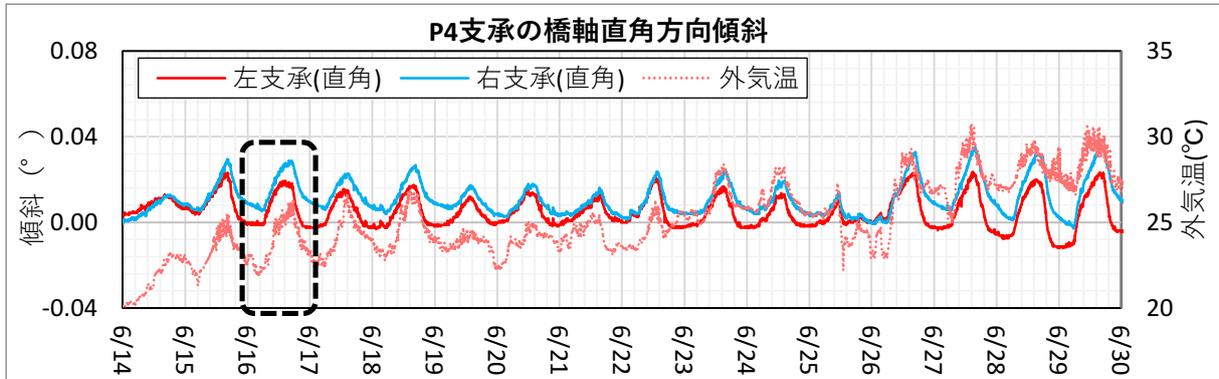


図 2.6-47 橋軸直角方向支承傾斜の時刻歴変化

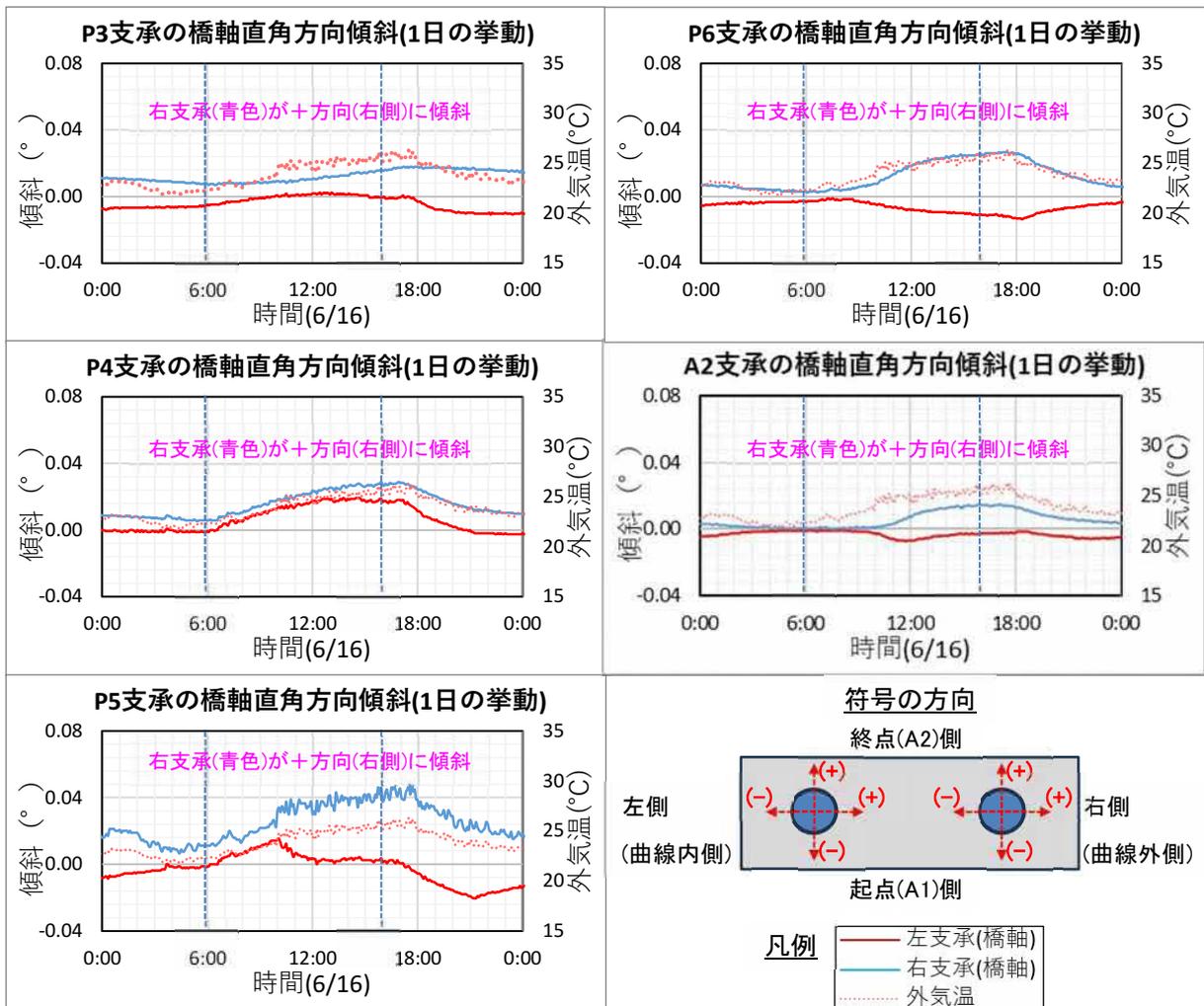


図 2.6-48 6/16 における各支点での橋軸緒角方向支承傾斜の変化

6) 支承反力調査

P6 橋脚の左右支承鉛直反力および P5-P6 径間支間中央における床版、下フランジ、左側ウェブ、右側ウェブの時刻歴変化を図 2.6-49 に示す。

左右ウェブには午前中に温度差が生じており、5 時過ぎから右側ウェブの温度が上昇し、10 時頃に左側ウェブと同程度の温度となる。これは、2.6(3)2)e) P5-P6 径間の温度時刻歴変化に示したように、橋梁の右側から太陽が上昇するため、日の出とともに右側ウェブの温度が上昇したものと考えられる。そしてこのタイミングは右側支承反力が増加傾向になるタイミングと一致する。また、その他の時間帯では、左右ウェブ温度差は小さい。

1 日をとおして床版の温度は高く、下フランジの温度は低い、7 時頃では同程度の温度となる。これは、2.6(3)2) 桁の部材温度調査に記載のとおり、床版は日中に温度が上昇し、暖められた床版が夜間に冷やされて 7 時頃で他部材の温度と同程度になったものと考えられる。そして 7 時頃から太陽の位置が高くなったことで床版の温度が上昇していく。この時刻は左側支承の反力増加の時刻と一致する。

計測された左右の支承反力は、温度変化に伴い変動するが、それぞれの平均値と設計で用いられた鉛直反力とを比較すると、左側支承（曲線の内側）では同じ値となったが、右側支承（曲線の外側）では常に値が高く、平均値で 800kN 程度の差が生じていた。また、以下に記すとおり、温度上昇時に左右支承の反力比率が変化しており、温度の上昇に伴い、右側支承の反力が増加する。

部材最低温度時（6 時） 左側：右側 = 5,451/11,974 : 6,523/11,974 = 0.455 : 0.545

床版最高温度時（16 時） 左側：右側 = 5,139/11,949 : 6,810/11,949 = 0.430 : 0.570

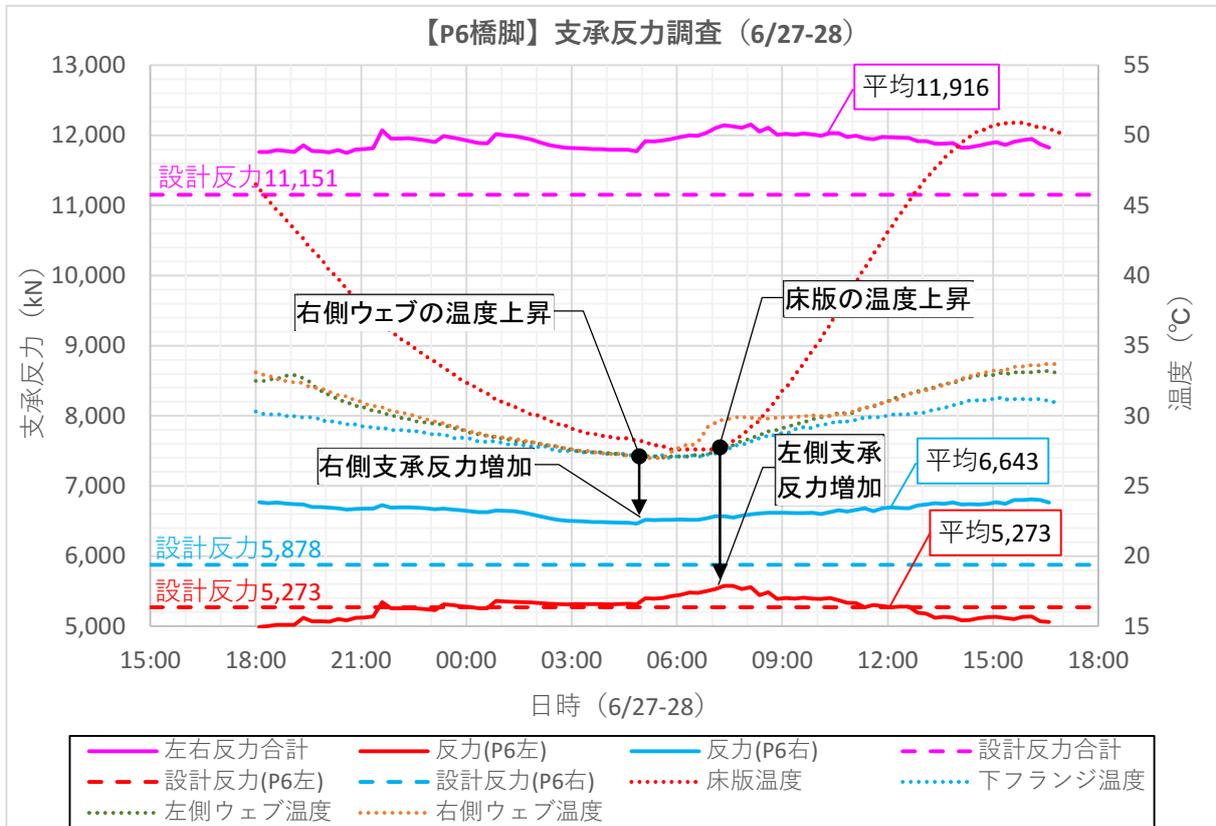


図 2.6-49 P6 支承反力調査結果

反力差と直角方向支承傾斜の時刻歴変化を図 2.6-50 に示す。反力差は、温度変化による反力の増減量を確認するために、最低温度時 6 時の反力を基準 ($R_d=0\text{kN}$) とし、そこからの差を算出したものである。左側支承は温度上昇時に反力が増加する。増加量は、支承反力最低時の 5 時から 16 時で $+300\text{kN}$ 程度である。一方で、右側支承は温度上昇時に反力が減少する。減少量は、支承反力最高時の 7 時 30 分から 16 時で -500kN 程度である。

変動する温度変化に対する反力の感度 (1°C 当たりの反力の変化量) は、以下のとおりとなる。

左側支承の温度変化に対する反力の感度 $-14.4\text{kN}/^\circ\text{C}$

右側支承の温度変化に対する反力の感度 $+13.3\text{kN}/^\circ\text{C}$

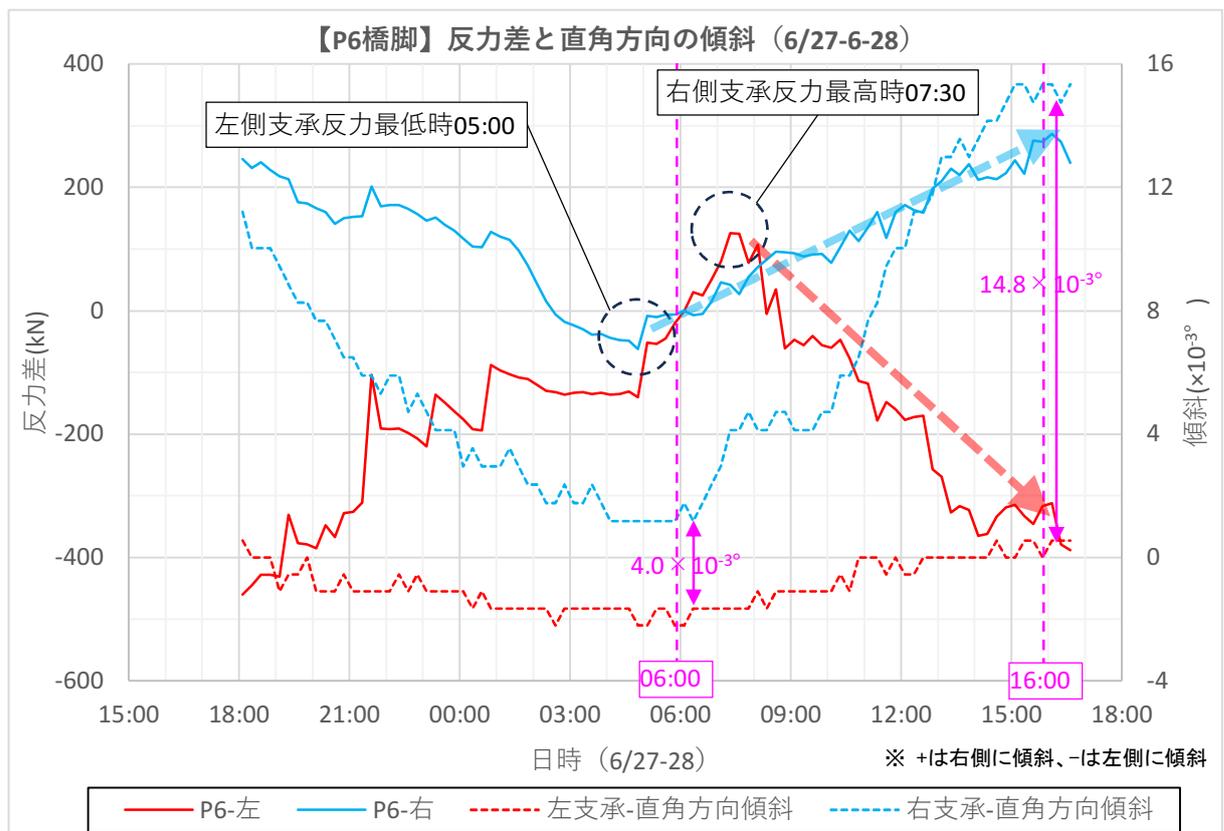


図 2.6-50 P6 支承反力差と直角方向支承傾斜

想定される鉛直反力の増減を図 2.6-51 に示す。鉛直反力は温度変化に伴い変動し、左右の反力の比率に変化が生じる。温度上昇に伴い右側支承の反力が増大するため、曲線の外側に倒れこむような挙動であると考えられる。

直角方向の支承傾斜も温度変化に伴い変動し、左右の支承ともに温度上昇時に傾斜の値は+方向に増えており、右側に傾斜することが分かる。これは鉛直反力の増減から想定される挙動とも一致する。なお、左右支承で温度上昇に伴う橋軸直角方向の傾斜の増加量には差が生じており、曲線の外側に位置する右側の方が大きく傾く。

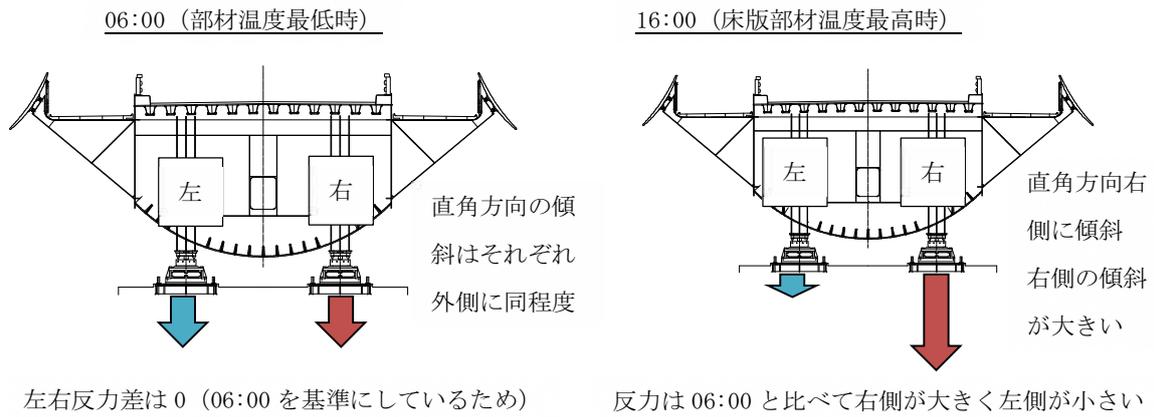


図 2.6-51 想定される鉛直反力の増減

(4) 考察

温度変化に着目した全体挙動調査結果に関するまとめを以下に示す。ただし、P5（左）支承、P6（右）支承、A2（右）支承は応急対策済みであり、損傷前と支承条件は同じではなく、調査結果も損傷前とは同じではないと考えられる。

- ・設計時の上部構造線形図に示される下部構造座標値より算出される支承間距離と下部構造測量より算出される支承間距離はよく一致した。
- ・温度分布調査の結果より、1日の中で全体の温度変化は10～15℃程度、床版と他部材との温度差は最大で20℃となることを確認した。P3-P4径間、P4-P5径間の左側ウェブでは、17時から19時に下フランジや右側ウェブと比べて最大13℃程度の温度差が生じることを確認した。また、1日の中での太陽の位置の軌跡と各径間の方向から、径間毎に各部材への日射の時刻が異なることを確認した。日射の時刻で温度上昇するため、径間毎や部材毎に温度差が生じる。さらに、日射の影響が小さく部材の温度が低くなる冬期にはこの温度差がさらに大きくなると考えられる。
- ・支承移動量調査の結果より、温度変化に伴い、支承変位が生じており、その値は外気温と相関関係にあり、固定支承であるP3橋脚から離れるほど変位量は大きくなることを確認した。
- ・桁伸縮量調査の結果より、床版および下フランジでは、上下の部材間の温度差による変形が連続桁中間支点で拘束されるためひずみが発生し、温度上昇時にP3-P4径間は圧縮、P4-P5径間は引張、P5-P6径間は圧縮、P6-A2径間は引張となることが分かった。左右ウェブでは、温度変化に伴った曲線の外側への桁の変形が支点部で直角方向に拘束されていることからひずみが発生し、温度上昇時に、P3-P4径間およびP4-P5径間は、曲線の外側に膨らむような挙動となり、P5-P6径間は曲線の内側にシフトし、直線区間であるP6-A2径間は左右ウェブのひずみはともに引張となることが分かった。
- ・下部構造移動量調査の結果より、温度変化に伴い、支承条件が可動である橋軸方向に下部構造の変位が生じることが分かった。下部構造で確認された変位は支承部が拘束されることで下部構造に水平力が伝達しているために生じると考えられ、支承はほぼ固定状態にあったと考えられる。
- ・支承反力調査の結果より、当初設計の確認のために実施した数値解析と同様に全体温度変化と部材間温度差の影響により鉛直反力が変動することが分かった。また、温度変化により左右支承の反力比率が変化することを確認した。

以上のことから、上部構造は、橋梁全体の温度変化に加え、1日の中での太陽の位置の軌跡と各径間の方向により径間毎や部材間に生じる温度差の影響を受け複雑な挙動を示し、支承に拘束が生じ、下部構造に力が伝達することを確認した。よって、長大で特殊な断面形状の曲線橋という本橋特有の条件下において、上部構造の規模の大きさより支承部材は常に大きな反力下にある中で、桁の動きが支承部で拘束された状態となり、温度変化および温度差により鉛直反力に変動が生じ、これが繰り返されてきたことにより、支承部が損傷したと考えられる。

2.7 全体挙動および支承への影響解析

2.7.1 目的

これまでの調査の結果、ローラーとの接触面から繰り返し作用により損傷が進行したこと、ローラーがガイドに接触していたこと、下部構造には温度変化に伴った橋軸方向の変位が生じていたことが分かっている。これらのことから、桁の温度伸縮により可動支承は自由に移動することができずに可動方向にも拘束状態にあり、桁の動きが支承部で拘束されたことにより生じる反力が支承を介して下部構造へ伝達していたものと考えられる。

各支承部では、支承の可動方向と桁の伸縮方向が異なることで温度変化等によってローラーがガイド部に接触し、橋軸方向へも拘束が生じていたと考えられる。よって、損傷前の状態をなるべく想定した支承の可動方向に拘束を考慮したモデルにより数値解析を行い、支承部への作用力を確認した。なお、温度により拘束された支承部には風や活荷重といった変動荷重により、さらに反力が発生すると考えられるが、本解析では温度変化等による拘束によって生じる支承の反力確認を目的とした。

なお、その全体挙動解析モデルにより算出された支承部の反力を用いて、支承部のみを取り出してソリッド要素による支承部への影響解析を参考として実施し、支圧板に生じる応力集中を確認した。図 2.7-1 に全体挙動および支承への影響解析の概要を示す。

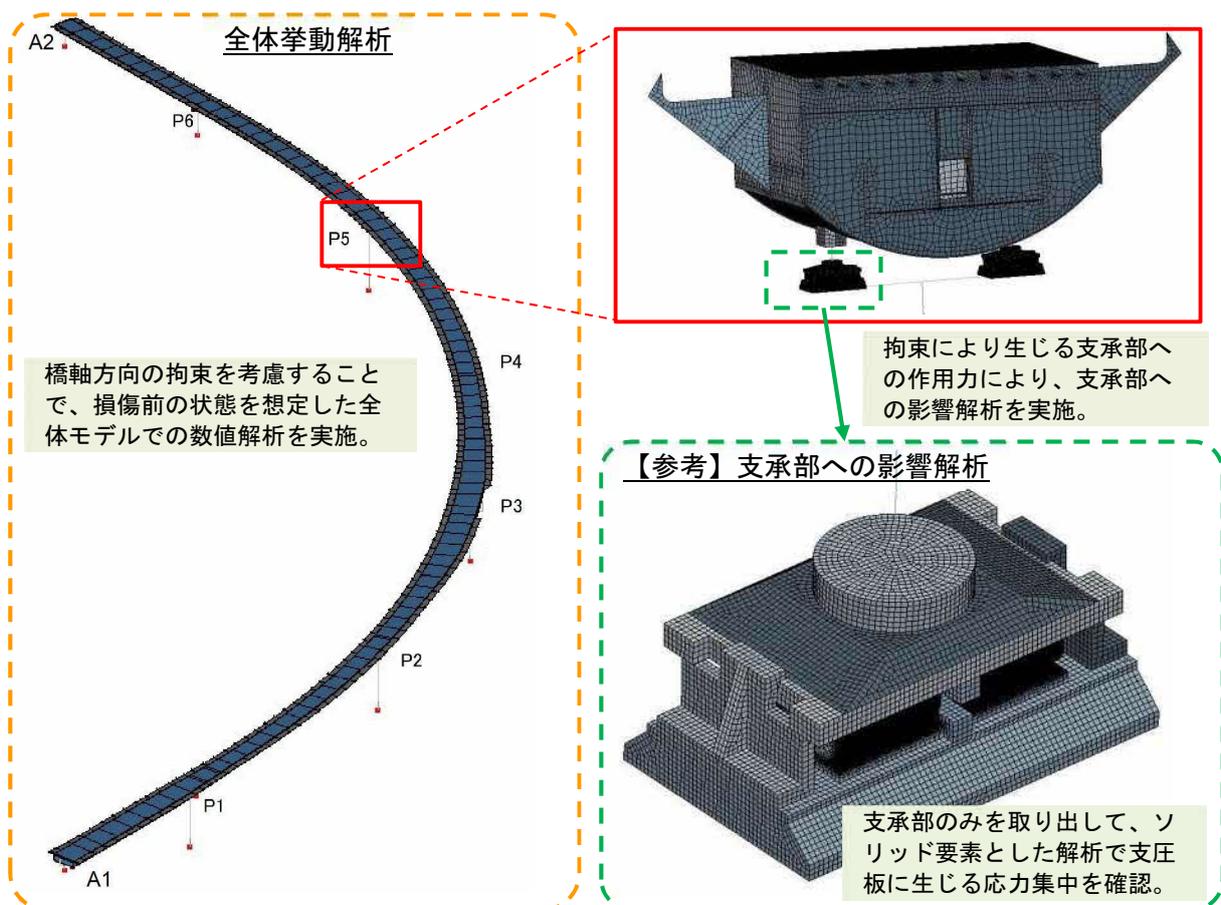


図 2.7-1 全体挙動および支承への影響解析の概要

2.7.2 方法

(1) モデル化

桁の複雑な形状、温度差による上部構造の挙動と橋脚の2軸曲げの影響評価のため、桁はシェル要素、支承はばね要素（軸可動、直角固定）でモデル化した。以下に条件を示す。

- ・モデル化範囲は、7 径間連続鋼床版曲線箱桁の支承を含む上部構造および下部構造（橋台、橋脚）とする。
- ・主構造はシェル要素でモデル化する。
- ・鋼床版Uリブおよび下フランジリブ、ダイヤフラム、横リブ、補剛材（支承位置）、歩道部および歩道ブラケットもモデル化し、橋台部のカウンターウェイトの重量も考慮する。
- ・要素サイズは一般部で500mm程度とし、支承近傍については100mm程度に細かく設定する。
- ・平面線形および縦断勾配は、線形図よりセクションの間を直線補間して考慮する。
- ・横断勾配は考慮するものとし、最大勾配を2%とする。
- ・その他、解析結果への影響が少ない付属物や副部材、構造仕様（壁高欄、地覆、人孔、添接板、垂直補剛材、水平補剛材、スカーラップ）はモデル化しない。
- ・橋脚などの下部構造もファイバー要素でモデル化する。
- ・基礎は、集約ばねでモデル化する。
- ・節点数、要素数：（節点）1,036,784、（要素）：1,076,662
- ・解析に用いる汎用ソフトは、DIANA10.5（DIANA FEA社）とする。
- ・解析に用いる要素種類を表 2.7-1 および表 2.7-2 に示し、解析モデルを図 2.7-2 に示す。

表 2.7-1 解析に用いる要素種類（上部構造、支承）

部位	使用要素	要素タイプ	備考
構造	一般曲面シェル	Q20SH(4角形) T15SH(3角形)	-
支承（バネ要素）	節点バネ	N12SPR	剛梁と節点バネで 簡易的にモデル化
剛梁	梁要素	L13BE	通常の梁要素に断面積と ヤング係数を剛値として設定

表 2.7-2 解析に用いる要素種類（下部構造）

部位	使用要素	備考
橋台	パラペット	線形梁要素 ファイバー
	縦壁	線形梁要素 ファイバー
	フーチング	線形梁要素（剛） ファイバー
橋脚	柱部	線形梁要素 ファイバー
	フーチング	線形梁要素（剛） ファイバー
基礎構造	深礎杭（A1）	線形ばね要素（非対称ばね） -
	鋼管矢板基礎（P1、P2）	線形ばね要素（集約ばね） -
	場所打杭（P3、P4、P5、P6、A2）	線形ばね要素（集約ばね） -

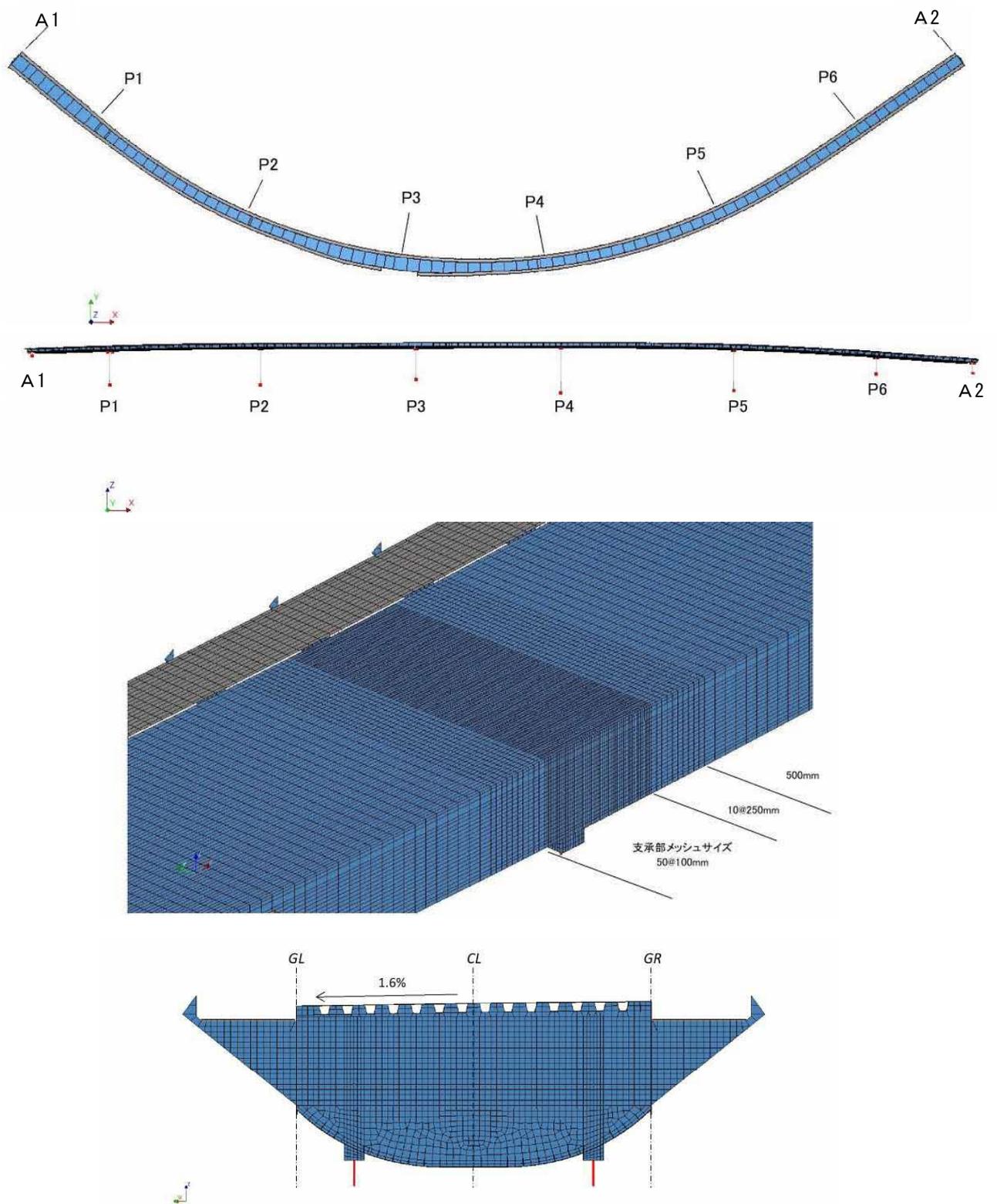


図 2.7-2 解析モデル

(2) 解析ケース

全体挙動調査の結果を踏まえて、応急対策実施前を想定したモデルを構築するために、表 2.7-3 に示す「CASE-1: 橋軸方向可動モデル」、「CASE-2: 直角方向ギャップ考慮モデル」、「CASE-3: 橋軸方向拘束ばねモデル」の 3 ケースで全体解析を実施した。全体解析の荷重条件は、全体挙動調査結果を参考に、温度変化（全体+10℃）+温度差（鋼床版+20℃）とした。ただし、解析と調査との整合性が高い結果が得られた CASE-3 については、以下に示す温度変化と温度差およびそれらの組合せによる複数のケースでの数値解析を実施した。

- ①死荷重
- ②全体温度変化（全体+10℃）
- ③上下温度差（鋼床版+20℃）
- ④左右温度差（左ウェブ+15℃）
- ⑤左右温度差（右ウェブ+15℃）
- ⑥組合せ 1（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃）
- ⑦組合せ 2（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ④左ウェブ+15℃）
- ⑧組合せ 3（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ⑤右ウェブ+15℃）
- ⑨組合せ 3（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃）
- ⑩組合せ 4（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ④左ウェブ+15℃）
- ⑪組合せ 5（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ⑤右ウェブ+15℃）

また、表 2.7-4 に支承部への影響検討の概要を示すが、検討 1 として、支承高が高いことにより生じる偶力を考慮した支圧板に発生する応力度を計算した。なお、検討 2 の支承部詳細モデルは、支圧板に生じる応力度を確認するために参考として実施した。

表 2.7-3 全体解析の検討ケース

CASE	CASE-1	CASE-2	CASE-3
名称	橋軸方向可動モデル	直角方向ギャップ考慮モデル	橋軸方向拘束ばねモデル
ケース概要	橋軸方向には自由に移動することができ、直角方向には固定されたケース。温度伸縮により支承の変位が拘束される影響は未考慮。	ローラーとガイド間にある橋軸直角方向の遊間を考慮したケース。各支点部で接触するタイミングに差が生じ、段階的に拘束される。	橋軸方向に拘束ばねを考慮したケース。直角方向は固定とした。ギャップは設けないため、支承の変位に伴い拘束が生じる。
概要図			
拘束条件	橋軸	<p>直角方向に 2.5mm のギャップ接触前は可動、接触後は固定</p> <p>ローラーとガイド間の直角方向の遊間(ギャップ): 2.5mm</p>	<p>拘束ばね</p> <p>ばね値 $K=3.16 \times 10^6 \text{ kN/m}$</p> <p>$\mu$: 鋼材同士の摩擦係数 ($\mu=0.5$) N: P4 支承の直角反力(解析値) δm: P4 支承の軸方向変位(計測値)</p>
	直角	<p>直角方向に 2.5mm のギャップ接触前は可動、接触後は固定</p> <p>ローラーとガイド間の直角方向の遊間(ギャップ): 2.5mm</p>	<p>固定</p>

表 2.7-4 支承部への影響検討

検討	着目	概要
1	支圧板応力	全体解析の CASE-3_橋軸方向拘束ばねモデルで算出した反力より、支承高を考慮して支圧板に作用する応力を確認する。
2 (参考)	支圧板応力 (ソリッドモデル)	全体解析の CASE-3_橋軸方向拘束ばねモデルで算出した反力を支承部のみをとりだした支承部詳細モデルに与えて、支承部材に発生する応力を確認する。

2.7.3 橋軸方向可動モデルの数値解析：CASE-1

(1) 解析概要

本解析では支承はバネ要素でモデル化し、橋軸方向（主桁接線方向）可動、直角方向固定とした。変動作用としては、温度変化と温度差を考慮した。現地調査の結果より、全体の温度変化は+10℃、鋼床版とその他部材の温度差を+20℃とした。

- ・ 支承部のモデル化：橋軸方向（主桁接線方向）可動、直角方向固定
- ・ 荷重条件：温度変化（全体+10℃）+温度差（鋼床版+20℃）とし、20step 刻みで載荷

解析の妥当性の確認のため、支承部が拘束され下部構造に水平力が伝達することにより生じる橋軸方向の下部構造変位について、解析結果と現地計測結果の比較を行った。なお、現地計測時は、P5（左）支承、P6（右）支承、A2（右）支承は応急対策を実施済であり、支点条件が損傷前より変わっているため、応急対策の影響が小さいと考えられる P4 橋脚の下部構造変位で確認を行った。

(2) 解析結果

表 2.7-5 に示すとおり、数値解析結果は下部構造変位が 0mm であり、与えた条件どおりに、桁は接線方向に動いてしまう。橋軸方向を可動とした数値解析モデルでは、橋軸方向に水平力は発生しないため、拘束状態であったと考えられる損傷前の状態を再現できているとはいえない。よって、支承部に拘束を考慮できるモデルを作成し全体解析を実施する。

表 2.7-5 P4 橋脚の支承変位および下部構造変位（橋軸方向可動考慮モデル：CASE-1）

		数値解析	現地計測
下部構造変位	橋軸	0.0 mm	9.1 mm

2.7.4 直角方向にギャップを設定し橋軸方向固定とした全体解析：CASE-2

(1) 解析概要

橋軸方向を可動とした数値解析モデル：CASE-1 では、橋軸方向に水平力は発生しないため、拘束状態であったと考えられる損傷前の状態を再現できていない。そのため、橋軸方向に拘束ばねを考慮し、下部構造に変位が生じるモデルとした。

ローラーとガイド間には橋軸直角方向に遊間がある。また、本橋は桁の伸縮方向と支承の設置方向の相違により生じる直角方向への変位が各支点位置で異なる。そのため、各支点部でローラーがガイド部に接触するタイミングに差が生じ、段階的に拘束されていくと考えられる。よって、支承の直角方向の遊間および接触による拘束を考慮するモデルで温度変化等の作用を考慮した数値解析を実施した。

図 2.7-3 に示すようにローラー支承の可動方向と桁の伸縮方向が一致しない場合には、ローラー支承の支承条件は橋軸直角方向に(a)可動から(b)固定に移行し、それに伴って橋軸方向にも拘束が生じるものと考えられる。従って、この影響を考慮できるように、支点部条件を変更して軸方向の拘束効果およびこれに伴う構造系の変化を検討した。なお、荷重条件は、温度変化+10℃および温度差+20℃とし、20step 刻みで載荷する。

- ・ 支承部のモデル化：図 2.7-4 に示すようにローラーとガイド間の直角方向の遊間（ギャップ）を設定し、橋軸方向および直角方向ともに、非接触までは可動条件、接触後は固定条件
- ・ 荷重条件：温度変化（全体+10℃）+温度差（鋼床版+20℃）とし、20step 刻みで載荷

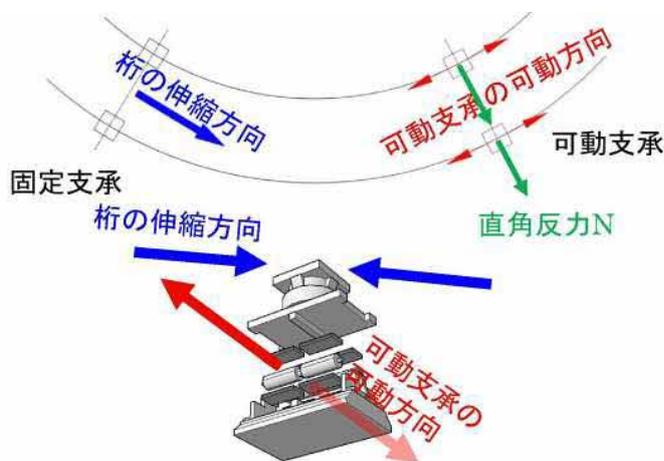


図 2.7-3 支承可動方向と桁伸縮方向のずれ

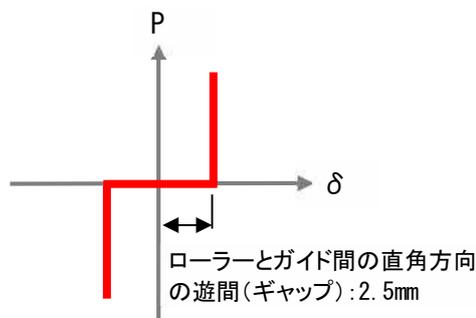


図 2.7-4 橋軸方向および橋軸直角方向の支承ばねの荷重変位関係

(a) ローラーとガイドが非接触

図 2.7-5 に示すようにローラーとガイド間では、橋軸直角方向に 2.5mm の遊間があるため、遊間内で直角方向には可動条件となる。

$$\delta = (85 - 80) / 2 = 2.5 \text{mm}$$

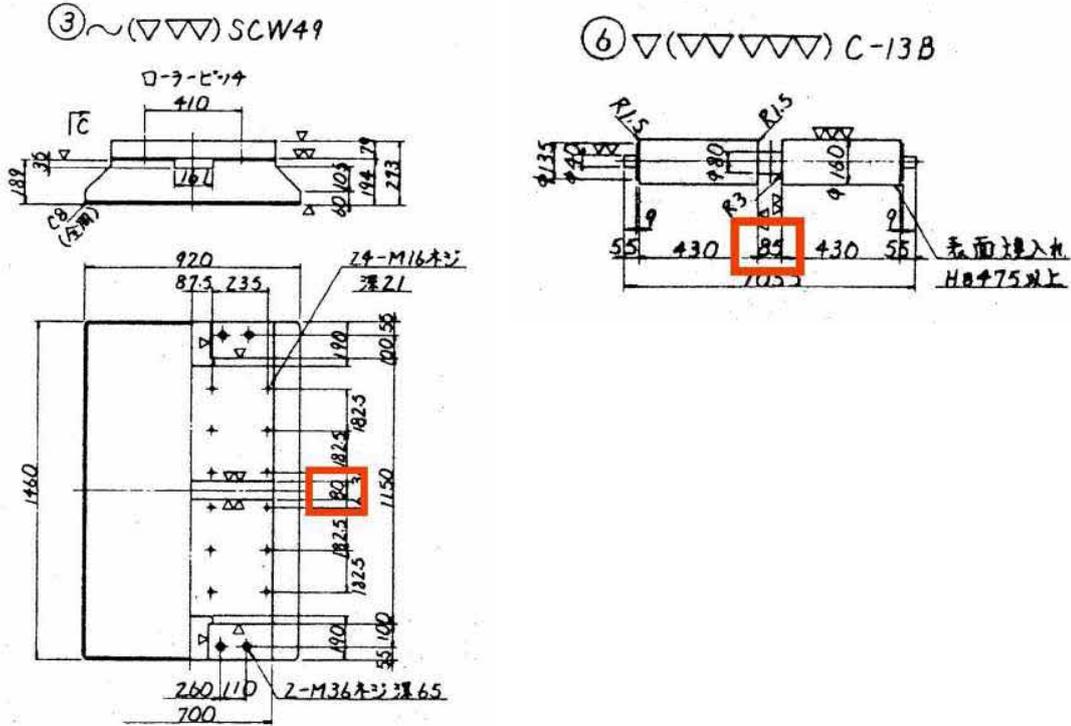


図 2.7-5 既設ローラー支承図面

(b) ローラーとガイドが接触

図 2.7-6 に示すようにローラーが橋軸直角方向に 5mm 以上移動することで、遊間がなくなり、橋軸直角方向には固定となる。これに伴い、橋軸方向でも摩擦による拘束が生じるため、接触後は固定条件とした。

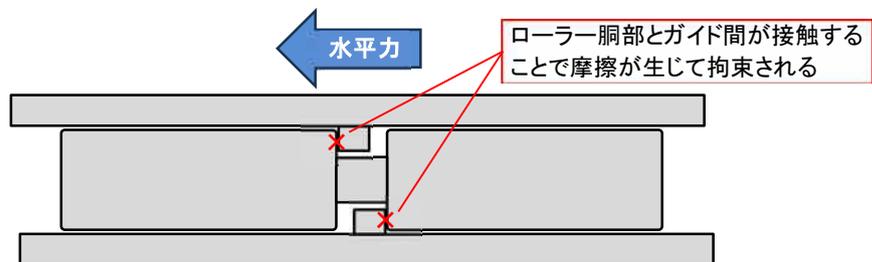


図 2.7-6 ローラーとガイドの接触イメージ

(2) 解析結果

1) 支承の拘束条件の推移

表 2.7-6 に温度変化に伴う橋軸方向の支承拘束条件の推移を示す。着色箇所は対象支承で初めの支承の拘束が生じたステップを示す。表より、各支承部は同時に固定条件とはならず、順番に固定条件になる。図 2.7-7 に温度変化に伴う支承部拘束のタイミングを示す。最初に STEP6（温度変化+3.0℃、温度差+6.0℃）で、P6 橋脚の右側支承に拘束が生じ、次に STEP7（温度変化+3.5℃、温度差+7.0℃）で、A1 橋台の左側支承と P4 橋脚、P5 橋脚の右側支承に拘束が生じていることから、桁端部に近い支承部が先に固定条件となることが分かる。

図 2.7-8 に、STEP5、STEP10、STEP15、STEP20 の支承部の水平反力ベクトルと上部構造の変形モードを示す。ステップ数が増えるにつれ、曲線の外側に広がるような挙動が確認でき、曲線桁は曲線の外側に倒れ込むように変形し、固定支承である P3 橋脚より終点側は、曲線の外側の支承が先に固定条件となる。

表 2.7-6 温度変化に伴う橋軸方向の支承拘束条件の推移 : CASE-2

STEP	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4	STEP 5	STEP 6	STEP 7	STEP 8	STEP 9	STEP 10
温度変化	+0.5°C	+1.0°C	+1.5°C	+2.0°C	+2.5°C	+3.0°C	+3.5°C	+4.0°C	+4.5°C	+5.0°C
温度差	+1.0°C	+2.0°C	+3.0°C	+4.0°C	+5.0°C	+6.0°C	+7.0°C	+8.0°C	+9.0°C	+10.0°C
A1	L	MOV	MOV	MOV	MOV	MOV	MOV	FIX	MOV	MOV
	R	MOV								
P1	L	MOV								
	R	MOV	FIX	FIX						
P2	L	MOV								
	R	MOV	FIX	FIX						
P3	L									
	R									
P4	L	MOV								
	R	MOV	FIX	FIX						
P5	L	MOV								
	R	MOV	FIX	FIX						
P6	L	MOV								
	R	MOV								
A2	L	MOV								
	R	MOV								

STEP	STEP 11	STEP 12	STEP 13	STEP 14	STEP 15	STEP 16	STEP 17	STEP 18	STEP 19	STEP 20
温度変化	+5.5°C	+6.0°C	+6.5°C	+7.0°C	+7.5°C	+8.0°C	+8.5°C	+9.0°C	+9.5°C	+10°C
温度差	+11.0°C	+12.0°C	+13.0°C	+14.0°C	+15.0°C	+16.0°C	+17.0°C	+18.0°C	+19.0°C	+20°C
A1	L	MOV	FIX	FIX						
	R	MOV								
P1	L	MOV								
	R	FIX								
P2	L	MOV	MOV	FIX						
	R	FIX								
P3	L									
	R									
P4	L	FIX								
	R	FIX								
P5	L	FIX								
	R	FIX								
P6	L	MOV								
	R	FIX								
A2	L	MOV								
	R	MOV	FIX							

※1: 着色箇所は対象支承で初めに拘束が生じたステップ

※2: L 曲線の内側、R 曲線の外側

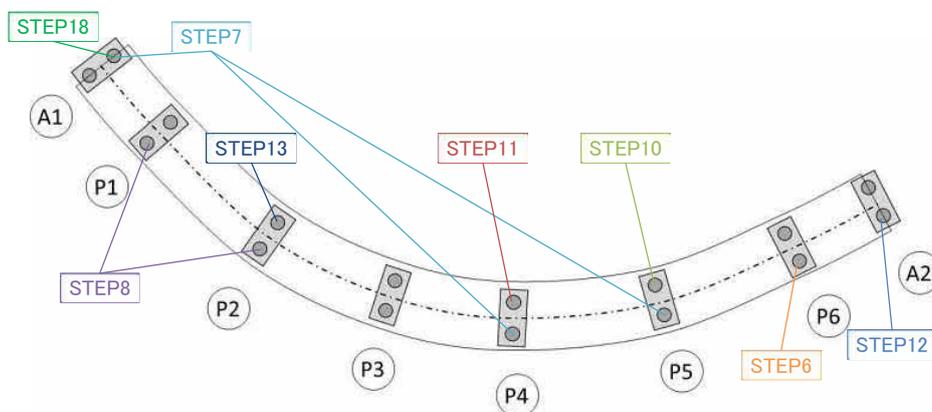


図 2.7-7 温度変化に伴う支承部拘束のタイミング : CASE-2

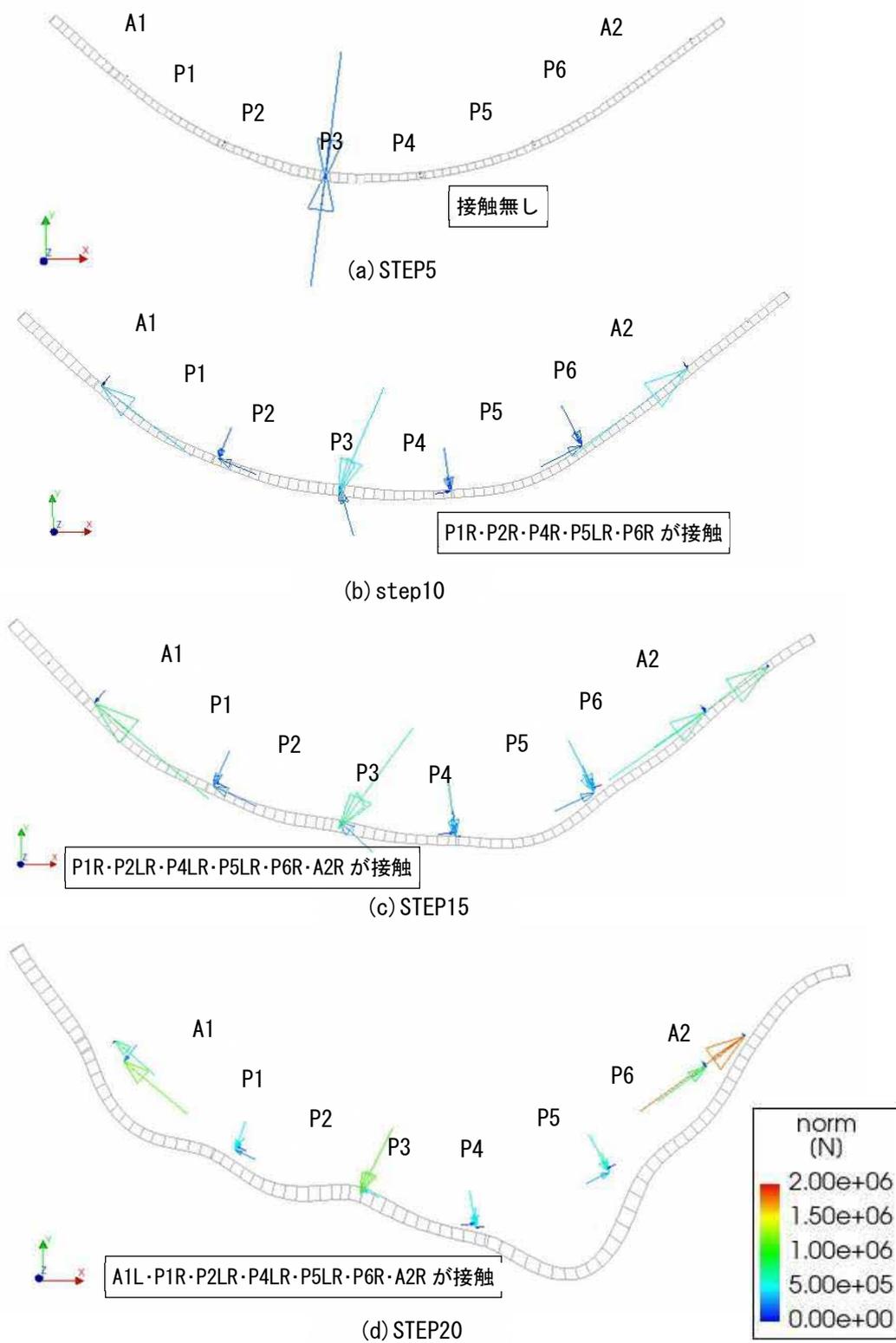


図 2.7-8 支承部の水平反力ベクトルと上部構造の変形モード（平面、変形倍率 2,000 倍）：CASE-2

2) 下部構造変位の確認

橋軸方向可動モデルでの解析妥当性の確認と同様に、応急対策の影響が小さいと考えられるP4橋脚の橋軸方向の下部構造変位で確認を行った。

表 2.7-7 に示すとおり、数値解析結果と現地計測結果は一致しない。橋軸方向の現地計測結果 9.1mm に対して、数値解析結果が 3.0mm である。数値解析モデルでは、ローラーとガイドのギャップを 2.5mm と設定しているため、ローラーとガイドが接触するまで（直角方向に 2.5mm 変位が生じるまで）は橋軸および橋軸直角方向ともに可動、接触後は両方向ともに固定となるが、実際には、数値解析結果よりも大きな水平力が作用しているものと考えられる。つまり、ローラーとガイドが接触前から、抵抗していると考えられる。

よって、支承部にはギャップを設けず、当初から橋軸方向に拘束があるモデルとして全体解析を実施する。

表 2.7-7 P4 橋脚の支承変位および下部構造変位（直角方向ギャップ考慮モデル：CASE-2）

		数値解析	現地計測
下部構造変位	橋軸	3.0 mm	9.1 mm

2.7.5 橋軸方向拘束ばねを考慮した全体解析：CASE-3

(1) 解析概要

ローラーとガイドに直角方向のギャップを設けたモデル：CASE-2 では、下部構造変位の解析結果と現地計測結果が一致しなかったため、支承部にはギャップを設けず、橋軸方向ばねを用いたモデルでの全体モデルでの解析を行った。なお、橋軸直角方向は固定とした。

- ・ 支承部のモデル化：応急対策の影響が小さいと考えられる P4 支承の軸変位 δ_m (計測値) と直角方向反力 μN から、ばね剛性を設定。橋軸方向の支承ばねの荷重変位関係を図 2.7-9 に示す。
- ・ 荷重条件 (下部構造変位確認の解析)：温度変化 (全体+10°C) + 温度差 (鋼床版+20°C)

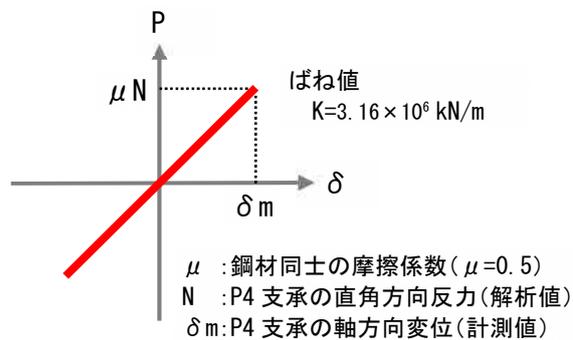


図 2.7-9 橋軸方向の支承ばねの荷重変位関係

(2) 解析結果

1) 下部構造変位の確認

橋軸方向可動モデルでの解析妥当性の確認と同様に、応急対策の影響が小さいと考えられるP4橋脚の橋軸方向の下部構造変位で確認を行った。表 2.7-8 に示すとおり、数値解析結果は6.3mmであり、現地計測結果は9.1mm（2022/6/16の4時から17時）のため、3mm程度の差があった。本解析では直角方向にローラーとガイドが接触し拘束されることを想定したが、支圧板との接触面にも摩擦が生じるため、設定以上の拘束が生じていた可能性がある。そのため、実際にはより拘束による影響が大きく、大きな支承反力が生じている可能性がある。

表 2.7-8 P4橋脚の支承変位および下部構造変位（橋軸方向拘束ばねモデル）CASE-3

		数値解析	現地計測
下部構造変位	橋軸	6.3 mm	9.1 mm

2) 温度変化、温度差およびその組合せにより発生する反力

温度変化と温度差およびそれらの組合せによる以下に示す複数の荷重ケースでの数値解析を実施した。

- ①死荷重
- ②全体温度変化（全体+10℃）
- ③上下温度差（鋼床版+20℃）
- ④左右温度差（左ウェブ+15℃）
- ⑤左右温度差（右ウェブ+15℃）
- ⑥組合せ1（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃）
- ⑦組合せ2（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ④左ウェブ+15℃）
- ⑧組合せ3（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ⑤右ウェブ+15℃）
- ⑨組合せ4（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃）
- ⑩組合せ5（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ④左ウェブ+15℃）
- ⑪組合せ6（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ⑤右ウェブ+15℃）

個別に温度を付与したケースについて、図 2.7-10 に鉛直反力、図 2.7-11 に水平反力（桁方向）、図 2.7-12 に水平反力（桁直角方向）の結果を示す。死荷重を含めた組合せのケースについて、図 2.7-13 に鉛直反力、図 2.7-14 に水平反力（桁方向）、図 2.7-15 に水平反力（桁直角方向）の結果を示す。それぞれの図には、死荷重反力に対する発生反力の比率を示す。また、各荷重ケースにおける支承反力を表 2.7-9 に示し、各荷重ケースの死荷重反力に対する割合を表 2.7-10 を示す。図 2.7-16 には各方向の符号の向きを示す。

以降に結果を示す。

- ・ 図 2.7-10 に示す個別に温度を付与したケースの鉛直反力より、②温度変化（全体+10℃）、③上下温度差（鋼床版+20℃）、④左右温度差（左ウェブ+15℃）、⑤左右温度差（右ウェブ+15℃）を比べると、鉛直反力の発生は、③上下温度差（鋼床版+20℃）の影響が一番大きい。特に P2～P5 間で、表 2.7-10 に示すとおり、死荷重反力の 25%程度の鉛直反力が発生する。左右支承に着目すると、②温度変化（全体+10℃）、③上下温度差（鋼床版+20℃）、④左右温度差（左ウェブ+15℃）では、その符号は桁端部の橋台を除き、左（曲線の内側）が+（上向き）、右（曲線の外側）が-（下向き）となり、曲線の外側に倒れこむような挙動となっていると考えられる。⑤左右温度差（右ウェブ+15℃）では、左（曲線の内側）が-（下向き）、右（曲線の外側）が+（上向き）となる。
- ・ ②温度変化（全体+10℃）および③上下温度差（鋼床版+20℃）は、図 2.7-11 に示すように橋台部で大きな水平反力（桁方向）が生じる。
- ・ 図 2.7-12 に示すように直角方向反力の発生は、②温度変化（全体+10℃）が最も大きい。
- ・ ④左右温度差（左ウェブ+15℃）は、他のケースと比べて反力の発生は小さい。
- ・ ⑥組合せ 1（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃）および⑦組合せ 2（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ④左ウェブ+15℃）で生じる鉛直反力は、表 2.7-9 より、それぞれのケースで得られた解析値を足し合わせた値より大きくなる。一方で、⑧組合せ 3（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ⑤右ウェブ+15℃）は個別に温度を付与した結果において、支配的となる③上下温度差（鋼床版+20℃）と左右支承で発生する鉛直反力の符号が逆転するため、足し合わせた値より小さくなる。
- ・ 温度の影響により発生する鉛直反力と死荷重反力の比率は、図 2.7-13 より、P3 橋脚および P5 橋脚で最大 136%となり、鉛直力は 30%以上の増加となる。
- ・ 温度の影響により水平方向（桁方向）と死荷重反力の比率は、図 2.7-14 より、橋脚では 6～22%である。本来は可動支承のため桁方向水平力は発生しないと考えられるが、実挙動を再現した橋軸方向拘束ばねを考慮したモデルにより、桁方向水平力の発生が発生する。
- ・ 温度の影響により発生する水平方向（桁直角方向）と死荷重反力の比率は、図 2.7-15 より、8～35%である。
- ・ 表 2.7-9 より、①死荷重で発生する反力と⑥組合せ 1（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃）、⑦組合せ 2（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ④左ウェブ+15℃）、⑧組合せ 3（②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ⑤右ウェブ+15℃）で発生する反力を足し合せると、それぞれ、⑨組合せ 4（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃）、⑩組合せ 5（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ④左ウェブ+15℃）、⑪組合せ 6（①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ⑤右ウェブ+15℃）で発生する反力とほぼ同じ値となる。
- ・ 図 2.7-17 に⑦組合せ 2（②全体温度変化+③上下温度差+④左右温度差）における水平反力の発生方向を示す。桁方向反力に着目すると、P1・P2・P4・P5 では、左側支承と右側支承で発生する水平力の方向は反対向きとなっており回転するような挙動となっていることが分かる。また、直角方向の水平力は左右支承ともに曲線の外側方向に発生していることから、ねじれながら曲線の外側に倒れこむような挙動となっていると考えられる。

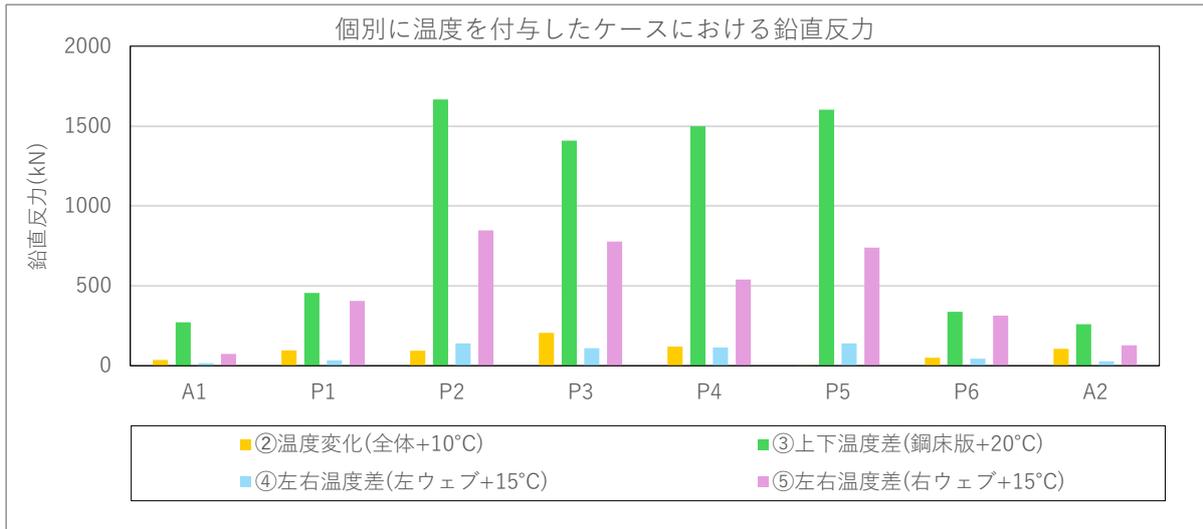


図 2.7-10 個別に温度を付与したケースにおける鉛直反力（鉛直下方向）：CASE-3

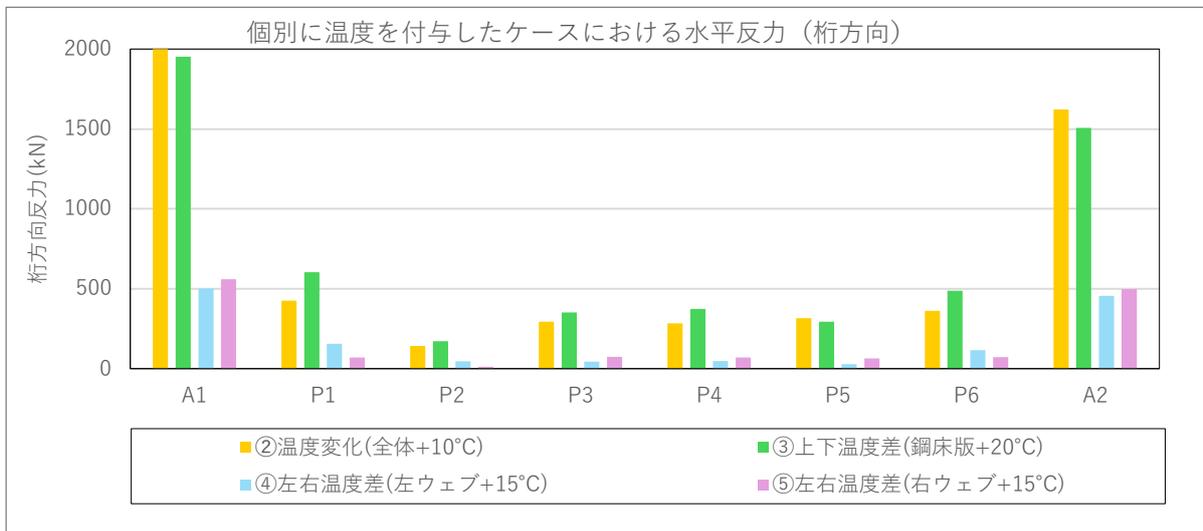


図 2.7-11 個別に温度を付与したケースにおける水平反力（桁方向）：CASE-3

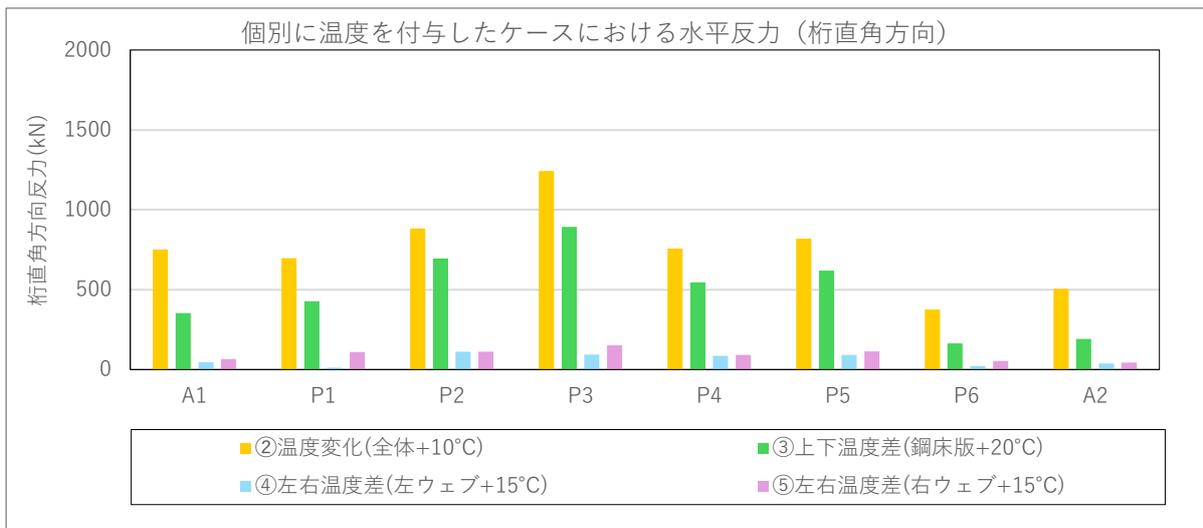


図 2.7-12 個別に温度を付与したケースにおける水平反力（桁直角方向）：CASE-3

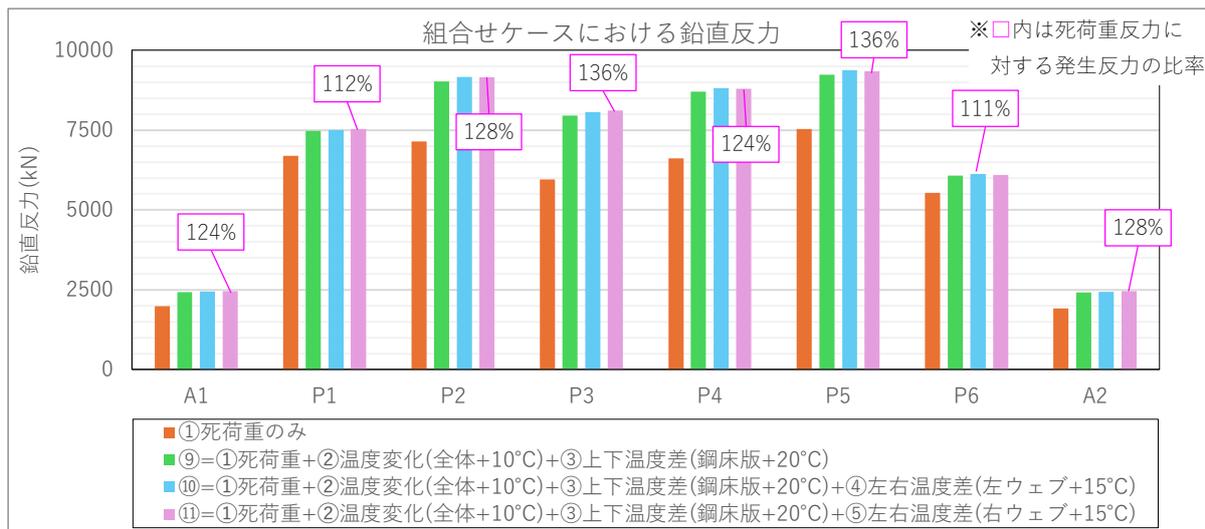


図 2.7-13 組合せのケースにおける鉛直反力（鉛直下方向）：CASE-3

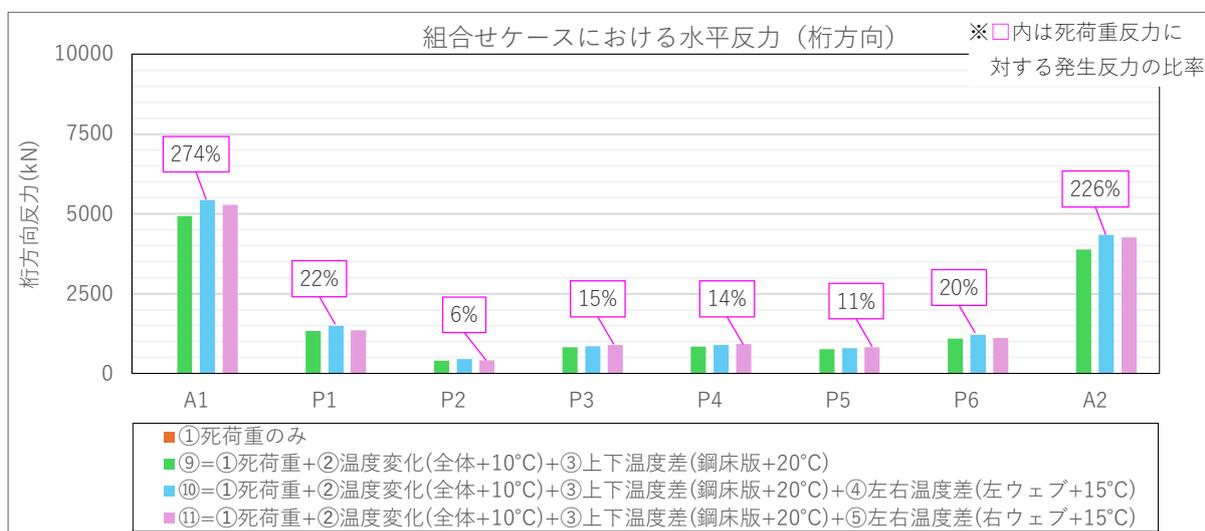


図 2.7-14 組合せのケースにおける水平反力（桁方向）：CASE-3

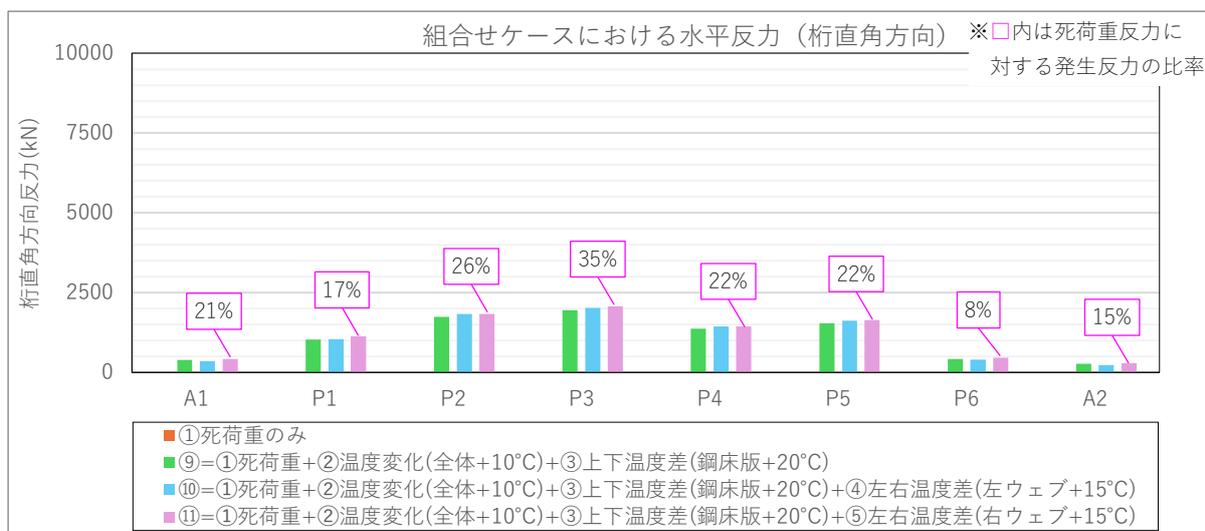


図 2.7-15 組合せのケースにおける水平反力（桁直角方向）：CASE-3

表 2.7-9 各荷重ケースにおける支承反力 : CASE-3

		支承反力 (kN)																																
		①死荷重 (死荷重のみ)			②温度変化 (全体+10℃)			③上下温度差 (鋼床版+20℃)			④左右温度差 (左ウェブ+15℃)			⑤左右温度差 (右ウェブ+15℃)			⑥組合せ1 (②+③)			⑦組合せ2 (②+③+④)			⑧組合せ3 (②+③+⑤)			⑨組合せ4 (①+②+③)			⑩組合せ5 (①+②+③+④)			⑪組合せ6 (①+②+③+⑤)		
		鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角
A1	L	-1967	0	0	3	-2000	751	-174	-1953	-241	-17	-501	-45	75	-168	30	-257	-4929	390	-274	-5431	345	-266	-5097	420	-2225	-4929	390	-2241	-5431	345	-2233	-5097	420
	R	-1985	0	0	-37	-1907	-643	-271	-1875	353	-16	-80	-10	140	-558	66	-443	-4719	-113	-459	-4799	-123	-475	-5278	-47	-2428	-4719	-113	-2444	-4799	-123	-2460	-5278	-47
P1	L	-5953	0	0	52	154	73	881	59	-428	58	107	-12	-406	-70	-109	1374	243	-570	1432	350	-582	1461	173	-679	-4578	243	-570	-4520	350	-582	-4491	173	-679
	R	-6698	0	0	-96	-425	-696	-455	-603	-224	-34	-156	0	266	-14	-97	-779	-1330	-1033	-812	-1486	-1033	-836	-1343	-1130	-7476	-1330	-1033	-7511	-1486	-1033	-7534	-1343	-1130
P2	L	-7151	0	0	169	-142	-362	1652	-172	-695	149	-47	-112	-847	-12	-113	2647	-400	-1404	2795	-447	-1517	2795	-413	-1517	-4504	-400	-1404	-4356	-448	-1516	-4356	-413	-1517
	R	-6428	0	0	-95	41	-883	-1667	69	-566	-141	24	-97	790	-3	-96	-2595	144	-1733	-2735	168	-1829	-2733	141	-1828	-9023	144	-1733	-9164	169	-1830	-9161	141	-1828
P3	L	-5965	0	0	210	201	9	1442	255	-893	107	45	-94	-776	23	-152	2373	583	-1330	2480	628	-1424	2527	607	-1481	-3591	583	-1331	-3485	629	-1422	-3438	607	-1481
	R	-5637	0	0	-206	293	-1243	-1411	351	-466	-109	33	-75	756	74	-129	-2322	819	-1942	-2432	851	-2018	-2478	891	-2071	-7959	818	-1942	-8069	850	-2020	-8115	891	-2071
P4	L	-6402	0	0	-121	283	-241	1539	373	-544	124	47	-87	-539	71	-92	2187	843	-1058	2312	890	-1144	2298	914	-1149	-4215	841	-1057	-4089	889	-1145	-4105	914	-1149
	R	-6624	0	0	170	-218	-758	-1499	-180	-405	-115	-26	-71	481	-44	-75	-2079	-488	-1366	-2193	-513	-1436	-2178	-531	-1441	-8702	-486	-1366	-8819	-513	-1437	-8802	-531	-1441
P5	L	-7542	0	0	-2	-182	-287	1749	-212	-619	158	-24	-92	-739	-48	-114	2623	-500	-1217	2780	-523	-1309	2755	-546	-1330	-4920	-499	-1216	-4761	-524	-1310	-4786	-546	-1330
	R	-6927	0	0	96	315	-818	-1603	294	-482	-139	28	-76	596	65	-97	-2308	756	-1541	-2447	783	-1617	-2417	820	-1637	-9235	755	-1541	-9376	784	-1616	-9344	820	-1637
P6	L	-5087	0	0	69	37	185	570	133	-164	63	-59	7	-313	72	-54	923	236	-61	988	177	-54	965	307	-115	-4163	236	-61	-4100	176	-53	-4121	307	-115
	R	-5528	0	0	-49	361	-376	-338	487	-29	-44	116	22	198	17	-39	-556	1092	-419	-601	1208	-398	-577	1109	-459	-6084	1092	-419	-6129	1208	-398	-6105	1109	-459
A2	L	-1878	0	0	-59	1623	506	-156	1508	-160	-27	454	-38	127	100	20	-293	3885	265	-321	4341	227	-303	3986	284	-2171	3886	265	-2199	4341	226	-2182	3986	284
	R	-1921	0	0	-106	1564	-475	-260	1467	191	-18	38	-14	192	497	43	-496	3765	-188	-513	3804	-201	-539	4262	-145	-2417	3765	-188	-2434	3803	-201	-2460	4262	-145

表 2.7-10 各荷重ケースの支承反力の死荷重反力に対する割合 : CASE-3

		死荷重時の鉛直反力に対する割合 (%)																																
		①死荷重 (死荷重のみ)			②温度変化 (全体+10℃)			③上下温度差 (鋼床版+20℃)			④左右温度差 (左ウェブ+15℃)			⑤左右温度差 (右ウェブ+15℃)			⑥組合せ1 (②+③)			⑦組合せ2 (②+③+④)			⑧組合せ3 (②+③+⑤)			⑨組合せ4 (①+②+③)			⑩組合せ5 (①+②+③+④)			⑪組合せ6 (①+②+③+⑤)		
		鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角	鉛直	桁軸	桁直角
A1	L	100%	0%	0%	0%	102%	-38%	9%	99%	12%	1%	25%	2%	-4%	9%	-2%	13%	251%	-20%	14%	276%	-18%	14%	259%	-21%	113%	251%	-20%	114%	276%	-18%	114%	259%	-21%
	R	100%	0%	0%	2%	96%	32%	14%	94%	-18%	1%	4%	0%	-7%	28%	-3%	22%	238%	6%	23%	242%	6%	24%	266%	2%	122%	238%	6%	123%	242%	6%	124%	266%	2%
P1	L	100%	0%	0%	-1%	-3%	-1%	-15%	-1%	7%	-1%	-2%	0%	7%	1%	2%	-23%	-4%	10%	-24%	-6%	10%	-25%	-3%	11%	77%	-4%	10%	76%	-6%	10%	75%	-3%	11%
	R	100%	0%	0%	1%	6%	10%	7%	9%	3%	1%	2%	0%	-4%	0%	1%	12%	20%	15%	12%	22%	15%	12%	20%	17%	112%	20%	15%	112%	22%	15%	112%	20%	17%
P2	L	100%	0%	0%	-2%	2%	5%	-23%	2%	10%	-2%	1%	2%	12%	0%	2%	-37%	6%	20%	-39%	6%	21%	-39%	6%	21%	63%	6%	20%	61%	6%	21%	61%	6%	21%
	R	100%	0%	0%	1%	-1%	14%	26%	-1%	9%	2%	0%	2%	-12%	0%	1%	40%	-2%	27%	43%	-3%	28%	43%	-2%	28%	140%	-2%	27%	143%	-3%	28%	143%	-2%	28%
P3	L	100%	0%	0%	-4%	-3%	0%	-24%	-4%	15%	-2%	-1%	2%	13%	0%	3%	-40%	-10%	22%	-42%	-11%	24%	-42%	-10%	25%	60%	-10%	22%	58%	-11%	24%	58%	-10%	25%
	R	100%	0%	0%	4%	-5%	22%	25%	-6%	8%	2%	-1%	1%	-13%	-1%	2%	41%	-15%	34%	43%	-15%	36%	44%	-16%	37%	141%	-15%	34%	143%	-15%	36%	144%	-16%	37%
P4	L	100%	0%	0%	2%	-4%	4%	-24%	-6%	9%	-2%	-1%	1%	8%	-1%	1%	-34%	-13%	17%	-36%	-14%	18%	-36%	-14%	18%	66%	-13%	17%	64%	-14%	18%	64%	-14%	18%
	R	100%	0%	0%	-3%	3%	11%	23%	3%	6%	2%	0%	1%	-7%	1%	1%	31%	7%	21%	33%	8%	22%	33%	8%	22%	131%	7%	21%	133%	8%	22%	133%	8%	22%
P5	L	100%	0%	0%	0%	2%	4%	-23%	3%	8%	-2%	0%	1%	10%	1%	2%	-35%	7%	16%	-37%	7%	17%	-37%	7%	18%	65%	7%	16%	63%	7%	17%	63%	7%	18%
	R	100%	0%	0%	-1%	-5%	12%	23%	-4%	7%	2%	0%	1%	-9%	-1%	1%	33%	-11%	22%	35%	-11%	23%	35%	-12%	24%	133%	-11%	22%	135%	-11%	23%	135%	-12%	24%
P6	L	100%	0%	0%	-1%	-1%	-4%	-11%	-3%	3%	-1%	1%	0%	6%	-1%	1%	-18%	-5%	1%	-19%	-3%	1%	-19%	-6%	2%	82%	-5%	1%	81%	-3%	1%	81%	-6%	2%
	R	100%	0%	0%	1%	-7%	7%	6%	-9%	1%	1%	-2%	0%	-4%	0%	1%	10%	-20%	8%	11%	-22%	7%	10%	-20%	8%	110%	-20%	8%	111%	-22%	7%	110%	-20%	8%
A2	L	100%	0%	0%	3%	-86%	-27%	8%	-80%	9%	1%	-24%	2%	-7%	-5%	-1%	16%	-207%	-14%	17%	-231%	-12%	16%	-212%	-15%	116%	-207%	-14%	117%	-231%	-12%	116%	-212%	-15%
	R	100%	0%	0%	6%	-81%	25%	14%	-76%	-10%	1%	-2%	1%	-10%	-26%	-2%	26%	-196%	10%	27%	-198%	10%	28%	-222%	8%	126%	-196%	10%	127%	-198%	10%	128%	-222%	8%

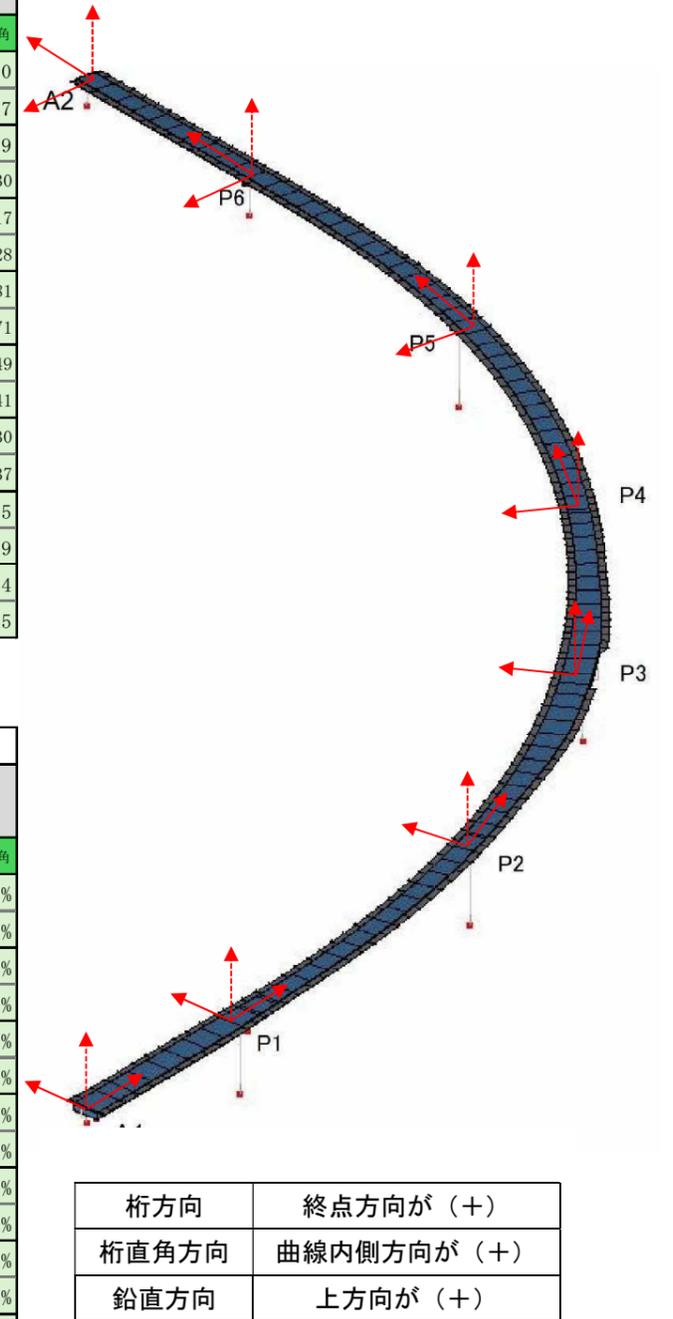


図 2.7-16 符号の向き

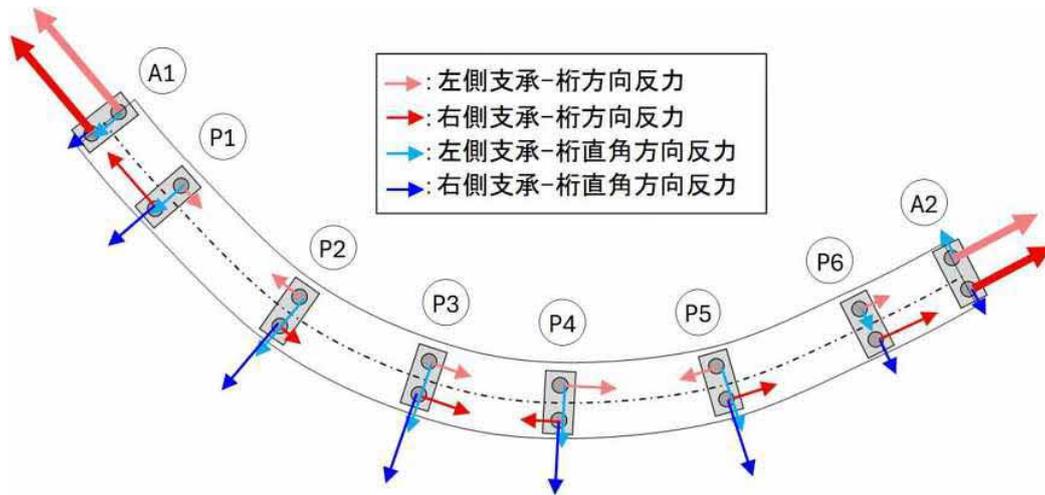


図 2.7-17 【⑦組合せ 2 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ④左ウェブ+15°C)】の水平反力発生方向 : CASE-3

図 2.7-18 から図 2.7-24 に温度を与えた各荷重ケースにおける変形図を示す。

水平方向は、②全体温度変化 (全体+10°C) と③上下温度差 (鋼床版+20°C) はともに、P1-P6 間の各径間で曲線の外側に膨らむような挙動となる。鉛直方向の挙動は、②全体温度変化 : 全体 (全部材) +10°C は、P3-P4 径間、P5-P6 径間で上に凸となるが、③上下温度差 (鋼床版+20°C) は、P4-P5 径間、P6-A2 径間で上に凸となっており、挙動が異なる。また、④左右温度差 (左ウェブ+15°C) および⑤左右温度差 (右ウェブ+15°C) は、②全体温度変化 (全体+10°C) と③上下温度差 (鋼床版+20°C) と比べて、鉛直方向も水平方向も変位は小さい。

⑥組合せ 1 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C) 、⑦組合せ 2 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ④左ウェブ+15°C) 、⑧組合せ 3 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ⑤右ウェブ+15°C) では、水平方向は、②全体温度変化 (全体+10°C) および③上下温度差 (鋼床版+20°C) と同様に P1-P6 間の各径間で曲線の外側に膨らむような挙動となるが、A1-P1 径間、P6-A2 径間では外側に膨らむ挙動は確認できない。鉛直方向は、③上下温度差 (鋼床版+20°C) と同様の挙動となっており、P4-P5 径間、P6-A2 径間で上に凸となり、③上下温度差 (鋼床版+20°C) の影響が大きいことが分かる。

⑥組合せ 1 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C) 、⑦組合せ 2 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ④左ウェブ+15°C) 、⑧組合せ 3 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ⑤右ウェブ+15°C) の水平方向の挙動は図 2.6-43 に示すひずみ計測結果より推定される挙動と比べると、P5-P6 径間を除き一致する。P5 (左) 支承、P6 (右) 支承、A2 (右) 支承は応急対策を実施済であり、挙動の違いが生じた可能性が考えられる。鉛直方向の挙動は図 2.6-42 に示すひずみ計測結果より推定される挙動と一致する。

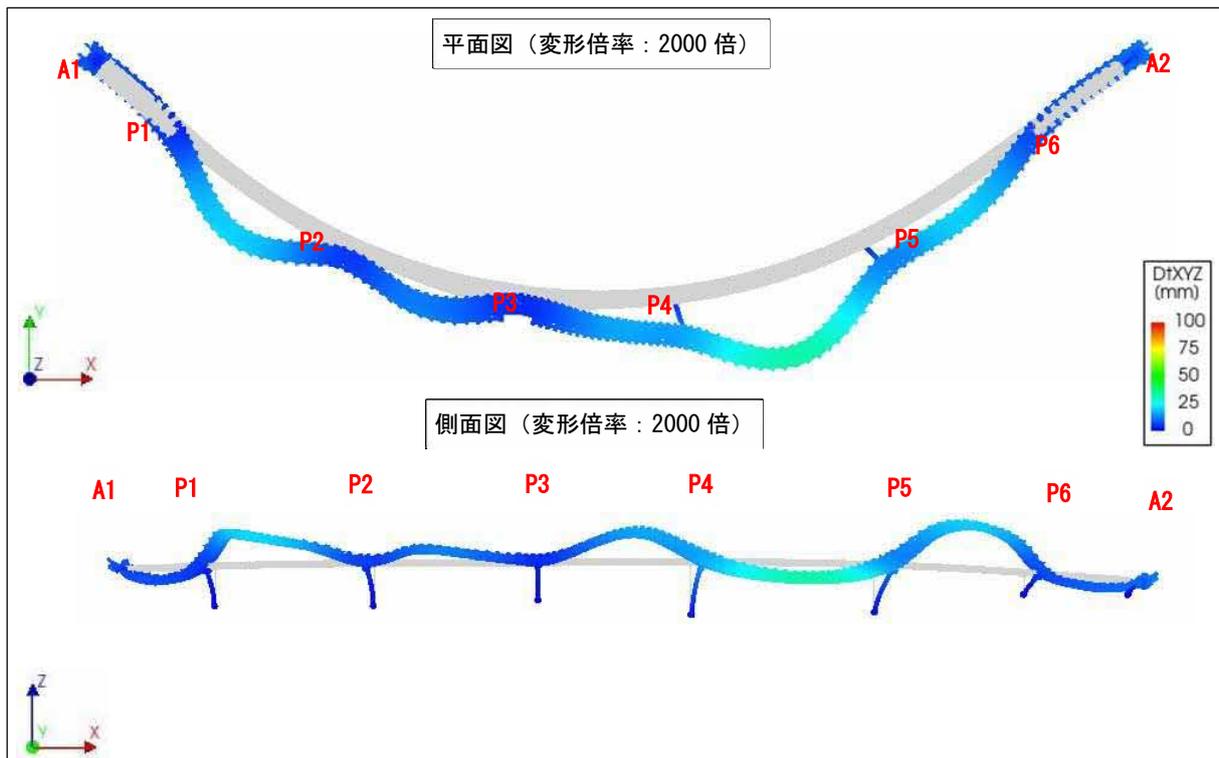


図 2.7-18 【②全体温度変化（全体+10°C）】の変形図：CASE-3

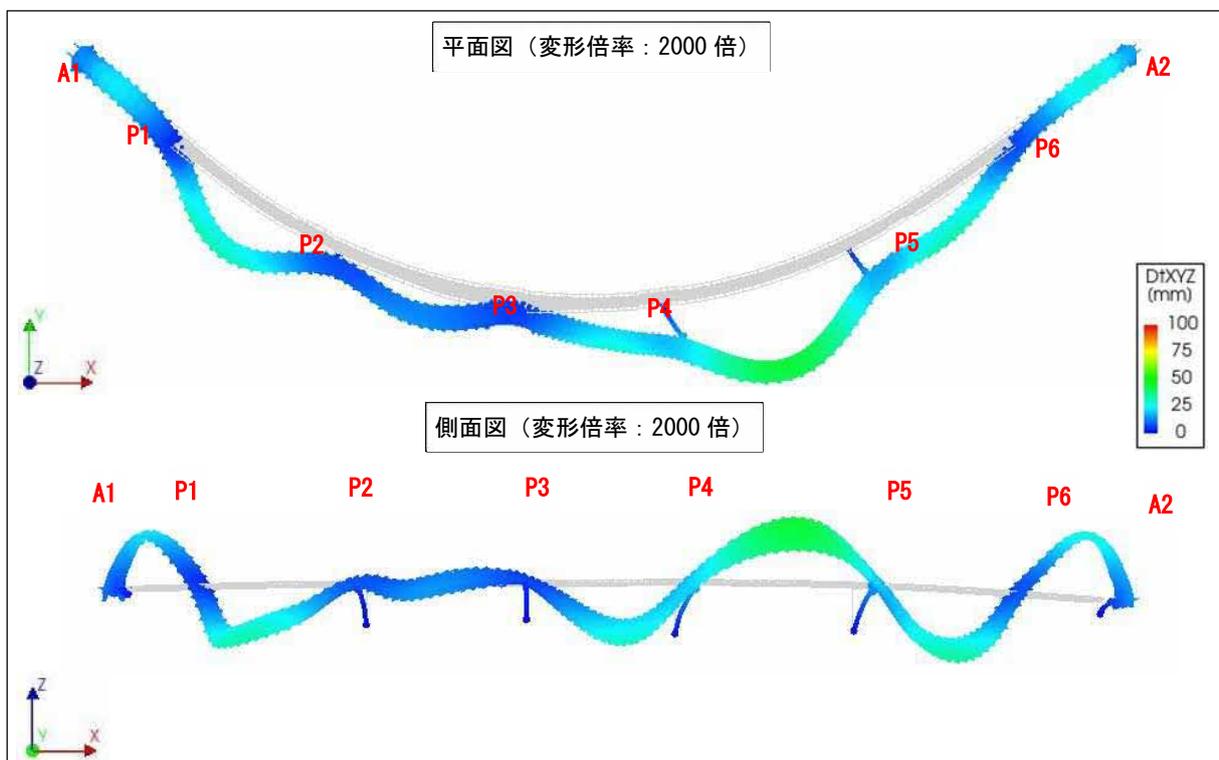


図 2.7-19 【③上下温度差（鋼床版+20°C）】の変形図：CASE-3

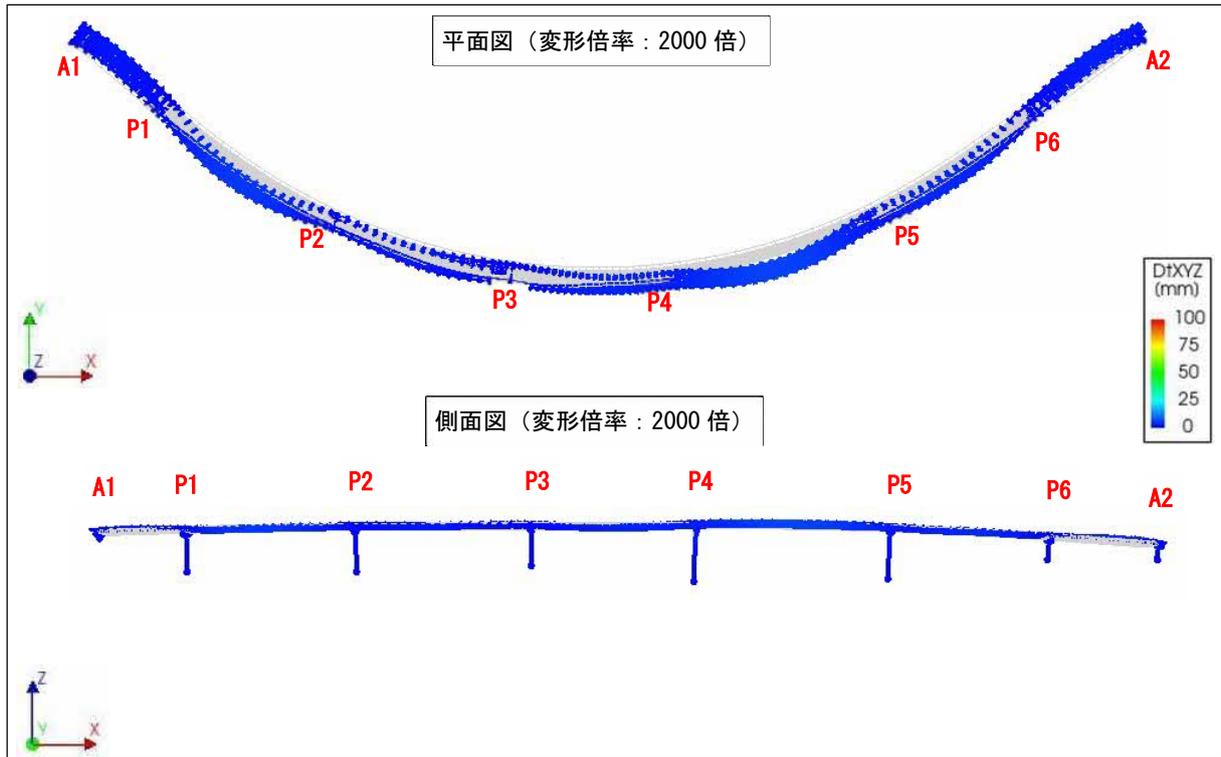


図 2.7-20 【④左右温度差（左ウェブ+15°C）】の変形図：CASE-3

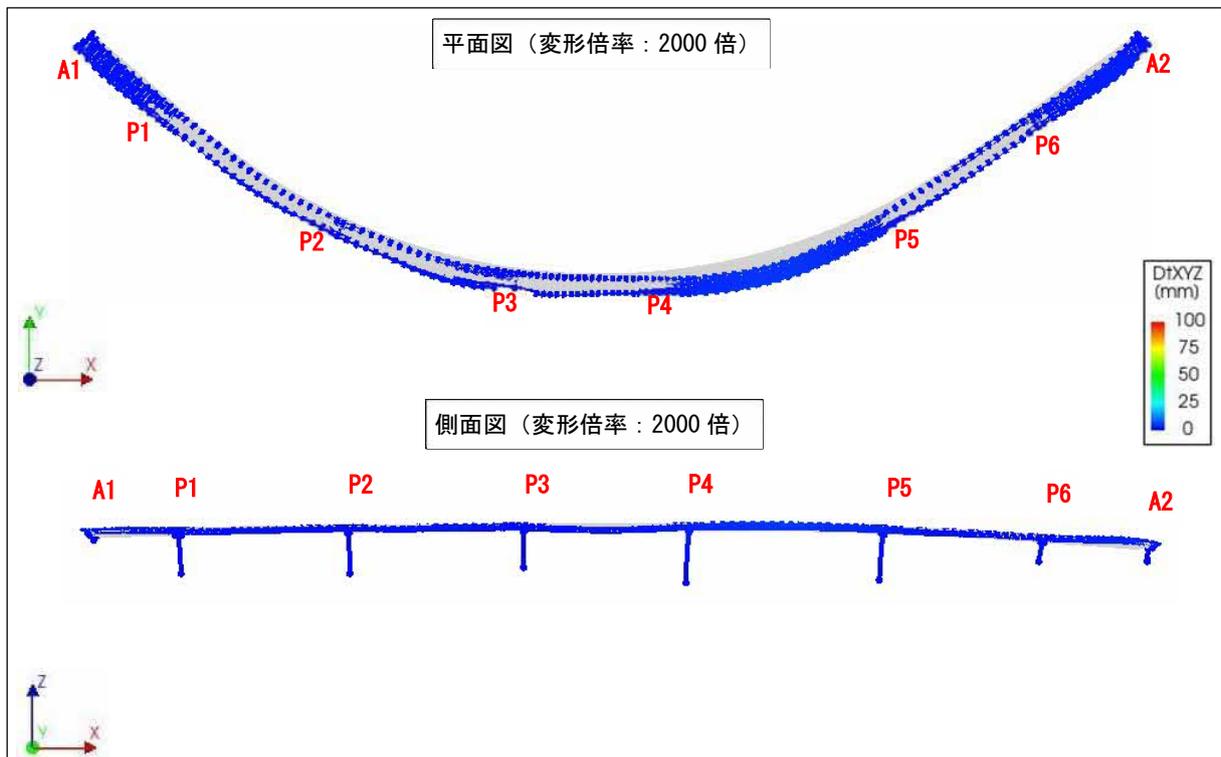


図 2.7-21 【⑤左右温度差（右ウェブ+15°C）】の変形図：CASE-3

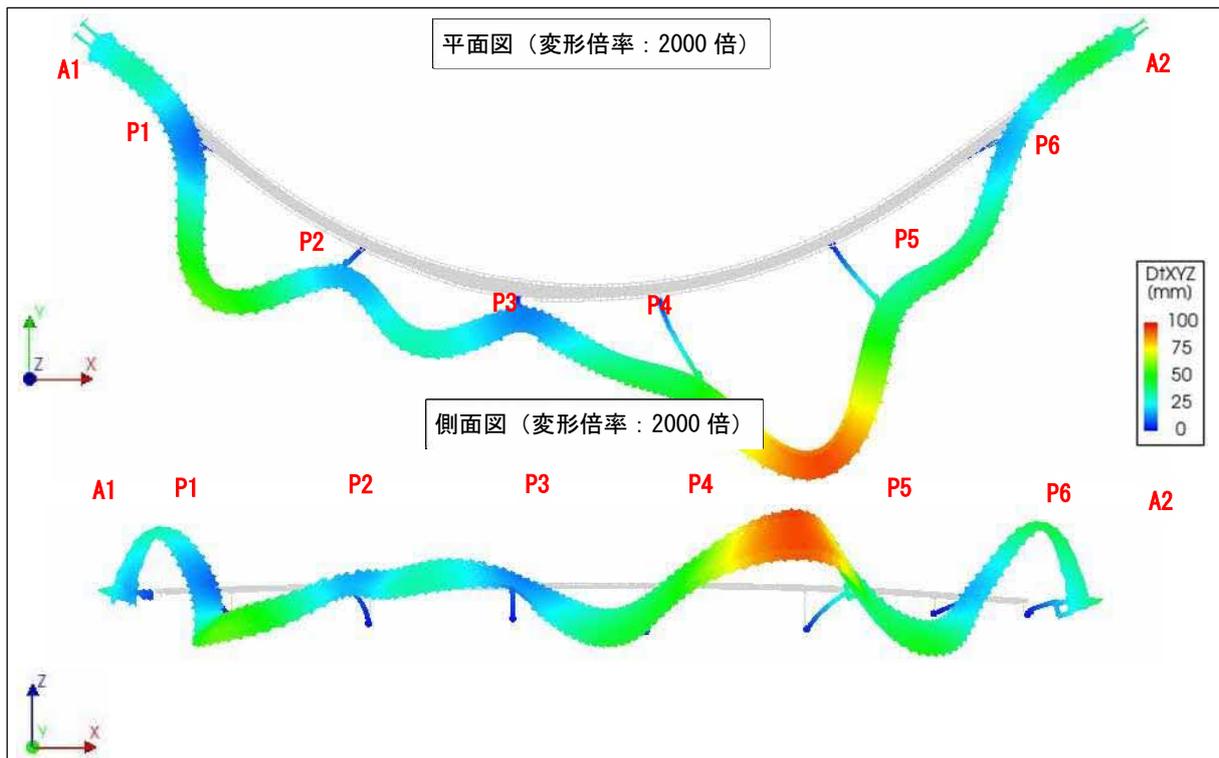


図 2.7-22 【⑥組合せ 1 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C)】の変形図 : CASE-3

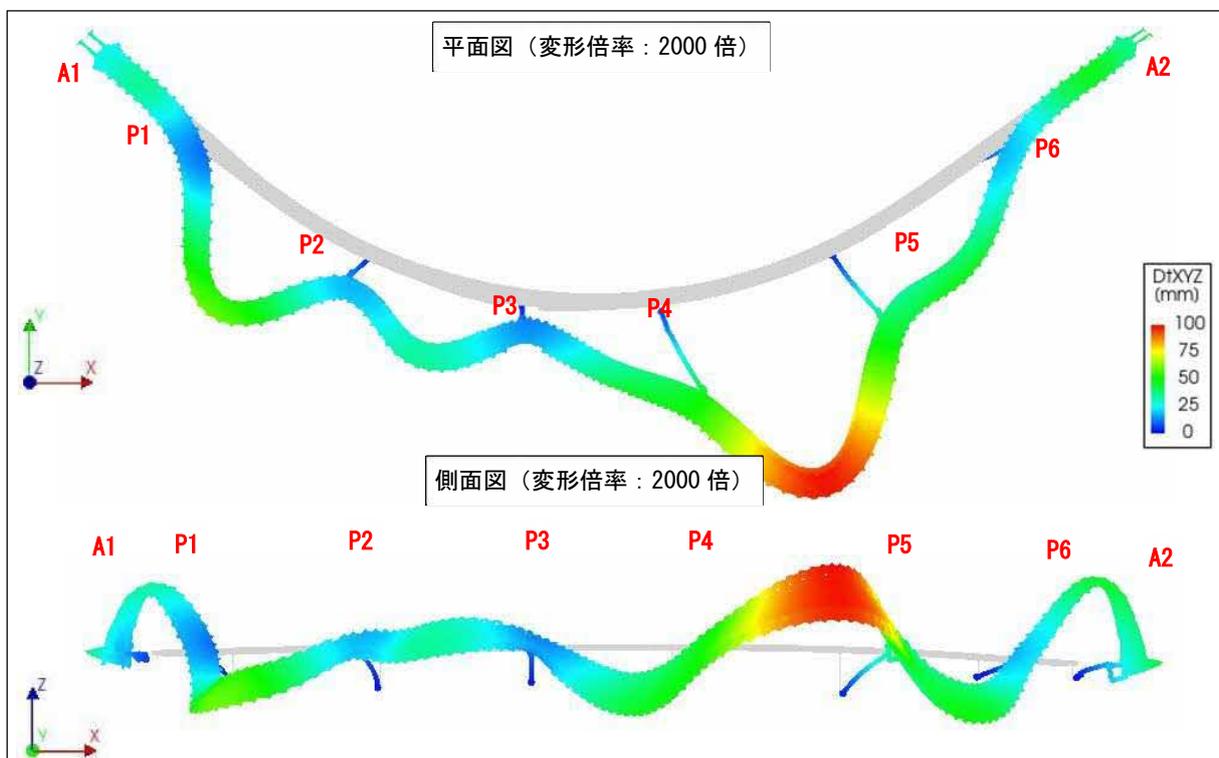


図 2.7-23 【⑦組合せ 2 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ④左ウェブ+15°C)】の変形図 : CASE-3

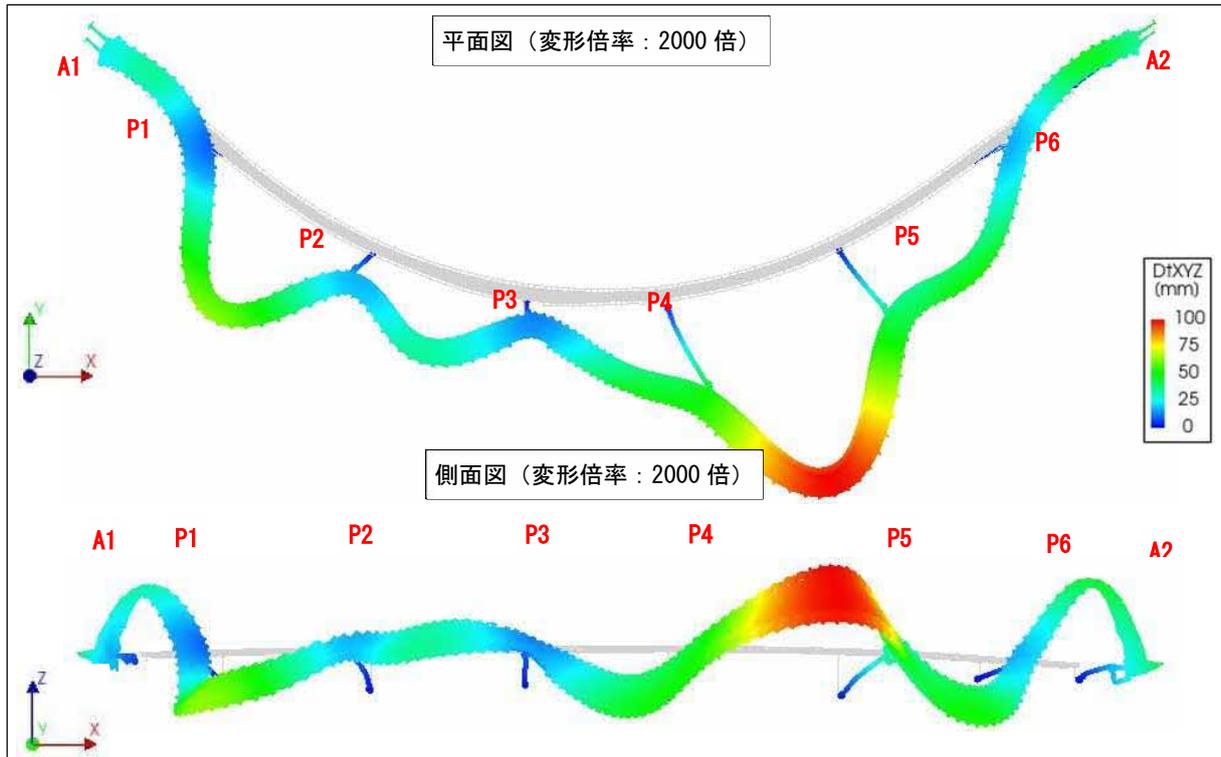


図 2.7-24 【⑧組合せ 3 (②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ⑤右ウェブ+15°C)】の変形図 :
CASE-3

2.7.6 支圧板の応力計算

本橋の支承形式はピボットローラー支承であり、支承高が高いために生じる水平力からの偶力により鉛直力が生じると考えられるため、橋軸方向拘束ばねモデル：CASE-3 により算出した支承反力より、支圧板に生じる応力を算出した。対象は、固定支承である P3 支承より終点側（A2 側）で応急対策を実施していない P4 支承と、死荷重反力の大きい P5 支承とした。

支圧板に生じる鉛直反力は、**図 2.7-25** の考え方により算出した。可動方向にローラーは 2 基設置されているが、このうち、鉛直力が増加する押込み側に着目し、桁方向水平力に対しては、支承高と支承中心位置からローラー位置までの水平距離より算出される鉛直力を付加することとした。桁直角方向水平力に対しては、台形分布で算出した。

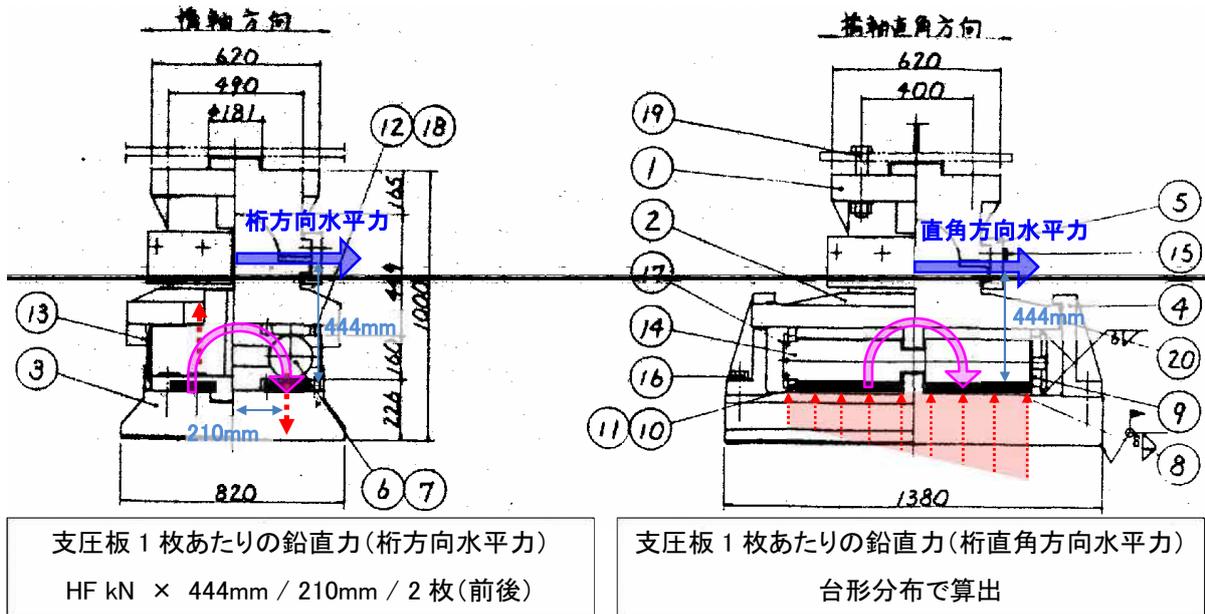
対象とする荷重ケースは、①死荷重、⑨組合せ 4 (①死荷重 + ②全体+10°C + ③鋼床版+20°C)、⑩組合せ 5 (①死荷重 + ②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ④左ウェブ+15°C)、⑪組合せ 6 (①死荷重 + ②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ⑤右ウェブ+15°C) とした。

表 2.7-11 および **表 2.7-12** に温度影響により支圧板に生じる応力を示す。

P4 支承および P5 支承で同様の結果が得られており、水平力が作用する 3 ケースのうち、⑪組合せ 6 (①死荷重 + ②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ⑤右ウェブ+15°C) が最も大きな応力が発生する結果となっているが、各荷重ケースで発生する支承反力に大きな差がないため、支圧板に生じる応力にも大きな差はない。

今回の解析では、⑪組合せ 6 (①死荷重 + ②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ⑤右ウェブ+15°C) は、P4 支承の支圧板に発生する応力の最大値は、 $3,069\text{N/mm}^2$ であり、死荷重の 2.35 倍となり、P5 支承では、 $3,157\text{N/mm}^2$ であり、死荷重の 2.37 倍となる。その他のケースでも同様の値となっていることから、支圧板には局所的には死荷重の 2.4 倍程度の鉛直方向応力が発生する可能性があることが分かった。

【P4 右側支承】



【P5 右側支承】

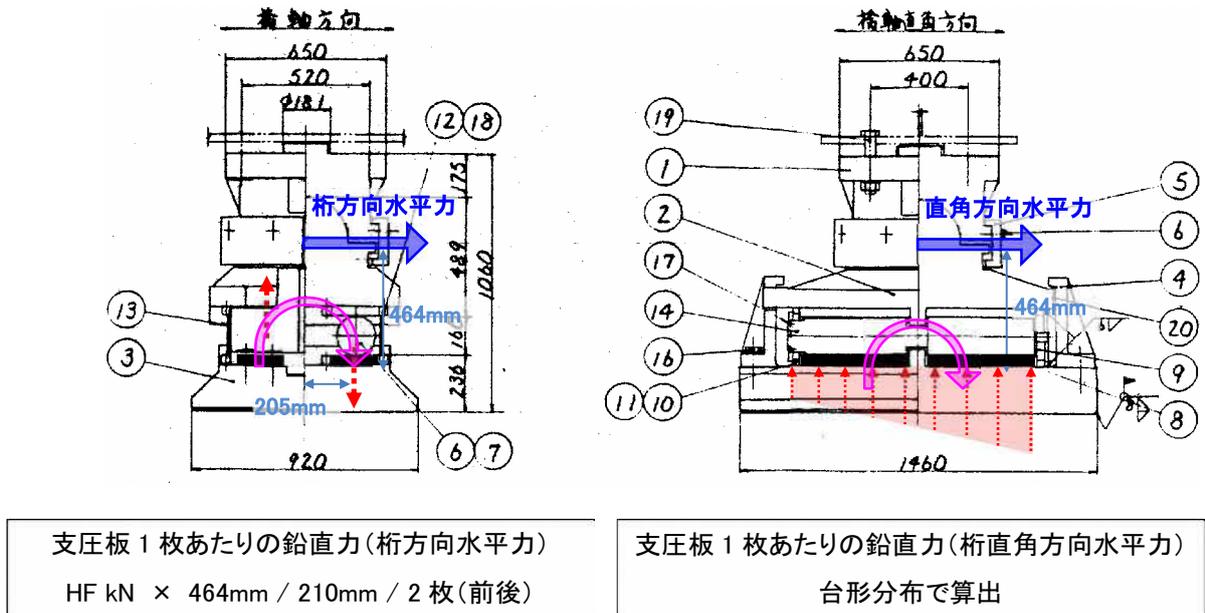


図 2.7-25 水平力により生じる鉛直力 (P4、P5 右側支承)

表 2.7-11 P4 支承の温度影響により支圧板に生じる応力 : CASE-3

対象橋脚		P4橋脚				
ケース		①死荷重 (死荷重のみ)	⑨組合せ4 (①+②+③)	⑩組合せ5 (①+②+③+④)	⑪組合せ6 (①+②+③+⑤)	
荷重の組合せ	①死荷重	○	○	○	○	
	②温度変化(全体+10℃)	-	○	○	○	
	③上下温度差(鋼床版+20℃)	-	○	○	○	
	④左右温度差(左ウェブ+15℃)	-	-	○	-	
	⑤左右温度差(右ウェブ+15℃)	-	-	-	○	
支承反力	鉛直反力 P1	kN	6,624	8,702	8,819	8,802
	桁軸方向反力 P2	kN	0	486	513	531
	桁軸直角方向反力 P3	kN	0	1,366	1,437	1,441
荷重の偏心距離	荷重の偏心距離 e	m	0.000	0.057	0.059	0.058
	B/6	m	0.141	0.141	0.141	0.141
	e<B/6台形分布, e≥B/6三角形分布	-	等分布	台形分布	台形分布	台形分布
底面における最大反力度 (①に対する比率)		N/mm ²	1,306 (1.00)	2,973 (2.28)	3,067 (2.35)	3,069 (2.35)
底面における最小反力度 (①に対する比率)		N/mm ²	1,306 (1.00)	1,271 (0.97)	1,267 (0.97)	1,289 (0.99)

表 2.7-12 P5 支承の温度影響により支圧板に生じる応力 : CASE-3

対象橋脚		P5橋脚				
ケース		①死荷重 (死荷重のみ)	⑨組合せ4 (①+②+③)	⑩組合せ5 (①+②+③+④)	⑪組合せ6 (①+②+③+⑤)	
荷重の組合せ	①死荷重	○	○	○	○	
	②温度変化(全体+10℃)	-	○	○	○	
	③上下温度差(鋼床版+20℃)	-	○	○	○	
	④左右温度差(左ウェブ+15℃)	-	-	○	-	
	⑤左右温度差(右ウェブ+15℃)	-	-	-	○	
支承反力	鉛直反力 P1	kN	7,542	9,235	9,376	9,344
	桁軸方向反力 P2	kN	0	755	784	820
	桁軸直角方向反力 P3	kN	0	1,541	1,616	1,637
荷重の偏心距離	荷重の偏心距離 e	m	0.000	0.057	0.059	0.059
	B/6	m	0.158	0.158	0.158	0.158
	e<B/6台形分布, e≥B/6三角形分布	-	等分布	台形分布	台形分布	台形分布
底面における最大反力度 (①に対する比率)		N/mm ²	1,330 (1.00)	3,032 (2.28)	3,126 (2.35)	3,157 (2.37)
底面における最小反力度 (①に対する比率)		N/mm ²	1,330 (1.00)	1,431 (1.08)	1,433 (1.08)	1,447 (1.09)

2.7.7 支承部詳細解析（参考）

(1) 解析概要

支承部材に発生する応力を確認するため、支承部拘束を考慮した全体解析で算出した反力を用いて、支承部をソリッド要素とした支承部詳細モデルでの解析を行った。以下に解析概要を示し、**図 2.7-26** に支承モデルの概要を示す。

モデル化範囲

- ・モデル化範囲は支承部のみ
- ・上部構造および下部構造はモデル化していない

要素

- ・すべてソリッド要素でモデル化
- ・要素サイズは、一般部では 20mm 程度とした。ただし、ローラーと支圧板の接触部では局部応力を評価するため、ヘルツの支圧幅より 3mm とした
※ヘルツの支圧幅：ローラーの弾性接触領域において支圧板に接触する幅（道路橋 支承便覧、昭和 48 年、日本道路協会）
- ・節点数は約 73 万個

材料構成則

- ・弾性とし、一般的な鋼材の材料特性 ($E=210,000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$)

境界条件

- ・上沓上面の節点は、集約し全体シェルモデルで得られた支承反力を入力
- ・ローラー-支圧板間の節点は、節点共有
- ・下沓下面の節点は、全自由度を拘束

荷重ケース

- ・⑩組合せ 5 (①死荷重 + ②全体+10°C + ③鋼床版+20°C + ④左ウェブ+15°C)
※全体解析で算出
- ・T 荷重 (100kN)

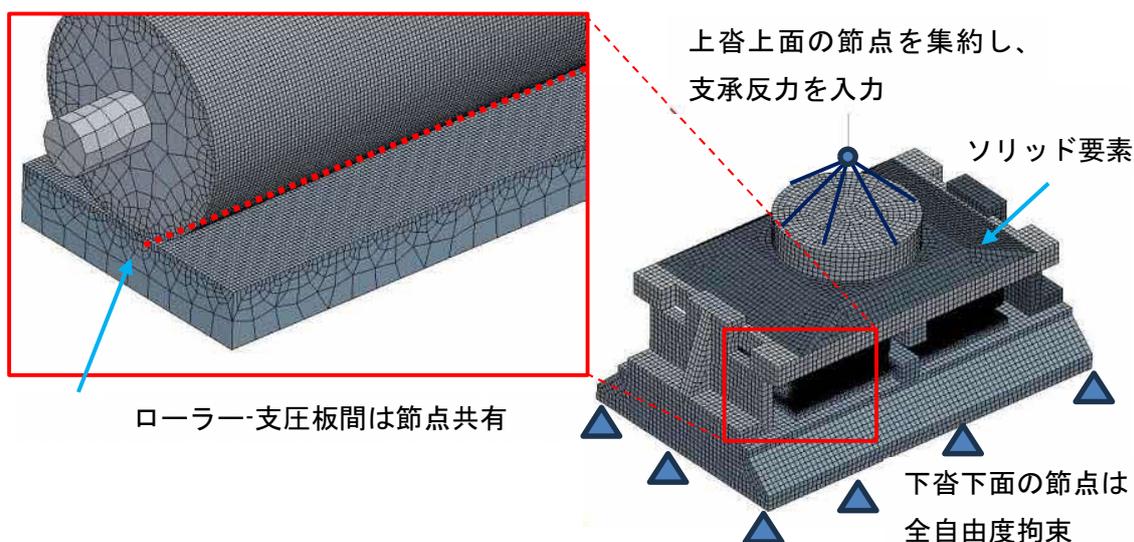


図 2.7-26 支承部ソリッドモデル

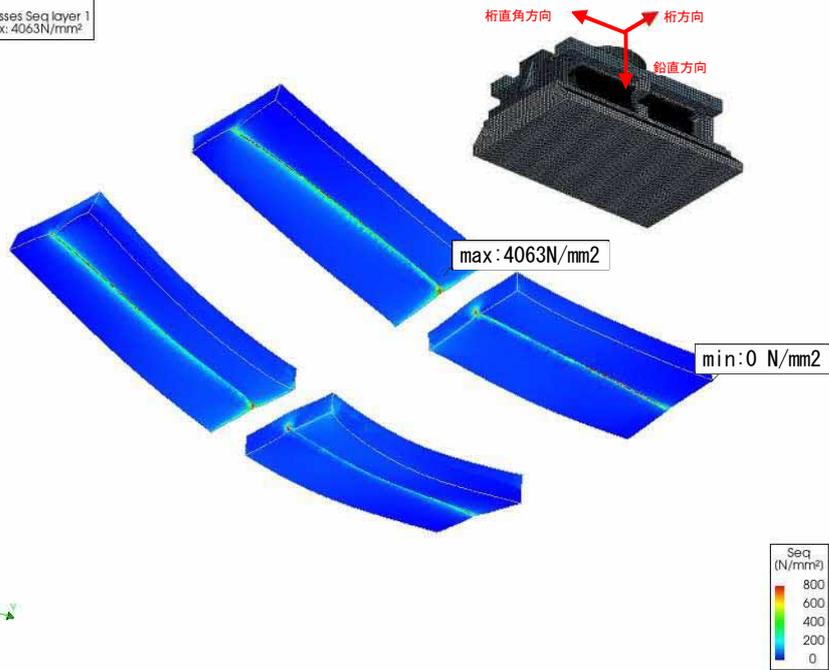
(2) 解析結果

全体モデルで算出した温度による作用力を支承部詳細モデルに与えることで、支承部材に発生する応力を確認した。荷重ケースは、全体解析の結果で鉛直力の増加が大きい⑩組合せ5 (①死荷重 + ②全体+10℃ + ③鋼床版+20℃ + ④左ウェブ+15℃) とした。

上支圧板、下支圧板のミーゼス応力分布を図 2.7-27 に、主応力分布を図 2.7-28 に、鉛直方向応力分布を図 2.7-29 に示す。上下支圧板の結果より、温度変化および温度差により、支圧板とローラーとの接触部においては局所的に非常に大きな応力が発生することを確認できる。また、図 2.7-30 に示すとおり、支圧板の主応力最大付近のコンターを確認すると、大きな圧縮応力が生じており、その近傍に引張応力が生じることを確認した。支圧板毎に発生する鉛直方向応力は、図 2.7-31 に示すとおり、支圧板毎ならびにローラーと接触する位置により違いがあることが確認できる。今回の解析の限られた条件では、支圧板に発生する鉛直方向応力は、PL③の端部で $4,000\text{N/mm}^2$ となっており、局所的に、大きな圧縮応力が生じる。

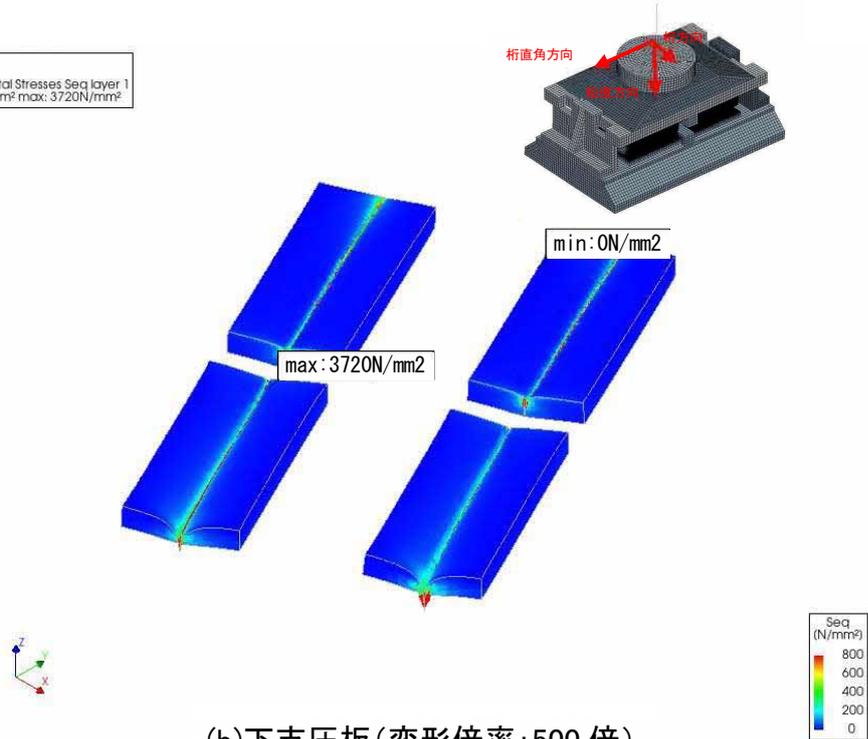
一方で、図 2.7-32 に示すとおり T 荷重 (100kN) を載荷したケースの鉛直力は、温度変化および温度差により生じる鉛直力よりも非常に小さい。

Analysis 1
 Cauchy Total Stresses Seq layer 1
 min: 0N/mm² max: 4063N/mm²



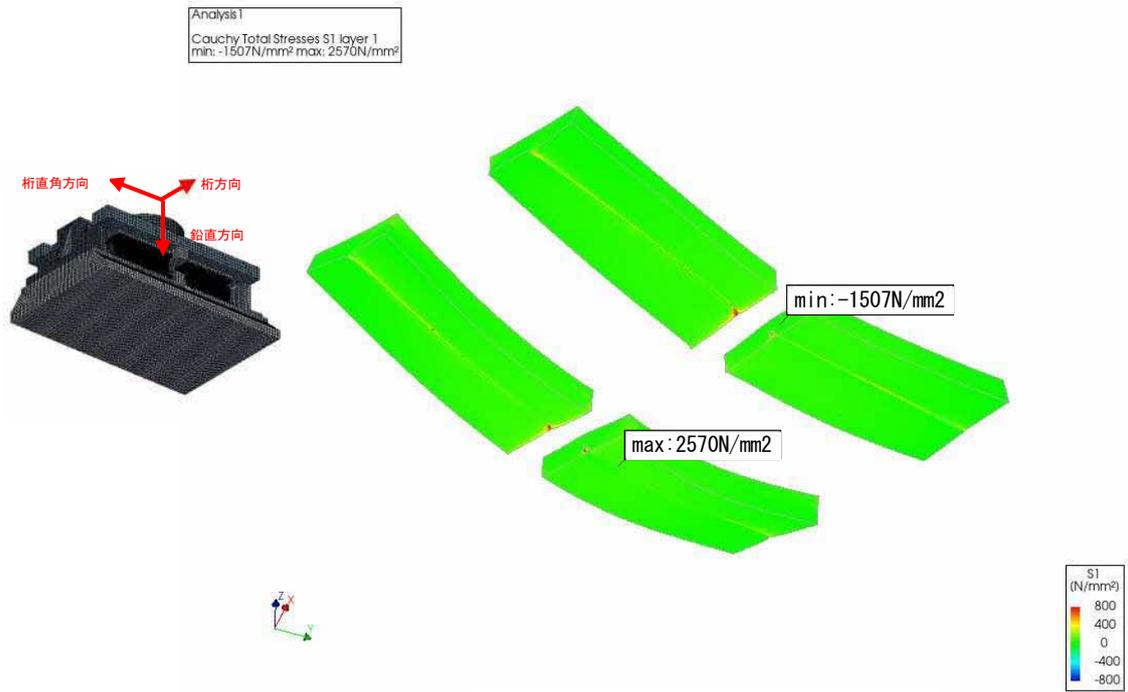
(a)上支圧板(変形倍率: 500 倍)

Analysis 1
 Cauchy Total Stresses Seq layer 1
 min: 0N/mm² max: 3720N/mm²

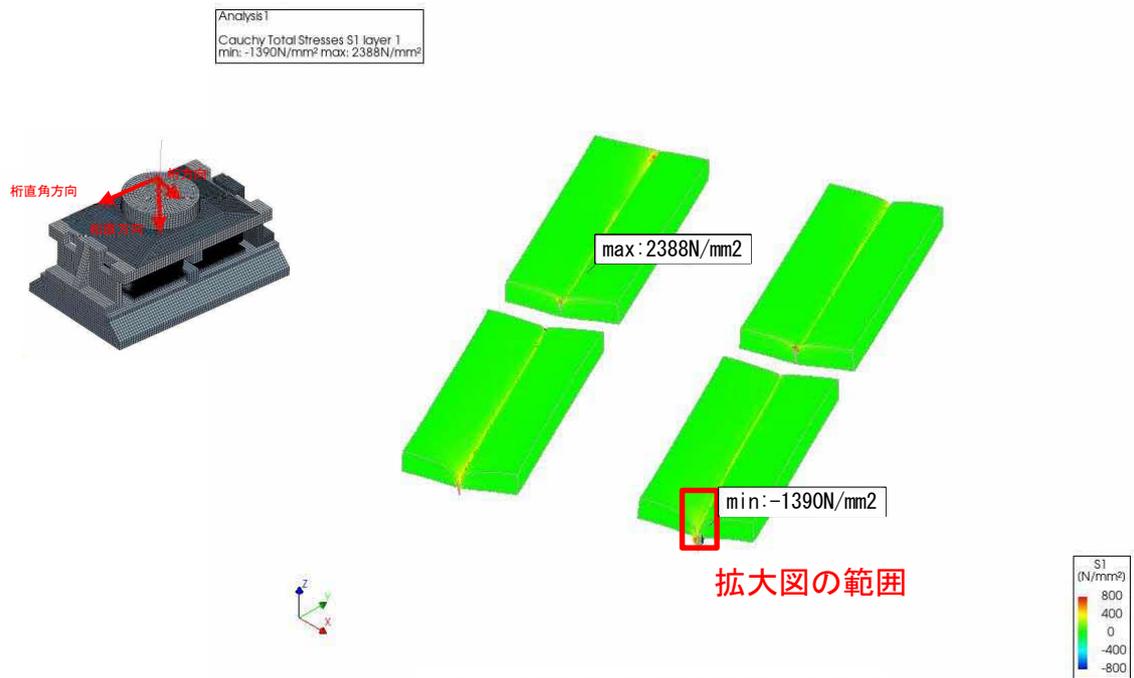


(b)下支圧板(変形倍率: 500 倍)

図 2.7-27 ミーゼス応力分布

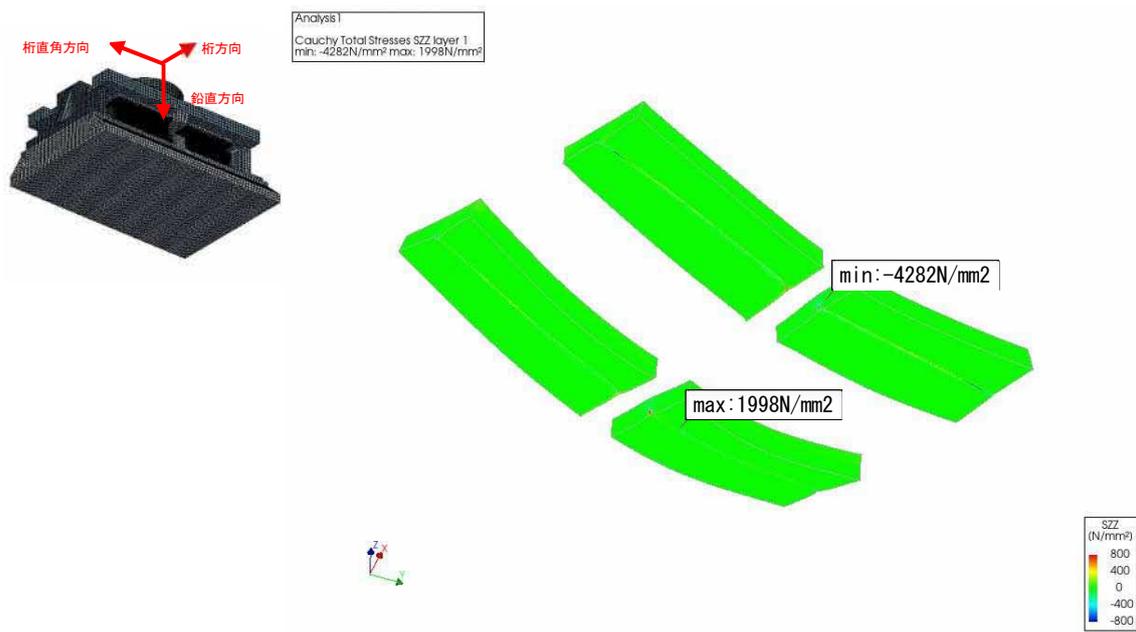


(a)上支圧板(変形倍率:500倍)

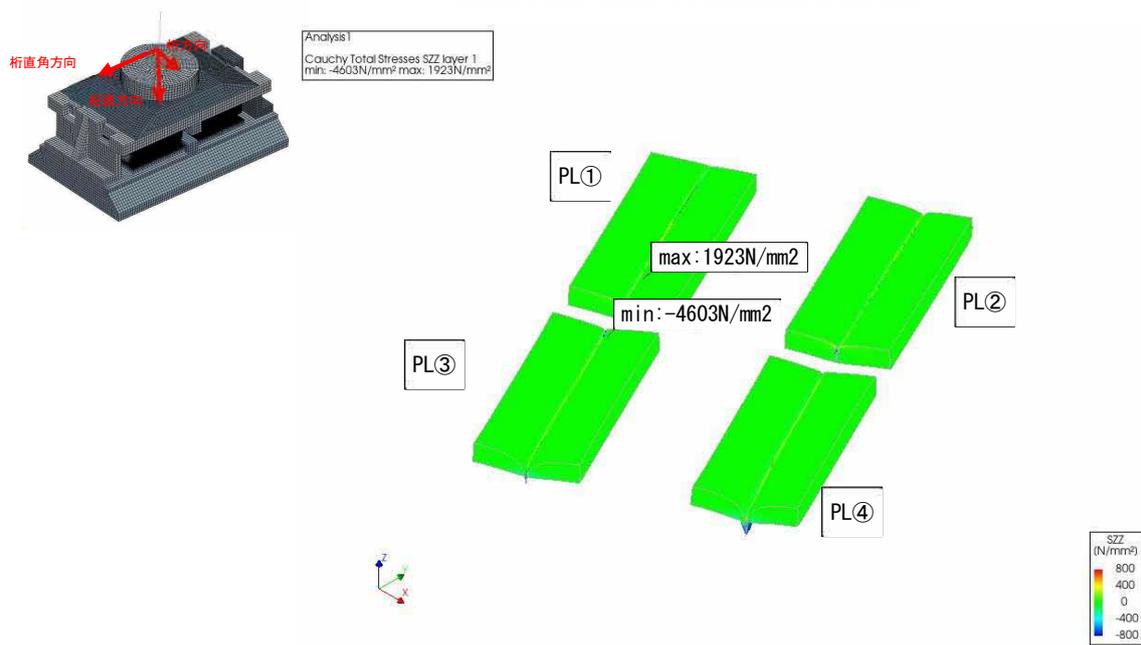


(b)下支圧板(変形倍率:500倍)

図 2.7-28 主応力分布



(a)上支压板(变形倍率:500倍)



(b)下支压板(变形倍率:500倍)

图 2.7-29 鉛直方向应力分布

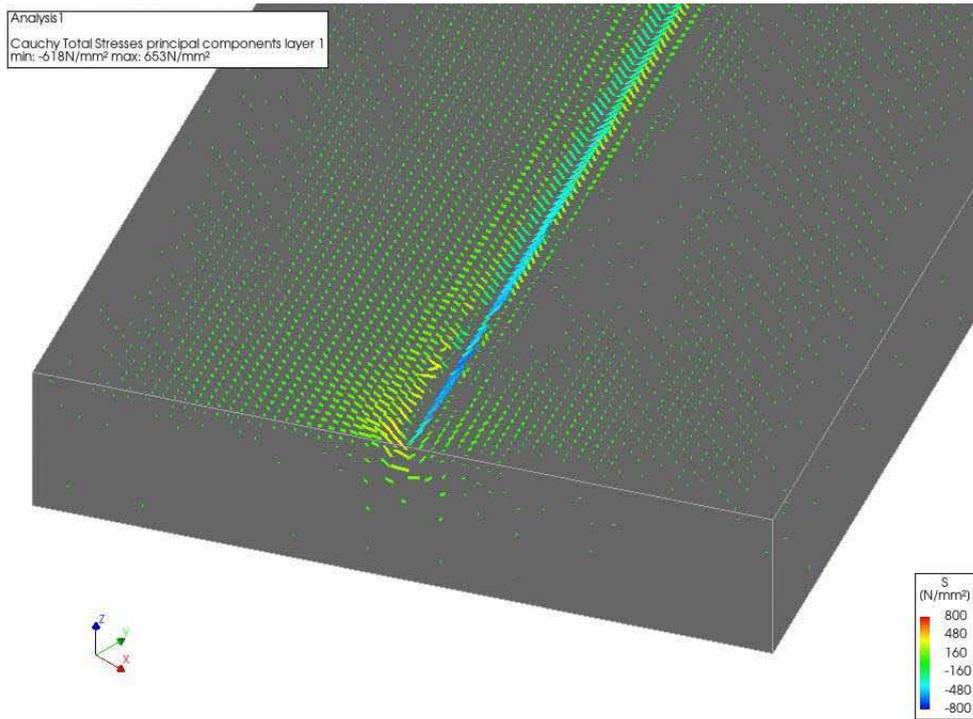


図 2.7-30 下支圧板の主応力最大付近の応力コンター

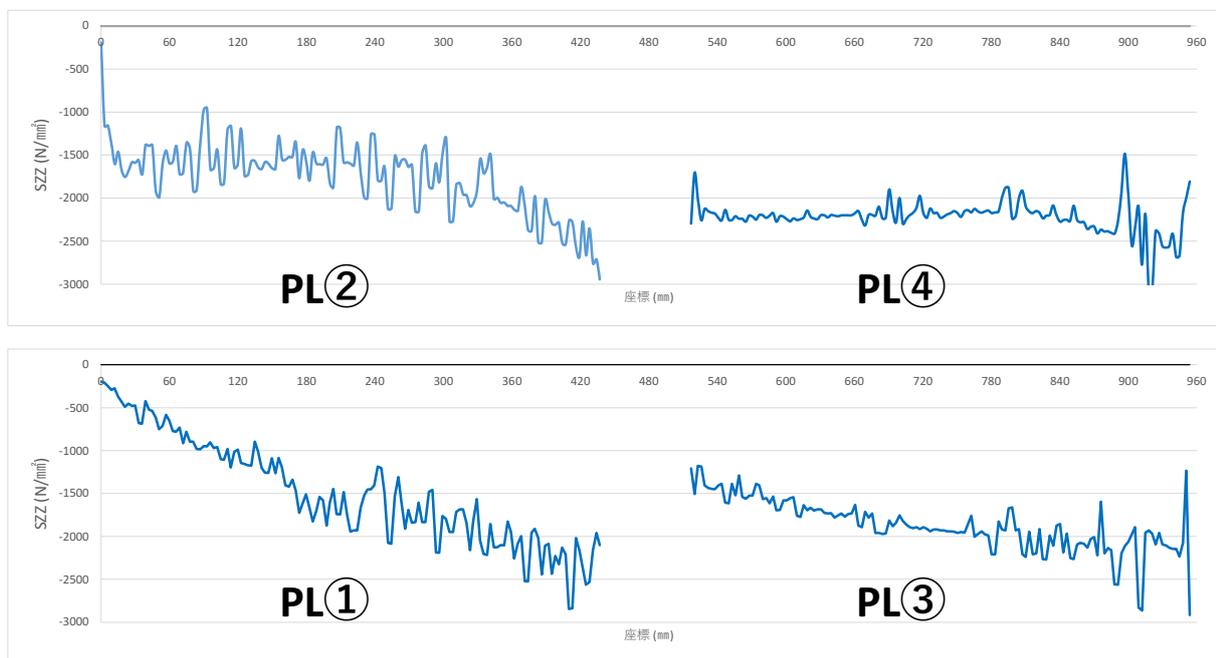


図 2.7-31 下支圧板毎の鉛直方向応力

Analysis1
LL-10f
Cauchy Total Stresses SZZ layer 1
min: -61.34N/mm² max: 22.68N/mm²

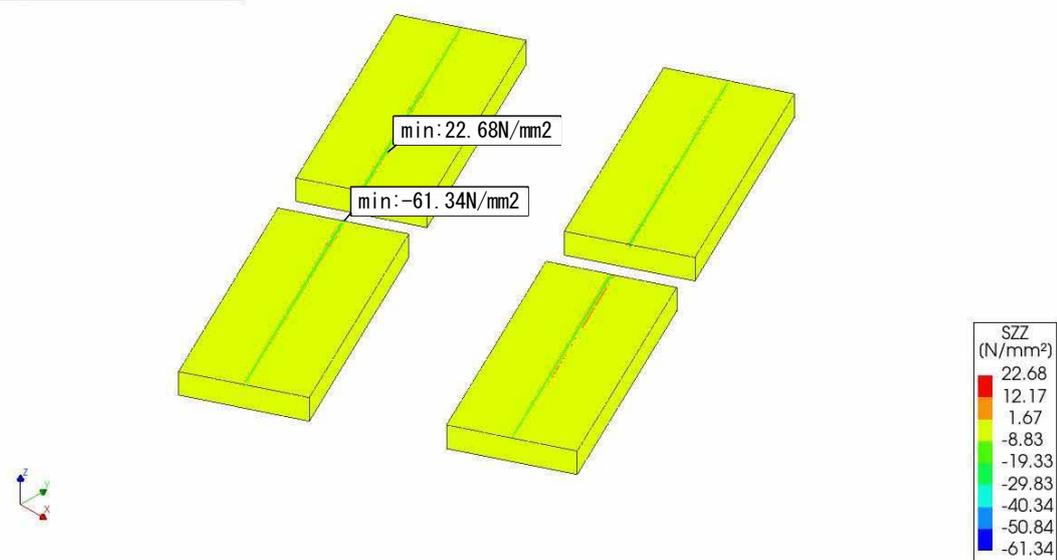


図 2.7-32 下支圧板の鉛直方向応力分布（荷重ケース：T 荷重 100kN 載荷）

2.7.8 考察

当初設計の支承条件（橋軸方向可動、直角方向固定）で数値解析を行った結果、橋軸方向を可動とした橋軸方向可動モデル：CASE-1 では、橋軸方向に水平力は発生しないため、下部構造変位が生じず、全体挙動調査結果と一致しなかったため、拘束状態であったと考えられる損傷前の状態を再現できているとはいえない。

そのため、ローラーとガイド間の直角方向の遊間（ギャップ）を設定し、桁の伸縮によりローラーとガイドが接触するようにした直角方向ギャップ考慮モデル：CASE-2 での全体解析を行った。その結果、各支承部は同時に拘束されるのではなく、固定支承より遠い桁端部に近い下部構造から拘束される傾向があった。また、支承の拘束に伴い、橋梁全体は複雑な変形モードを示すことを確認した。ただし、解析の妥当性を、応急対策の影響が小さいと考えられる P4 橋脚の下部構造変位で確認した結果、数値解析結果と現地計測結果は一致しなかった。これより、ローラーとガイドの接触前から橋軸方向にも拘束の影響があると考えられる。

そこで、支承部にギャップを設けず、橋軸方向に抵抗がある橋軸方向拘束ばねモデル：CASE-3 として全体解析を実施した結果、P4 橋脚の下部構造変位は解析値と現地計測結果で、他のモデルよりは近い値が得られたが、橋軸方向拘束ばねモデル：CASE-3 でも 3mm ほどの差があったため、実際には解析より拘束が強く、大きな支承反力が生じていた可能性がある。よって、ローラーとガイドの接触によらず、常に拘束の影響があると考えられる。

橋軸方向拘束ばねモデル：CASE-3 では、温度差および温度変化の影響により、水平方向だけでなく鉛直方向にも反力が発生することを確認した。本橋の支承形式はピボットローラー支承であり、可動支承の支承高は 1.0m 程度と高く、そのために生じる水平力からの偶力も考慮すると、支圧板には局部的に死荷重の 2.4 倍程度の鉛直力が作用する可能性がある。

また、参考までに実施した支承部をソリッドモデルとした詳細解析において、橋軸方向拘束ばねモデルで算出した反力を作用させた結果、ローラーと支圧板の接触部に大きな応力が発生することを確認した。

なお、支圧板の割れなどの損傷が生じた箇所では、破損した支圧板の割れにローラーが固定されることが考えられ、その結果拘束が強くなり、損傷が進行したものと考えられる。

以上のことから、温度変化および温度差によりローラーと支圧板の接触部近傍に発生する大きな応力が、日々繰り返すため、損傷はいずれ生じるものであったと考えられる。なお、ローラーおよび支圧板の S-N 曲線について確立した知見はない。

3. 調査および解析の評価

観察の結果、「2.1.2 損傷位置と状態」に示した支承の損傷は、P4 橋脚の右側支承を除くすべてピボットローラー支承で生じており、その損傷は、ピニオンギアの脱落、ピニオンギアとローラー胴部を結ぶまたはローラー胴部の中間の軸部の付け根部の破断、ローラーに沿った向きの支圧板の割れに大別された。ピニオン、ローラー、支圧板ともに、顕著な腐食は見られなかった。

また、カバープレートも含めた外観と、カバープレートを外して内部を観察した結果の比較からは、「2.1.2 損傷位置と状態」にまとめたように、カバープレートが外側に膨らんでいたり、カバープレートを固定するボルトが脱落していたりする場合、カバープレート内部で支承に損傷が生じているという関係性が見られた。この関係性を前提に過去の定期点検結果を調べると、過去の定期点検では支承の損傷は記録されていないものの、2015年（H27）の定期点検にて撮影された、P5 橋脚、P6 橋脚上の支承の写真からは、カバープレートの異常が疑われることから、これらの支承では、2015年（H27）にはすでに損傷が生じていた可能性が高い。

「2.4 支承の損傷状態調査」に示したように、ローラー胴部には変形などは生じていなかったものの、支承によっては、胴部の端部がガイドと接触している様子も見られた。また、支圧板についても、表面の錆の状態等の色調の違い等から判断すると、支圧板に割れが生じているローラーの可動幅も限定的であった。

破面観察では、ローラー軸部では、表面付近に起点を有するリバーパターンが見られた。このことから、繰り返し作用する力により脆性的な破壊が生じたと考えられる。支圧板は、ローラーと接触する表面側で材料が剥離し、さらに深さ方向にはビーチマークが確認された。このことから、支圧板では、表面側から深さ方向に徐々に損傷が進行していき、最終的に破断したと考えられる。これに併せて、断面観察および超音波探傷試験では、ローラーや支圧板の断面内部での割れや傷が見られなかったことから、製作時からの内部の割れや傷が支承部損傷の直接の原因であった可能性は除外できると考えられる。

以上からは、可動支承が用いられているものの実態としてローラーはほぼ移動しておらず、支承は軸方向にも固定支点として挙動していたものと考えられる。そして、支承は大型の箱桁の支点であり、常に大きな鉛直力が作用していること、ローラー胴部とガイドが接触したことや支圧板の表面で損傷が進行したことにより、ローラーが軸方向に均等に鉛直反力を受けられず、ローラー軸部の付け根では、負荷が大きくなるなどで、脆性的な破断が生じた可能性がある。また、支圧板は、橋の死荷重状態でも支承ローラーから大きな鉛直力を受けているだけでなく、ローラーが実質的に移動できなかったことで、可動域が限定的となり反力の変動が繰り返し生じたことで、徐々に断面方向に損傷が進行し、破壊に至ったと考えられる。

このように、桁からの大きな作用力や、鉛直または偏心反力の繰り返しが破壊に影響を与えたと考えられるが、過去の荷重の履歴を調べると、「2.2 建設時の設計・施工出来形・維持管理履歴」に示したように、突発的な地震、暴風、顕著な高温などによる上部構造からの大きな偏心、傾斜荷重の作用が原因になったとは考え難い。また、大型車の通行量からは車両通行の繰り返しによる疲労損傷とも考え難い。記録の範囲では、ダンパーの損傷は確認できたものの、風による振動の継続が問題になったことはなく、風の振動の継続による破壊も考え難いことが分かった。

これらのほか、日々変動し、繰り返し作用する影響として温度の影響が考えられた。本橋は曲線橋であることから、温度変化や桁断面の温度勾配により橋は軸線方向に伸び縮みするだけの挙動にとどまらないこと、また、支承の設置方向（主桁接線方向）と桁の伸縮方向（各可動支承から固定支承である P3 橋脚を結ぶ方向）が一致しておらず、幾何学上、支承の可動方向のみに可動となり難いことは、支承に大きな反力の変動を繰り返し生じさせるだけでなく、可動支承が軸方向にも固定支点のように挙動していたこととも符合する。

温度影響による橋の全体挙動の推定を行うために、本橋では全体挙動の調査を行った。ただし、損傷前または応急対策前とは、応急対策後の支承条件は異なっていることから、今回計測した挙動と数値解析結果を直接比較できない点は注意を要する。

- ・温度分布の計測結果は、1 日の中で全体の温度変化は 10～15℃程度、床版とウェブ、下フランジとの温度差は最大で 20℃であった。また、左側ウェブと下フランジ、右側ウェブとの温度差は最大 13℃であった。また、径間毎に各部材への日射の時刻が異なることを確認し、各径間や各部材への日射の時刻により、温度差が生じる。さらに、日射の影響が小さく部材の温度が低くなる冬期には温度差がさらに大きくなると考えられる。
- ・桁伸縮量調査では、温度変化に伴った曲線の外側への桁の変形が支点部で直角方向に拘束されることからひずみが発生し、さらに左右のウェブで差異が生じていた。また、床版および下フランジでは、上下の温度差による変形が連続桁中間支点で拘束されるため、ひずみが発生すると考えられる。
- ・支承反力を計測した結果から、温度変化に応じて支承鉛直反力が変動し、同一橋脚上の左右支承の反力比率も変化していた。
- ・下部構造天端の変位を計測した結果、可動支承を有する橋脚や支承の応急対策が行われた橋脚で、桁接線方向（橋軸方向）に下部構造は変位していた。下部構造の変位は支承部が拘束されることで下部構造に水平力が伝達していると考えられるため、支承は、可動状態というよりは固定に近い状態にあると考えられる。
- ・左右の支承の変位量にずれが生じており、応急対策を行っていない支承では、左右の支承の変位量に最大 1.7mm のずれが生じていた。応急対策を行った支承では、ローラーと支圧板を外し下咎と底板の間に PTFE 板を置くことで、PTFE 板位置では比較的自由に変位できる状態であったが、左右の支承の変位量にずれが生じていた。また、支承変位量は、固定支承である P3 橋脚から離れた支承ほど大きかった。

応急対策を実施したことで損傷前または応急対策前に比べて支点拘束条件は変わってしまっているが、応急対策後では支承は移動も生じているものの、半固定のような状態であり、下部構造にも支承可動方向の力が伝達されていた。

以上から、特に、上部構造に温度変化や温度勾配を与えたときの橋の挙動について、数値解析により把握することにした。数値解析は、上部構造をシェル要素でモデル化し、立体的な挙動を捉えるとともに、支点反力も各支承位置で算出できるようにモデル化した。また、可動支承が固定支点のように挙動するのであれば、橋の伸縮挙動は下部構造が変形し吸収することになるため、下部構造についても、その剛性が考慮できるようにモデル化した。ただし、支承を桁接線方向に可動できその他方向には固定である条件で数値解析を行うと、与えた条件どおりに、桁は支

承位置で桁接線方向に可動となる。一方で観察では、ローラー胴部端部がガイドに競るなどしてローラーが可動できる範囲は極めて限定的であったこと可能性が高い。具体的には、「2.7.4 直角方向にギャップを設定し橋軸方向固定とした全体解析」に示したように、ローラーとガイド間に直角方向の遊間（ギャップ）を設定し、桁の伸縮によりローラーとガイドが接触するようにした支承をモデル化した。しかし、直角方向のギャップを設けたモデルでは、下部構造に生じる変位が解析結果と現地計測結果で一致しなかった。そのため、支承部にはギャップを設けず、当初から橋軸方向に抵抗があるモデルを最終モデルとした。

以上のモデルに対して、死荷重、温度変化+10℃、床版と桁の温度差に+20℃、左右ウェブの温度差+15℃を与えて、橋の挙動を計算した。計算値を見ると、支承の動きは拘束される傾向がみられ、支承の拘束に伴い、橋梁全体も複雑な変形形状を示し、支承反力も設計計算値よりも明らかに大きくなった。支圧板に生じる局所的な反力の計算値は、鉛直反力のうち、死荷重の寄与分は40%、温度の影響は60%である。このように、数値解析では、本橋の支承は非常に高い応力下に繰り返しさらされた可能性を示した。

直角方向のギャップを設けたモデル：CASE-2で支承毎の挙動を見ると、温度を漸増させたときに、すべての橋脚上の支承で同時にローラーとガイドが接触し、支承の動きが拘束されるのではなく、基本的には固定支承を有するP3橋脚よりも離れた位置の下部構造上の支承から順番に、可動できない拘束状態へと移行する傾向があった。実際の損傷でも、固定支承を有するP3橋脚よりも遠い位置の下部構造上の支承で損傷が大きい傾向がみられたことと符合している可能性がある。

各支承の反力を詳しく見ると、死荷重により大きな鉛直反力が生じ、温度変化に対しては、橋軸直角方向のみならず橋軸方向にも水平力が発生する。そして、拘束状態へ移行する。また、床版と桁の温度差により、計算上、桁は上下にたわみ、その結果、支承には鉛直反力の変動が生じる。実際には、全体の温度変化や水平方向からの日射の影響を受けることも考えて、死荷重、桁断面の上下方向の温度差だけでなく、全体温度変化および左右のウェブで温度差を与えると、桁に上下方向の変位分布が生じるだけでなく、桁曲線の内側ウェブの温度が高いときは桁の支間中央部が水平方向へ変位し、ねじれるような挙動を見せた。このとき、全体温度変化、桁断面上下の温度差、桁断面左右の温度差を考慮したときに生じる支承の鉛直反力は死荷重反力の36%程度であり、結果として、ローラーや支圧板に生じる反力の計算値は死荷重反力の237%であった。

以上の損傷の観察結果、破面観察結果、全体挙動調査、数値解析結果からは、損傷の主な要因の1つとして、少なくとも、桁形状と支承の設置方向の不適合や箱桁断面の上下左右面の温度勾配の影響の組合せが挙げられる。本橋は規模の大きな曲線橋であり、支点毎にローラーの可動方向を桁接線方向と一致するように支承を設置しているものの、各支点での挙動は接線方向と一致せず、温度変化や温度勾配を受けて伸縮しようとする桁の動きに対して支承の可動方向が互いに干渉し合い、結果的にすべての支承が固定支点のような状態であったと考えられる。また、上部構造の規模が大きく、ローラーも支圧板も桁の死荷重だけでも常に大きな鉛直反力下にあること、支承位置で桁の動きが拘束された状態で桁断面の上下左右の温度勾配により曲線橋にねじりが生じ、支承には鉛直反力の変動が生じること、これが長年にわたり繰り返されてきたことが、

支圧板の損傷の原因である可能性が疑われる。計算モデルでは考慮できていないが、一旦支圧板が損傷すると、ローラーが受ける反力のローラー軸方向の分布も偏ることや、支承は水平方向の移動に対してさらに固定条件のように挙動することで、他の支承にも悪影響を与えやすくなると考えられる。また、この見立てが成立しているとすれば、まだ損傷が生じていない支承でもいずれは同様の損傷が生じることも想定されることも、復旧にあたって考慮すべきと考えられる。

なお、支承の材質を調べた結果からは、受け入れ時の材料検査結果に問題はないものの、支圧板では、内部と表面の硬さに差がなかった。道路橋支承便覧では、支圧強度を高めるためにローラーや支圧板の表面に焼き入れし、鋼材の内部に比べて表層を硬くすることとなっているが、超音波計測結果からは支圧板内部の割れや傷が検出されなかったこと、また、上述のように破面観察結果でも表面からの進行的な損傷の累積の結果として破断に至ったと考えられることから、内部と表面の硬さに差がなかったことは、今回の損傷の主たる要因ではなかったと考えられる。ただし、圧縮残留応力が十分ではないため、支圧板はローラーと比べ損傷が発生しやすい状態であった可能性はある。以上の結果において、他の大型橋のローラー支承の維持管理にも反映すべき知見として以下のことが挙げられる。

- ・比較的大型の橋や1支承線上に2点で支えているローラー支承のローラーや支圧板は、比較的大きな死荷重反力の下で、反力の変動を受ける。また、曲線橋でローラー支承が用いられていると、橋によっては、本橋と同様に、設計では可動と想定している支承が結果的に幾何学的に拘束されてしまうことがある。以上のような状態で、日々の温度変化の影響で支承反力に大きな変動が生じると、死荷重反力との組合せによっては、ローラーや支圧板に累積損傷または進行性の破壊が生じることが生じる可能性がある一方で、ローラーや支圧板のSN線に実験結果などに基づいて提案されたものがあるわけではない。したがって、定期点検においては、そのような損傷が生じる可能性も念頭に入れながら、支承部の点検を行う必要がある。
- ・今回の損傷例からは、上記の特徴がある橋などでは、ローラーをカバーするカバープレートを外すなどし、内部の損傷の有無を確認することが、早期に損傷を発見し、橋の安全性の確保のための対策を行う上で重要であると考えられる。その他の橋でも、外観にて、カバープレートに膨らみ、ボルトの破断などの異常がみられる場合やピニオンギアの損傷がみられる場合には、カバープレートを外すなどし、内部のローラーや支圧板の状態を把握するのがよいと考えられる。
- ・今回のように、応急対策などで、対策前と後で支点条件が異なっている場合には、モニタリングを行っても、応急対策前の橋の挙動を直接的に知ることができないので、計測結果の解釈に注意を要するとともに、モニタリング結果に基づいて数値解析を行うという考えに固執せず、むしろ同時並行的に支点条件をパラメータにした数値解析による検討を行うことが損傷の原因につながる橋の挙動を推定するうえで合理的な手順となる場合がある。

4. 恒久対策方針

4.1 損傷原因のまとめと復旧に向けた提言

上部構造は、温度変化の影響を受け複雑な挙動を示し、支承に拘束が生じ、下部構造に力が伝達することを確認した。よって、長大で特殊な断面形状の曲線橋という本橋特有の条件により、橋軸方向可動という設計での想定と異なり、支承部に橋軸方向および橋軸直角方向に拘束が生じ支承部材に応力集中が発生し損傷したものと考えられる。

恒久対策に向けては、支点到求められる機能の回復を行うとともに、温度変化により支承部が拘束されて支承部材内で応力集中が生じ、それが繰り返し作用したことにより損傷が発生したという損傷原因に対して、損傷の発生をできる限り防止できると考えられる支承部構造を採用する必要がある。

4.2 モニタリング結果を受けた恒久対策での留意点

想定される損傷要因、当初の設計やこれまでの対応を考慮したうえで、恒久対策実施に向けた方針の提言を行うにあたり、熊本県より恒久対策実施に対する方針が以下のとおり示された。

【熊本県の方針】

現行の耐震基準（レベル2地震動）を満足する橋となるように上部構造、下部構造および支承部の耐震設計を行う。橋の重要度はA種の橋として、耐荷性能は永続および変動作用に対しては、荷重を支持する能力に影響を及ぼすような損傷が生じない状態にとどめ、大規模地震の作用等の偶発作用に対しては落橋しない状態（橋の耐荷性能1）とする。損傷した支承の交換を優先して実施し、下部構造の耐震補強は順次行う。

熊本県の方針を踏まえたうえで、委員会では以下の通り恒久対策での留意事項を示した。

- ① 温度変化に対して方向性を持たない支承構造とすること。
- ② 支承交換によって拘束条件を変更する場合は、既設の上部、下部、基礎構造および新設の上下部接続構造（支承取付構造）に与える影響についても十分に検討すること。
- ③ 耐震設計において、レベル1地震動に対する応答も確認すること。
- ④ 温度変化、部材間温度差の作用によって橋梁全体が複雑な挙動を示すことが数値解析により明らかであり、これらの影響について検討すること。特に温度差については、曲線橋であり、支承高さが高いなどの特徴を有する本橋においては、上下フランジのみでなく左右のウェブの温度差が軸力や回転モーメントの変動に無視できない寄与をしていることに留意を払うこと。
- ⑤ 将来の耐震補強検討を行う際に手戻らないように、支承部の対策を決定すること。

4.3 熊本県の復旧方針に基づいた留意点の提言

4.3.1 支承構造に関する提言

委員会からの恒久対策方針に対する助言を受けて、熊本県より支承構造について以下のとおり方針が示された。

【熊本県の方針】

温度変化に対して水平方向に拘束しない支承として、地震時水平力分散ゴム支承に交換する。ただし、P3 橋脚のみ、既設ループ橋との接続を踏まえ、全水平方向固定ゴム支承（現況と同じ拘束条件）とする。検討は橋脚補強を含めて実施し、本対策を実施することで、橋の耐荷性能 1 となる。

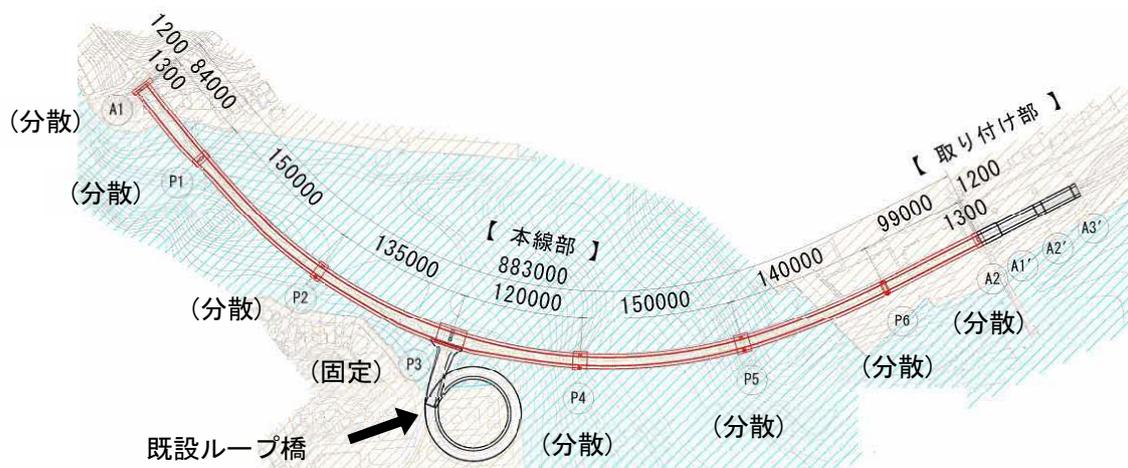


図 4-1 熊本県の方針による支承拘束条件

熊本県より、交換する支承構造の方針が示されたことから、委員会では以下の提言を行った。

- ① 既設部材が健全な状態であることを解析の前提としているのであれば、適切に点検を行い、損傷部は適切な対策を実施すること。
- ② 既設ジャッキ受台を利用した応急対策が可能であったこと、支承の損傷が生じたことで桁の転倒、落下が懸念されたことを踏まえ、フェールセーフ機能の確保について検討すること。

4.3.2 支承取付構造に向けた提言

本橋には、現況支承と箱桁下フランジの間に支承取付構造が設置されており、交換する支承はレベル2地震動に対応するため、支承取付構造に対しても橋軸方向および直角方向の作用への対策が必要となる。委員会では支承取付構造について以下の提言を行った。

- ① 支承交換に伴う支承取付構造と上部構造への接合方法は、ボルト接合および溶接接合が考えられる。
- ② ボルト接合では、要求される性能を満足できるか確認すること。
- ③ 支承取付構造に与える変動作用および偶発作用の影響は、数値解析を用いて確認すること。
- ④ 溶接接合では、疲労に関して可能な限り懸念を低減できるように、桁と取り付け構造が接触する面積を広げ、溶接線に沿った応力をできるだけ低減させること。

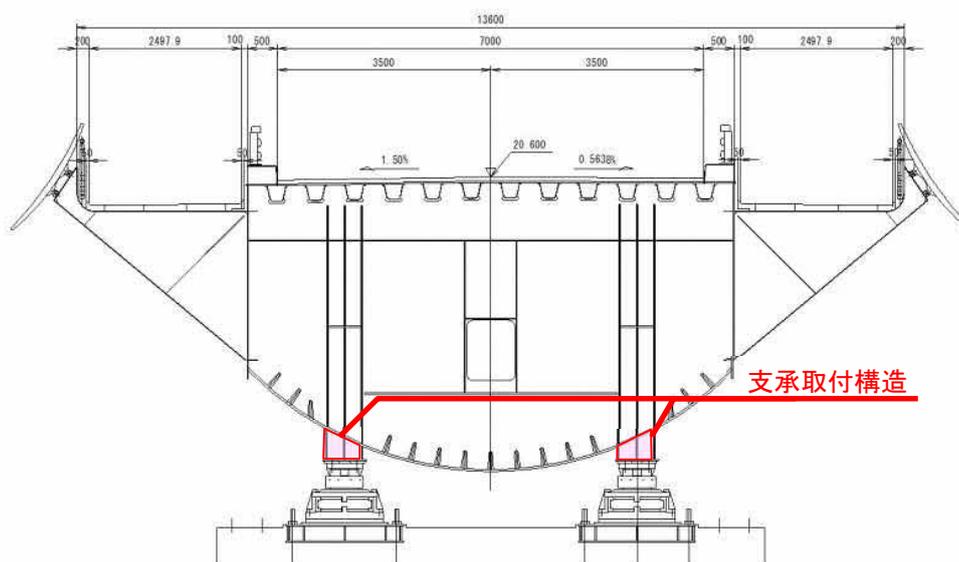


図 4-2 支承取付構造（現況）

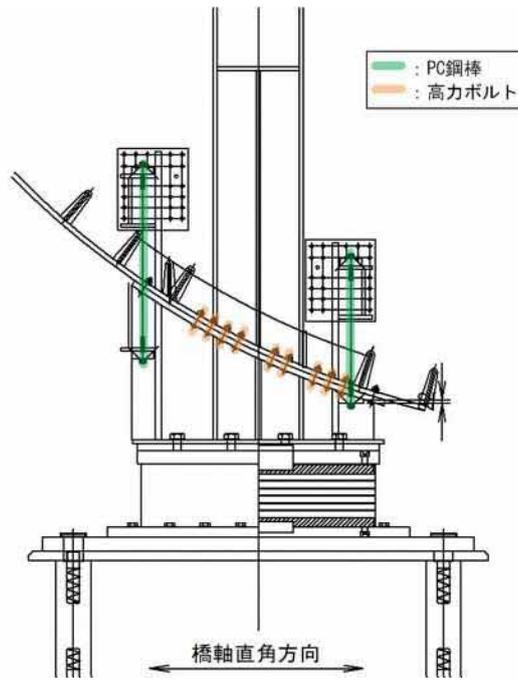


図 4-3 ボルト接合案

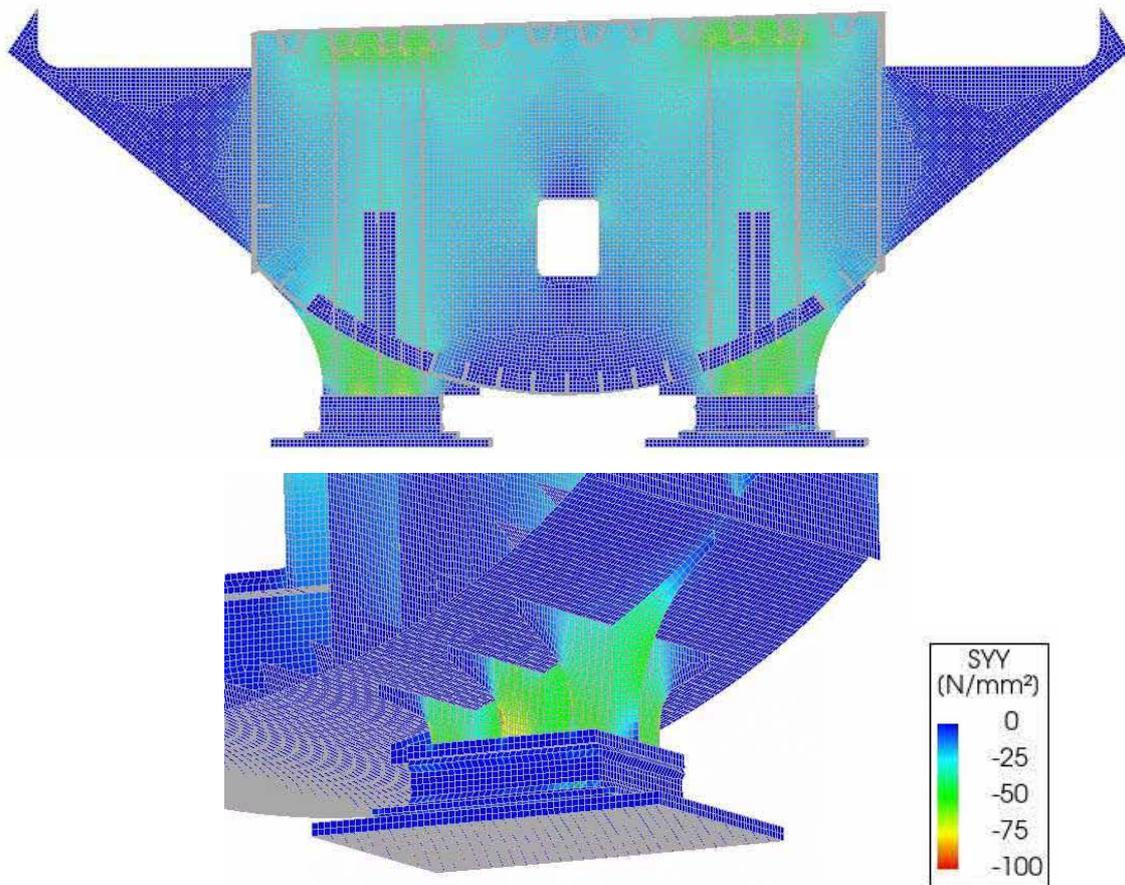


図 4-4 接合部の応力分散を目的とした幅広形状案

5. まとめおよびその他提言

5.1 損傷要因推定

損傷要因特推定のために実施した各調査および数値解析の結果の概要を以下に示す。

- ① 損傷した支圧板の破面観察の結果、ローラー接触面からのビーチマークが確認されていることから、大きな死荷重が作用している中で変動荷重の繰り返し作用により損傷したと考えられる。
- ② 設計当時は、疲労設計の実施が一般的ではなく、牛深ハイヤ大橋においても疲労設計は実施されていなかった。
- ③ 長大な橋であり鉛直荷重が非常に大きく、ローラーと支圧板の接触面ではこの荷重が繰り返し作用するため、時期を推定することは困難であるが、いずれ損傷が生じたものと考えられる。
- ④ 損傷した支圧板およびローラーの品質は、損傷した部材での調査の結果、支圧板の一部項目（伸び）は規格値を満足しない結果となっていたが、受入れ時検査ではすべて規格値を満足していたことが確認されており、材料のばらつきの範囲内であったと考えられる。
- ⑤ そういった中で、牛深ハイヤ大橋の構造の特殊性から日々変動する温度差により橋が変形しようとするのに支承が追従できず、支承には非常に大きな応力で発生し、これが日々繰り返す状況であった。
- ⑥ 以上のことから、長大で特殊な断面形状の曲線橋の橋桁が主として温度作用によって移動しようとする方向と支承の移動可能な方向の相違により拘束されて、支承部材内に生じた応力集中が繰り返し作用したことにより、他に事例のない損傷へ繋がったと考えられる。

5.2 恒久対策への助言

熊本県より恒久対策実施に対する方針が示されたため、熊本県の方針を踏まえたうえで、以下の提言を行った。

(1) 恒久対策方針に対する助言

- ① 温度変化に対して水平方向に拘束しないような支承構造とすること。
- ② 支承交換によって拘束条件を変更する場合、既設の上部、下部、基礎構造および新設の上下部接続構造（支承取付構造）に与える影響について留意すること。
- ③ 耐震設計において、レベル1地震動に対する応答も確認すること。
- ④ 温度変化、部材間温度差の作用によって橋梁全体が複雑な挙動を示すことが数値解析により明らかであり、これらに十分配慮すること。

(2) 支承構造に対する助言

- ① 既設部材が健全な状態であることを解析の前提としているのであれば、適切に点検を行い、損傷部に適切な対策を実施すること。
- ② 既設ジャッキ受台を利用した応急対策が可能であったこと、支承の損傷が生じたことで桁の転倒、落下が懸念されたことを踏まえ、フェールセーフ機能の確保を検討すること。

(3) 支承受付構造に対する助言

- ① 支承受換に伴う支承受付構造と上部構造への接合方法は、ボルト接合および溶接接合が考えられる。
- ② ボルト接合では、接合方法、原理に応じて要求される性能を満足できるか確認すること。
- ③ 支承受付構造に与える変動作用および偶発作用の影響は、数値解析を用いて確認すること。
- ④ 溶接接合では、疲労に関して可能な限り懸念を低減できる構造とすること。

5.3 支承受付構造変更に伴う維持管理の留意点

熊本県は恒久対策の方針として全方向水平の分散ゴム分散への取替（支承受付構造変更）を実施することとしたことから、維持管理に資することを目的として、施工中および施工後の状態の計測について定期点検時や地震後点検の提言を以下に示す。

- ① 本橋は長大で特殊な断面形状の曲線橋であり、常時の温度変化等で上部構造が複雑に挙動する。支承受付構造変更に伴い橋梁全体挙動が変化するため、支承受付構造変更後の挙動を確認すること。
- ② 上部構造等は、温度変化により絶えず変形しており、支承受付を固定するタイミングにより、生じる応力状態が変化するため、ゴム支承受付を据え付けるタイミングには留意するとともに、施工時の変形量を記録しておくこと。
- ③ ゴム支承受付形状を事前に3次元計測し、内部応力や変形をモニタリングすること。
- ④ 地震後の緊急調査は、確実に近接目視を実施すること。

5.4 同じ構造を持つ橋梁について

同じ構造を有する橋梁に関しては以下のことを参考にしながら、今後の設計や維持管理に活用することを提言した。

- ① 本橋と同様な大規模な曲線橋で、支承受付部を固定可動構造とする場合は、支承受付の設置方向には十分留意する必要がある。支承受付の可動方向と桁伸縮方向が不一致となる場合には拘束の影響を適切に考慮する必要がある。
- ② 牛深ハイヤ大橋は、長大で特殊な断面形状の曲線橋という特有の条件を持つ橋梁であるが、ローラー支承受付の支圧板やローラーが弱点となる可能性があることが分かったため、今後、ローラーを有する支承受付の定期点検を行う際は、カバープレートを外して支承受付内部まで確認する必要がある。