

橋梁長寿命化を目指した床版取替え工事

— 中国自動車道 矢野川橋 —

大阪支店 土木工務部 橋野哲郎
大阪支店 土木工務部 西濱智博

概要：中国自動車道矢野川橋は昭和 50 年の供用開始から 33 年が経過しているが、その RC 床版は建設時の内在塩分や冬季の凍結防止材散布による塩害で劣化が顕著になっていた。そこで、将来の LCC を踏まえた抜本的対策として、床版の全面取替えが計画・実施された。本稿では、床版のリニューアルに際し、橋梁全体の長寿命化を目指して実施した様々な対策について報告する。

Key Words：プレキャスト PC 床版，合成桁化，延長床版，実橋載荷試験，長寿命化

1. はじめに

矢野川橋は、中国自動車道の山崎 IC～佐用 IC 間に位置する橋長 94.5m の 3 径間連続非合成鉄桁橋であり、昭和 50 年の供用開始から 33 年が経過した橋梁である。この区間の交通量は、約 13 千台/日（大型車 4 千台）と比較的少ないが、中国横断自動車道姫路鳥取線が交差予定であり、将来交通量の増加が見込まれる重要路線である。また、架橋地点は急峻な山岳地に位置するため気象条件が厳しく、冬季に多量の凍結防止剤を散布（年間平均散布量 $3\text{kg}/\text{m}^2$ ）されている区間である。

構造的特徴としては、県道および河川との交差条件により斜角 45 度の斜橋であることが挙げられる（写真-1）。

本橋の RC 床版は、経年劣化や塩害による劣化を受け、平成 6 年には早強コンクリートによる床版上面増厚補強（ $t=5\text{cm}$ ）を実施していた。しかし、補強後においても床版下側鉄筋の著しい腐食や断面欠損、かぶりコンクリートの広範囲な剥落などが進行しており、輪荷重による床版の抜け落ちが懸念された（写真-2）。そこで、今回、将来の LCC を踏まえた抜本的な対策として床版の全面取替えを実施した。



写真-1 矢野川橋全景



写真-2 床版下面の劣化状況

2. 工事概要

本工事の一般図を図-1に示す。矢野川橋は上下線分離構造の並列橋であるが、今回の床版取替え工事は劣化が著しい下り線側が対象である。供用中の高速道路本線の工事であり、施工中は上り線を昼夜連続対面通行規制とすることから、現場工期をできるだけ短縮することが求められた。また、床版取替えにあたっては、新設する床版の高耐久化だけでなく、鋼桁や桁端部、橋台等、橋梁全体の長寿命化を目指した取組みを行った。



橋野哲郎



西濱智博

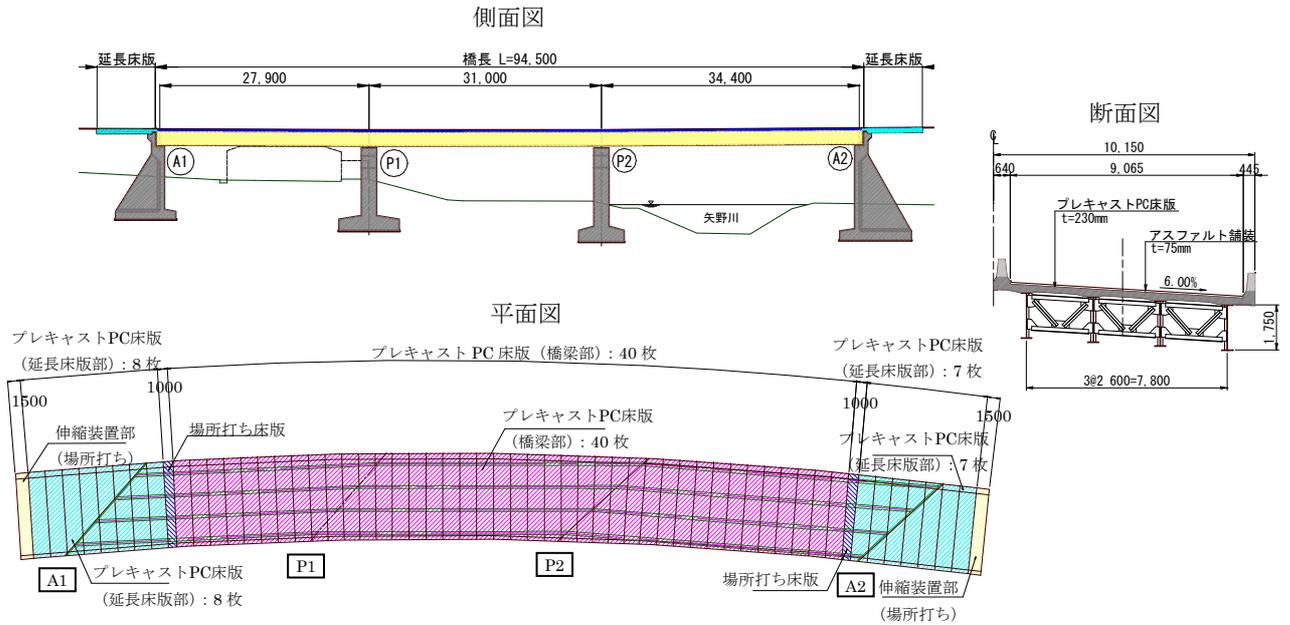


図-1 床版取替え一般図

表-1 に橋梁諸元, 表-2 に工事工程表と概算数量を示す.

表-1 橋梁諸元

橋長	94.500m	
荷重	(補強前)	TL-20
	(補強後)	B活荷重
形式	(補強前)	鋼3径間連続非合成桁橋
	(補強後)	鋼3径間連続合成桁橋
支間	27.900m+31.000m+34.400m	
有効幅員	9.065m	
斜角	A1 : $\theta=45^\circ$ A2 : $\theta=49^\circ$	
横断勾配	6.00%	
縦断勾配	-1.60% ~ 4.60%	
平面曲線	R=500m	
補修履歴	(平成6年)	上面増厚(21cm→25cm)
	(平成12年)	床版剥落防止(A1~P1)
交差物件	県道山崎南光線 二級河川 矢野川	

表-2 工事工程表

	数量	2008年 9月			10月					11月
		25	30	1	5	10	15	20	25	31
交通規制	昼夜連続車線規制	←			←					←
	(8/25~9/24)				(9/25~10/31)					(11/1~11/30)
舗装撤去	72m ³									
床版撤去準備										
橋梁部床版	既設床版撤去	965m ²								
	プレキャストPC床版架設	40枚								
	目地部モルタル	4.0m ³								
	スタッドジベル溶植	1.5t								
	縦締めPC工(橋梁部)	11.0t								
	場所打ち床版工	6.2m ³								
橋台部延長床版	既設踏掛け版撤去	54m ³								
	プレキャスト底版設置	18枚								
	プレキャストPC床版架設	15枚								
縦締めPC工	4.5t									
橋面工(壁高欄)	50m ³									

3. 新設する床版の構造

既設床版はRC構造であるが、B活荷重対応とする新設床版は、軽量で長期耐久性に優れ、かつ維持管理上の問題も少ないPC床版を採用した。また、現場工期の短縮と品質確保の観点から高強度コンクリート ($\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$) を用いた工場製作のプレキャストPC床版とした(写真-3)。

3.1 鋼桁との合成桁化

現橋は連続非合成桁(TL-20)で設計されており、現行のB活荷重に対しては鋼桁の発生応力が2~3割程度、超過している状況であった。しかし、一般的に非合成桁として設計された場合であっても、床版と鋼桁はずれ止めにより接合されているため、ある程度の合成効果



写真-3 プレキャストPC床版の架設状況

を期待できることが知られており、鋼桁に発生する実応力度は設計値よりも小さいと考えられる。

本工事では、この合成効果をより積極的に発揮させて鋼桁の発生応力度を低減し、鋼桁の疲労耐久性を向上させる試みを行った。このため、プレキャスト PC 床版の設計では、橋軸方向の PC 板相互の継手構造や鋼桁とのずれ止め配置、PC 板のスタッド箱抜き等に着目して検討を行った。

3.1.1 床版橋軸方向の検討

合成桁の床版は、輪荷重による床版作用によるものと主桁作用によるものを考慮する必要がある。この床版作用と主桁作用の重ね合わせについては、表-2に示す荷重の組み合わせにより照査を行うものとした。

次に、床版の橋軸方向の構造としては、RC 構造 (RC ループ継手) と PC 構造 (PC 継手) について、合成桁化への適用性に着目して検討を行った。

RC 構造では、鉄筋の応力度を 140N/mm² で制御した場合、中間支点部で D22ctc125mm の配置鉄筋量が必要となった (表-3)。しかし、この場合は、ループ継手部において以下に示す課題があり、本橋での合成桁化への適用は困難であると判断した。

- ①D22 を用いたループ継手の疲労耐久性が確認されていない。
- ②PC 床版間のスタッド間隔が、ループ筋の重ね継手長の関係から最小で 900mm となり、合成桁としてのスタッド間隔を満足しない (表-4、表-5、図-2)。

表-4 ループ筋の重ね継手長

ループ筋の重ね継手長		D22
鉄筋径	φ (cm)	2.20
鉄筋応力度	σ _{sa} (N/mm ²)	160.0
基本付着応力度	τ _{oa} (N/mm ²)	3.00
鉄筋の定着形状による係数	f	0.5
必要鉄筋断面積/配置鉄筋断面積	A _{se} /A _{sv}	1.0
継手鉄筋のずらし量の影響を考慮した係数	k	2.2
必要重ね継手長	La (cm)	32.27

$$La = f \times \sigma_{sa} / (4 \times \tau_{oa}) \times \phi \times (A_{se} / A_{sv}) \times k$$

一方、PC 構造の場合は、版相互の接合が無筋のモルタル目地となるため、軸方向プレストレスによって供用荷重作用時に引張応力度が発生しない構造に制御する必要がある。検討の結果、中間支点部で発生する引張応力に対しては、床版断面に 6.5N/mm² 程度のプレストレスを導入することで、フルプレストレスに制御可能となることが分かった。これに対応する PC 鋼材量として、シングルストランド鋼材 (1S28.6) を 200mm 間隔とした。

また、PC 板の継手部がコンパクトになるため、スタッド間隔は道路橋示方書で規定されている最大間隔 600mm 以下で配置することが可能となる。

以上の検討結果より、本橋のプレキャスト PC 床版は、橋軸方向 PC 構造 (直角方向は PRC 構造) とした。

図-3 にプレキャスト PC 床版の構造図を示す。

表-2 荷重の組合せ (中間支点部)

照査荷重	床版上縁	床版下縁
	主桁作用	重ね合わせ
① 床版作用 (T 荷重)	-	○
② 主桁作用 (L 荷重)	○	-
③ ②×0.6	-	○
④ 死荷重	○	○
⑤ クリープ・乾燥収縮	○	○

表-3 RC 構造での試算結果

	P1 支点部		P2 支点部	
	上段	下段	上段	下段
配置鉄筋量	D22ctc125	D22ctc125	D22ctc125	D22ctc125
(1) 死荷重	○ 33.8	○ 28.5	○ 39.7	○ 33.8
(2) 活荷重 (桁作用)	○ 34.3	○ 28.8	○ 40.5	○ 34.4
(3) 活荷重 (床版作用)	○ 0.0	○ 54.3	○ 0.0	○ 54.3
(4): (2)×0.6	○ 20.6	○ 17.3	○ 24.3	○ 20.6
(5) クリープ	○ 1.5	○ 1.2	○ 2.9	○ 2.4
(6) 乾燥収縮	○ 15.4	○ 12.9	○ 15.7	○ 13.3
合計: (N/mm ²)	85.0	114.2	98.9	124.4
許容値	140.0	140.0	140.0	140.0

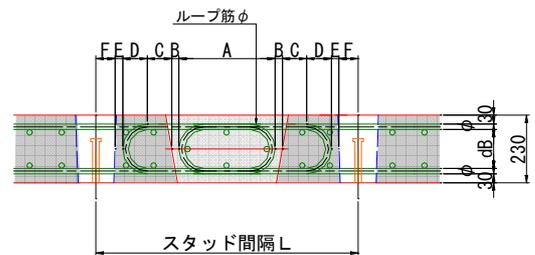


図-2 PC 板間の最小スタッド間隔

表-5 PC 板の最小スタッド間隔

PC 床版間のスタッド配置間隔 (最小値)			
床版厚	H	(mm)	230
鉄筋径	φ	(mm)	D22
ループ中心間隔	e	(mm)	125
曲げ直径 (内径)	dB	(mm)	126.0
必要継手長 (La)	A	(mm)	322.7
ループ筋と PC 版のあき	B	(mm)	25
半円形フックの埋込み長: 4・φ	C	(mm)	88
半円形フック半径: dB+φ	D	(mm)	85
ループ筋と箱抜きとのあき	E	(mm)	22
箱抜きからスタッドまでの距離	F	(mm)	65
スタッド間隔: A+(B+C+D+E+F)*2	L	(mm)	893

表-6 PC 構造での試算結果

	P1 支点部		P2 支点部	
	上縁	下縁	上縁	下縁
(1) 死荷重	○ -1.65	○ -0.85	○ -2.17	○ -1.26
(2) 活荷重 (桁作用)	○ -1.96	○ -1.01	○ -2.70	○ -1.57
(3) 活荷重 (床版作用)	○ 2.61	○ -2.61	○ 2.61	○ -2.61
(4): (2)×0.6	○ -1.18	○ -0.61	○ -1.62	○ -0.94
(5) クリープ	○ -0.40	○ -0.90	○ -0.58	○ -1.02
(6) 乾燥収縮	○ -0.52	○ -0.52	○ -0.74	○ -0.71
(7) プレストレス	○ 6.69	○ 6.69	○ 6.69	○ 6.69
合計: (N/mm ²)	2.16	1.20	0.50	0.15
許容値	0.00	0.00	0.00	0.00

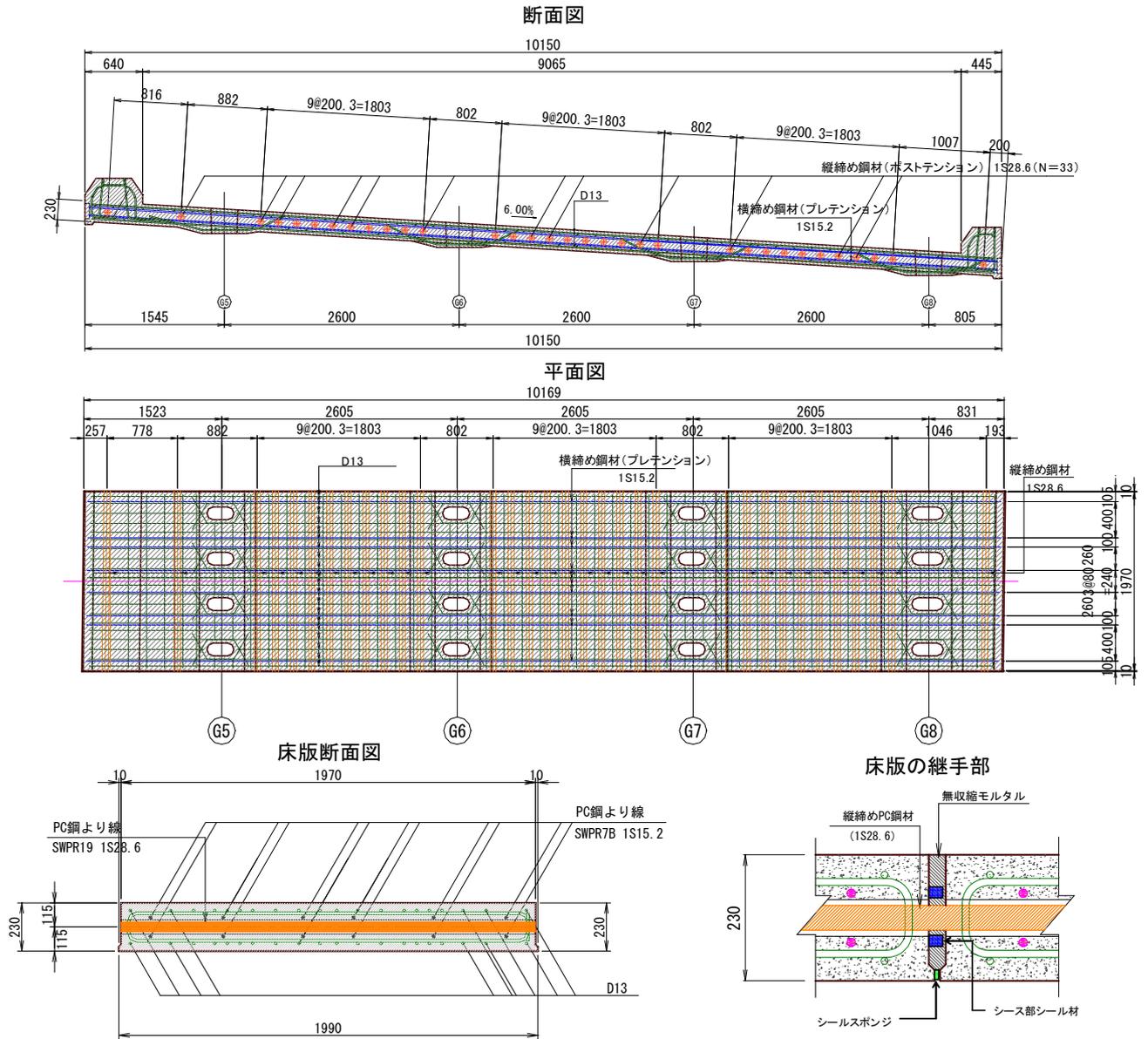


図-3 プレキャスト PC 床版の構造図

3.1.2 縦締め PC 鋼材の配置

図-4 は、床版に発生する橋軸方向の引張応力度の分布を示したものである。引張応力度は、床版作用と桁作用を受ける中間支点部で最大となり、支間中央に向かって減少する。よって、それに応じて PC 鋼材の配置本数を変化させ、鋼材数量の低減を図ることが考えられた。

しかし、本橋の場合は、プレキャスト PC 床版の配置を、斜角 45 度に対して鋼桁直角方向に設置する計画としたため、中間支点部の負曲げ領域に影響する PC 版の枚数が多くなり、配置本数の低減効果が小さい。

さらに、後述する新しい延長床版システムを採用したため、桁端部においても

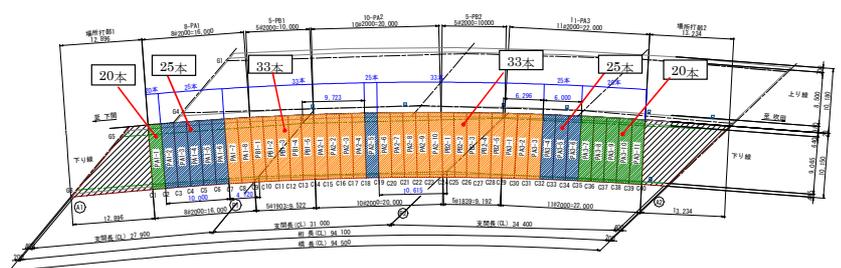
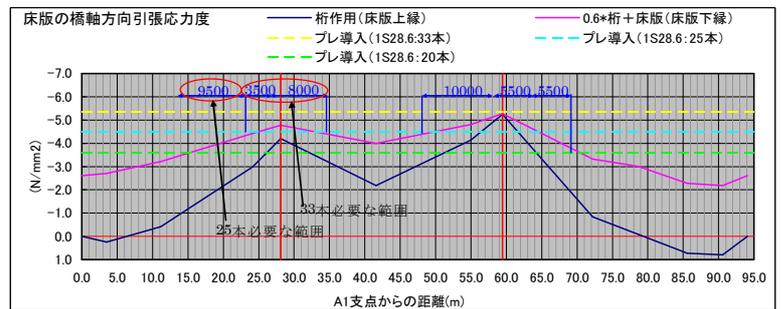


図-4 橋軸方向引張応力度の分布

中間支点部と同程度のプレストレス量が必要となった。よって、PC 鋼材の配置は、全橋にわたって同一本数とした。

なお、施工においては、床版だけに効率よくプレストレスを導入させるため、橋軸方向のプレストレス導入後に鋼桁と床版の合成を行っている（写真-4）。



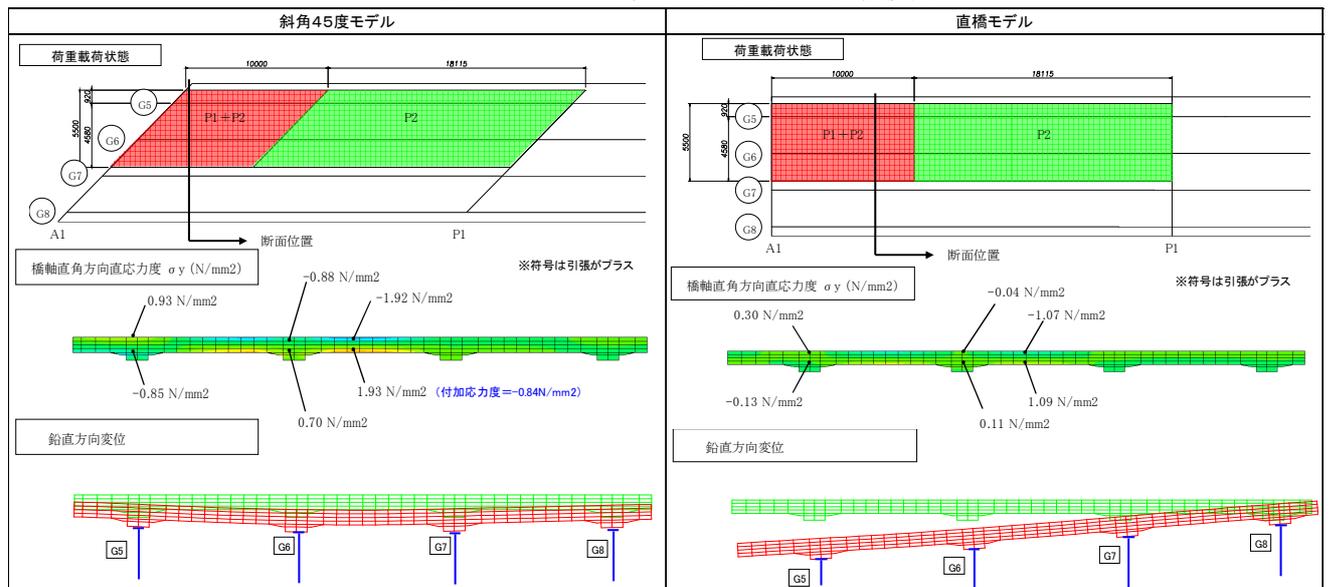
写真-4 プレストレス導入状況

3.2 斜角に対する検討

本橋は斜角を有するため、床版には主桁のねじりによる応力や変形等が加わり、複雑な応力状態となる。そこで、床版の鋼桁の合成化に際してプレキャスト PC 床版の設計では、これらの影響を考慮するため、上部構造全体をモデル化した 3 次元 FEM 解析による検討を実施した。解析モデルは、本橋の斜角を再現した斜角 45 度モデルと比較用の直橋モデルの 2 ケースを作成し、床版をソリッド要素、鋼桁をシェル要素でモデル化した。斜角による付加応力度は、両ケースについて活荷重の偏載荷により床版に発生する応力度を算出して、その発生応力度の差を斜角の影響によるものと考えた。

表-7 に FEM 解析結果を示す。鈍角部に偏載荷した場合の活荷重による橋軸直角方向の引張応力度は、斜橋モデル-1.93N/mm²、直橋モデル-1.09N/mm²であった。両者の発生応力度差から、斜角の影響による付加応力度は-0.84N/mm²であると考え、プレキャスト PC 床版の設計では通常の T 荷重による床版発生応力度に加えてこの付加応力度を考慮して、床版の耐荷性能の確保を図った。

表-7 FEM 解析による斜角の影響検討



3.3 鋼桁とのずれ止め

新設する床版は鋼桁との合成作用を期待するため、ずれ止めの設計では、橋面死荷重、活荷重、クリープ・乾燥収縮及び床版と鋼桁との温度差を作用荷重として考慮した。ずれ止めには、 $\phi 22$ (SS400) の頭付きスタッドを使用し、許容せん断力は複合構造物の性能照査指針（土木学会）のせん断耐力式から設定した。

一般にプレキャスト PC 床版では、スタッド箱抜き孔の配置に制約があり、箱抜きによる断面欠損が過大になると、床版としての耐荷性能を低下させる原因となる。本橋のスタッドの必要配置量は、桁端部において最大 16 本/m (桁 1 本あたり) となったため、箱抜き孔による PC 床版の断面欠損を低減する対策として、グループ配置 (8 本/箇所) を採用した。しかし、従来のプレキャスト PC 床版と比べて、スタッド箱抜き孔による床版の断面欠損率が大きく、横締めプレストレスの集中によるひび割れの発生が懸念された。

そこで、ずれ止め箱抜き孔に着目した FEM 解析を実施し、箱抜き部に発生する局部応力を確認した。

解析モデルは、PC床版をソリッド要素、横締め鋼材（プレテンション）をロッド要素とし、荷重としては横締めプレストレスを考慮した（図-5）。箱抜き部に発生する局部応力度の検証では、箱抜き部の補強の有無と補強材として埋設する鋼板の板厚をパラメータとして比較解析を行った。

図-6は、板厚 $t=4.5\text{mm}$ の鋼板を補強材としたときの解析結果である。また、図-7は、FEM解析結果から得られた補強鋼板厚と発生応力度の関係を示したグラフである。これにより、補強鋼板の設置による発生応力度の低減効果が認められ、また、板厚 $t=4.5\text{mm}$ 以降は板厚を増加させても発生応力度はほぼ同様となることが分かった。以上の検討結果から、実施工では $t=4.5\text{mm}$ の鋼板により箱抜き部の補強を行うこととした（写真-5）。

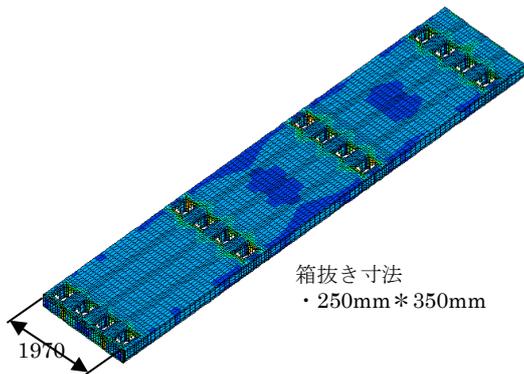


図-5 FEM解析モデル

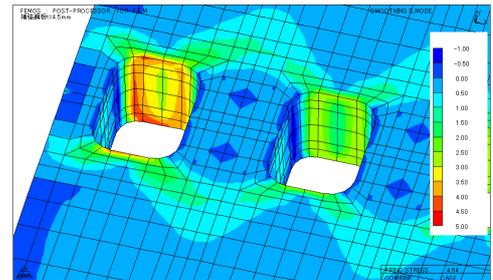


図-6 箱抜き部の FEM 解析結果

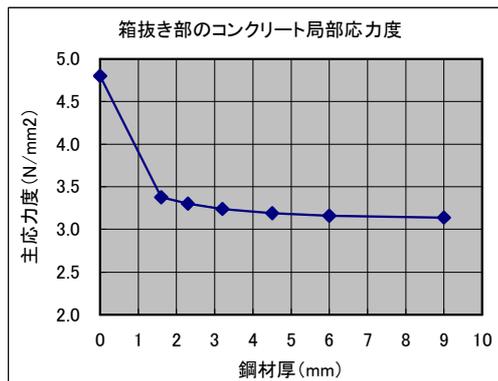


図-7 補強鋼板厚と発生応力度の関係



写真-5 箱抜き部の補強

3.4 プレキャスト PC 床版の耐久性向上対策

従来の施工では、地覆・壁高欄は後施工されるが、その場合は床版と地覆に打継目が存在するため、劣化因子を含む雨水が打継目から浸入し、壁高欄鉄筋の腐食や床版端部コンクリートの劣化の原因となることが考えられた。そこで、プレキャスト PC 床版と地覆部を一体製作することで打継目を無くし、凍結防止剤が散布される本橋の環境条件に対する床版の耐久性向上を図った（図-8）。

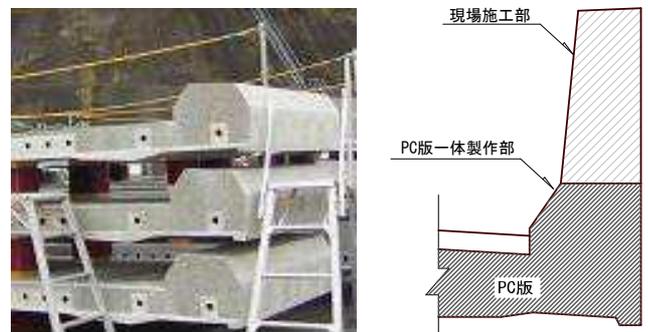


図-8 地覆のプレキャスト PC 版一体製作

4. 延長床版システム

延長床版システムは、橋梁の床版を土工部まで延長し、伸縮装置を土工部上に設置する構造であり、伸縮装置部からの漏水や砂塵堆積等の影響による桁端部や橋台の劣化や損傷に対する有効な手段として、平成 8 年ごろから採用されている工法である。今回、矢野川橋の床版取替え工事では、桁端部や橋台部の劣化防止と伸縮装置部からの振動や騒音の低減を目的として延長床版システムを採用することとした。

4.1 従来タイプの延長床版システム

延長床版システムには、場所打ちコンクリートを用いたものとプレキャスト版を用いたものがあり、現場工期の条件や経済性により選定される。今回の工事では、交通規制が伴うため、現場工期の短縮が可能となるプレキャスト版を用いた工法を基本として構造検討を行った。

プレキャスト版を用いた工法では、図-9に示す「橋軸方向にプレキャスト版の長辺を配置する工法（従来タイプ）」が一般的である。従来タイプは、桁端部の場所打ち橋梁床版と延長床版（RC構造のプレキャスト版）をメナーゼヒンジで接続する構造であるが、本橋への適用にあたっては、次の点が課題であった。

- ①橋梁の斜角が45度であるため、橋梁床版部で現場打ちのコンクリート部分が多くなり、現場工期の短縮が期待できない。
- ②橋梁床版と延長床版と接続するメナーゼヒンジ部の止水性に懸念がある。

4.2 新しい延長床版システムの採用

上記の課題を解決するため、図-10に示す「橋軸方向にプレキャスト版の短辺を配置する工法（新タイプ）」の構造を検討した。新タイプの工法は、従来タイプに比べ次のような利点があった。

- ①桁端部の場所打ち床版の数量が僅かとなるため、現場工期を1週間程度短縮することが可能となる。
- ②橋梁床版との接合は剛結合であり、縦締めプレストレスによるひび割れを発生させない構造であるため、桁端部、橋台部の止水が確実となり、これらの耐久性の向上を図ることができる。
- ③橋梁床版の大部分がプレキャスト部材で構成されるため、品質や耐久性の向上が期待できる。

上記の施工上および構造上の優位性と、施工費に関しても従来タイプとほぼ同程度となることから、本橋では新しい延長床版システムを採用した。写真-6は、延長床版の架設状況である。延長床版の底面には、確実なすべり性能の確保と工程短縮を図ることができるプレキャストRC版を使用している。

ただし、新延長床版システムの実施にあたっては、新たな課題として、桁端部のプレキャストPC床版が鋼桁と底板に支持されて複雑な応力状態となることが挙げられた。そのため、延長床版部に用いるプレキャストPC床版の耐荷力については、支持状態の影響を考慮して決定する必要があった。

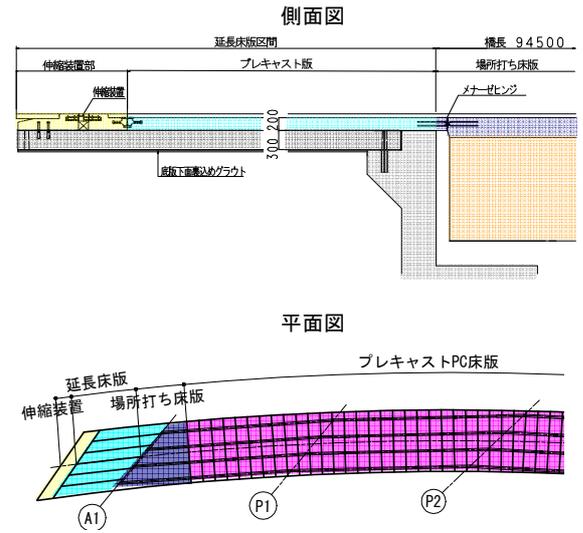


図-9 従来タイプの構造

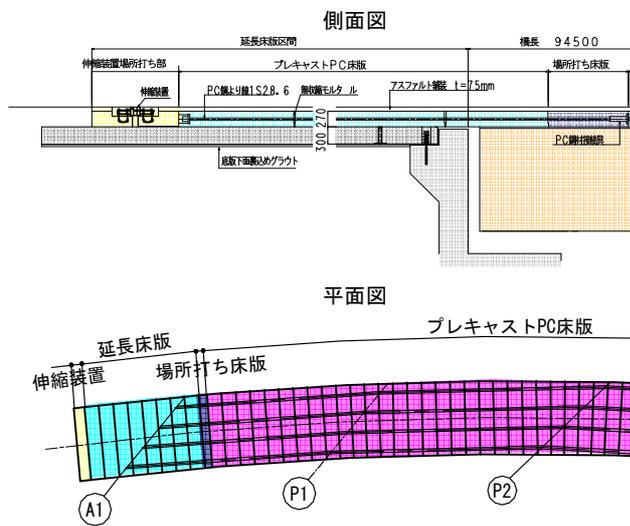


図-10 新タイプの構造



写真-6 延長床版の架設状況

4.3 桁端部の検討

桁端部付近の応力状態を把握するために、3次元 FEM 解析により検討を行った。解析モデルは全径間を対象とし、床版：ソリッド、鋼桁：シェル、底板（地盤）支持条件を分布バネ支持として、活荷重の荷重によるプレキャスト PC 床版の応力度照査を行った（図-11）。

図-12に、G8桁側に活荷重を偏載荷したときの解析結果を示す。延長床版に発生する応力度は桁端部で最大となり、橋軸方向は -5.29N/mm^2 、橋軸直角方向は 4.31N/mm^2 となった。この引張応力度に対しては、橋梁床版部分に配置している縦締めプレストレス（ポストテンション）と横締めプレストレス（プレテンション）により対応が可能であり、橋梁床版に用いるプレキャスト PC 床版と同程度の耐荷性能を有する PC 版で問題無いことが分かった。

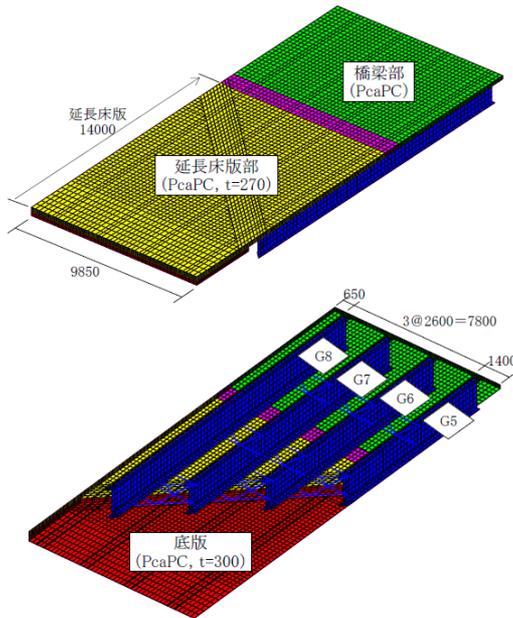


図-11 3次元 FEM 解析モデル

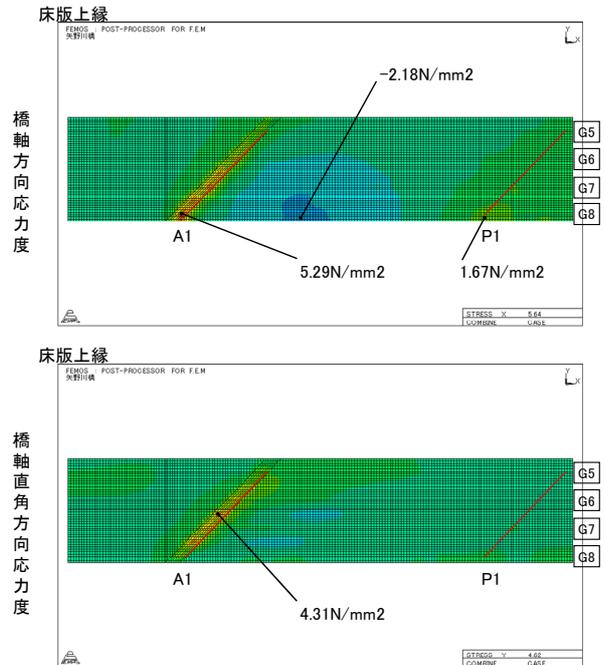


図-12 解析結果

5. 実橋載荷試験

5.1 試験概要

今回の床版取替え工事では、鋼桁との合成桁化や新しい延長床版システムの採用等、従来の同種工事とは異なる取組みを実施した。また、設計では、3次元 FEM 解析を用いて斜橋への適用に関する照査を行っている。

そこで、「床版取替え後の合成効果の検証」や「斜角の影響による床版応力の確認」、「延長床版の滑動性能の確認」を目的として実橋載荷試験および実橋計測を実施した。

図-13に応力計測位置と伸縮挙動の計測位置を示す。

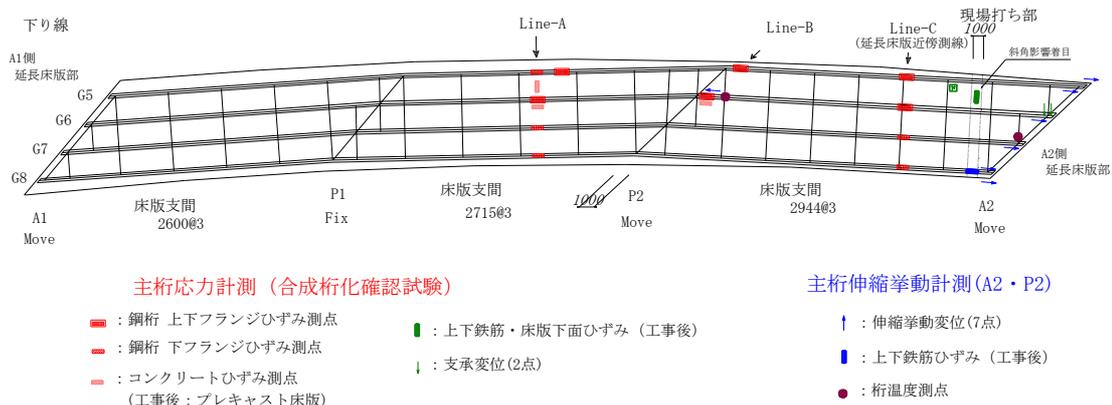


図-13 計測点位置図

5.2 床版合成効果の検証

床版取替え前後において橋面上に試験車両（ダンプトラック 196kN）を静的載荷し、鋼フランジに発生する応力を計測した。

図-14は、試験車両の載荷位置を橋軸方向に変化させて、載荷位置とP1-P2径間中央におけるG5桁の下フランジ応力度を示したものである。この結果から、床版取替え前の状態においても、実橋の発生応力度は合成桁とした解析値よりも小さいことが分かった。ただし、床版取替え前後の実測値を比較すると、床版取替え後において発生応力度の低下が認められるため、床版取替えによって床版の剛性が向上したことで、床版と鋼桁との合成効果が期待通りに作用していることが確認できた。

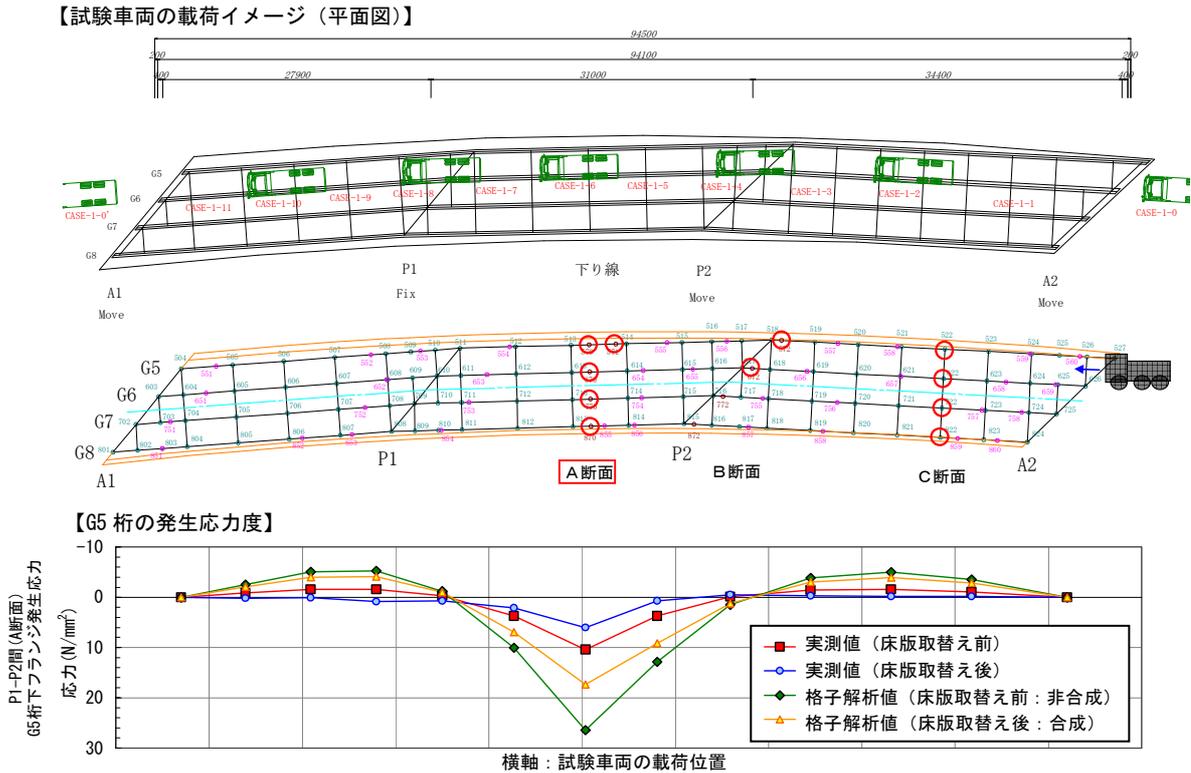


図-14 試験車両の影響線載荷による応力計測結果（計測位置：P1-P2径間中央）

次に図-15は、P1-P2径間中央における各桁の発生応力度を比較したものである。この結果からも、床版取替えによって主桁の発生応力度の低減効果が認められる。なお、実測値はG5桁に比べてG6桁の発生応力度が大きくなっており、格子解析値と傾向が異なっている。これは、格子解析では壁高欄の剛性が考慮されていないことによるものと考えられ、実橋では壁高欄の剛性により耳桁の発生応力度が低減されているものと推測できる。

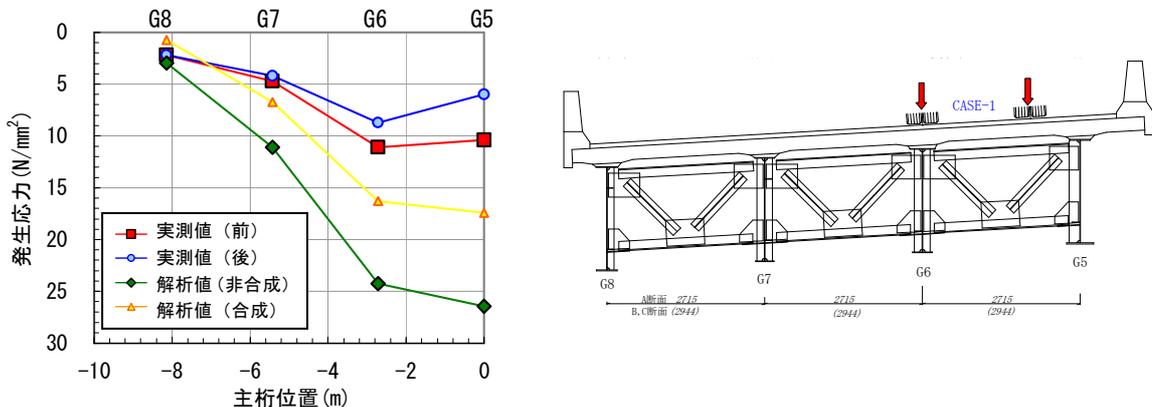


図-15 P1-P2径間中央載荷時の各桁の発生応力度（計測位置：P1-P2径間中央）

5.3 床版応力度の確認

桁端部付近の床版応力度について、延長床版化や斜角の影響を確認するため、試験車両の静的載荷を行い床版に発生する橋軸直角方向応力度を計測した。

図-16に計測結果を示す。試験車両の載荷位置は、P2-A2径間のL/4点(載荷点①)とL/2点(載荷点②)であり、応力度の計測位置は、A2側の橋梁床版と延長床版を接続する場所打ち床版部である。

計測結果から、床版に発生する応力度は実測値がFEM解析値を若干下回っているものの、概ね一致しており、FEM解析の妥当性が確認できた。

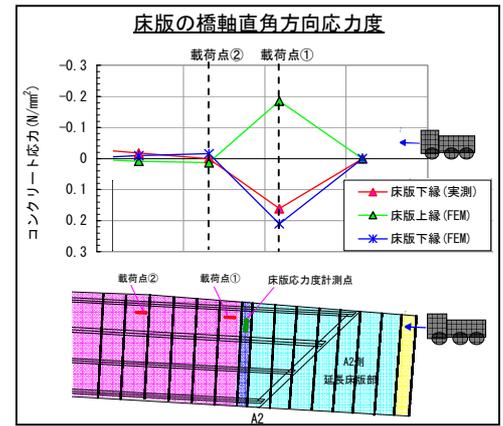


図-16 床版の橋軸直角方向応力度

5.4 延長床版の伸縮挙動

延長床版化の工事前後において伸縮挙動を計測し、延長床版の滑動性能を確認した(写真-7)。延長床版の施工前後における温度と主桁伸縮量の関係を示すグラフを図-17に示す。この計測結果から、温度変化に対する主桁伸縮量の勾配は施工前後で大幅な変化がないことが分かる。

これにより、延長床版化後における主桁伸縮量は、施工前の計測値や設計値とほぼ等しく、延長床版化によって主桁伸縮挙動が阻害されるような傾向は認められず、延長床版部の滑動性能は確保されていることを確認できた。



写真-7 伸縮挙動の計測状況

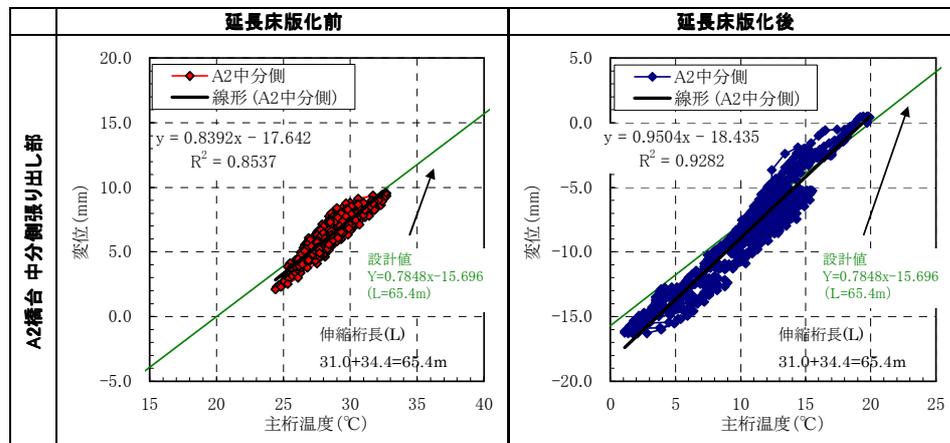


図-17 温度と伸縮挙動の関係

6. おわりに

今回の床版取替え工事では、橋梁の長寿命化を目指して様々な取組みを行った。しかし、これらの新しい取組みについては今後もモニタリングを行い、使用性や耐久性の評価を行う必要がある(写真-8)。

最後に、本橋の構造決定にあたり、「矢野川橋床版架替に関する検討」委員会(委員長:松井繁之 大阪工業大学教授)の各委員からは、貴重なご助言やご指導をいただきました。これら関係各位に心よりお礼申し上げます。



写真-8 矢野川橋工事完成状況