

報告

軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版による床版取替

小林崇*, 土橋正和**, 郷保英之***

* 株式会社 IHI インフラ建設, 橋梁事業部 事業推進部 (〒135-8710 東京都江東区豊洲 3-1-1)

** 株式会社 IHI インフラ建設, 橋梁事業部 橋梁工事 1 部 (〒135-8710 東京都江東区豊洲 3-1-1)

*** 株式会社 IHI インフラ建設, 橋梁事業部 PC 技術部 (〒135-8710 東京都江東区豊洲 3-1-1)

床版取替に用いるプレキャスト PC 床版の軽量化は, B 活荷重対応に伴う床版厚の増加や拡幅など機能向上により増加する既設鋼主桁や下部工への死荷重応力を軽減, 補強の簡素化に有効である. プレキャスト PC 床版の軽量化の方法の一つとして軽量コンクリートの使用が挙げられる. 今回, 粗骨材および細骨材に軽量骨材を用いる軽量コンクリート 2 種を使用したプレキャスト PC 床版を開発, 実工事に採用した. ここでは, プレキャスト PC 床版の開発に際して行った材料および床版として性能試験の概要と迂回路の確保が困難な山間部において幅員を分割した施工により片側車線交通行で工事期間中の交通を確保して行った床版取替について報告する.

キーワード: 床版取替, 軽量コンクリート 2 種, 施工事例, 幅員分割施工

1. はじめに

近年, わが国では供用期間が 50 年を経過し, 老朽化した道路橋において床版取替工事による更新が進められている. 床版取替工事では, 現行の活荷重への対応や幅員拡幅などの機能向上に伴う床版自重の増加に対して, 既設鋼主桁や下部工の補強が行われている. これに対して床版自重の軽減は, 補強の簡素化や基礎工など補強が困難な条件下において有効である. このような背景のもと筆者らは粗骨材および細骨材の一部に軽量骨材を用いる軽量コンクリート 2 種を使用した鋼道路橋 RC 床版取替用プレキャスト PC 床版「スーパーHSL スラブ」を開発, 実工事に適用した (図-1).

本稿では, 開発に際して実施した材料としての軽量コンクリート 2 種の性能試験¹⁾, 軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版の性能試験²⁾について概要を示すとともに, 本プレキャスト PC 床版を用いた片側通行規制下での床版取替工事について報告する.

2. 軽量コンクリート 2 種の概要

2.1 性能目標

プレキャスト PC 床版に用いる軽量コンクリート 2 種の設計基準強度は, 一般的なプレキャスト PC 床版に用いる普通コンクリートと同様に 50N/mm^2 とし, プレテンション方式による翌日のプレストレス導入のため蒸気養生 1 日で 35N/mm^2 以上, かつ材齢 28 日で 57N/mm^2 程度の実圧縮強度を目標とした. 単位体積重量は, 強度を得

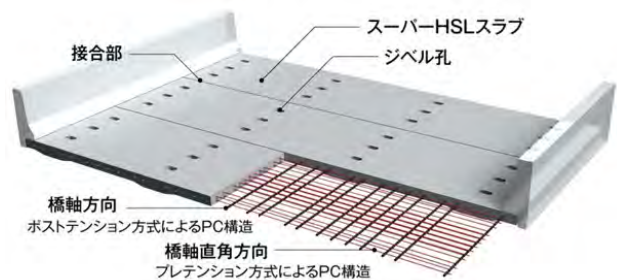


図-1 軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版「スーパーHSL スラブ」

るのに必要な水セメント比 (以下, W/C) と, コンクリートの軽量化に伴う静弾性係数の低下, これにより増加する荷重に対する床版のたわみが走行性に与える影響から, 先の普通コンクリートの単位体積重量 ($=23.0\text{kN/m}^3$) の 30% 程度の軽減となる 16.5kN/m^3 を目標とした.

2.2 使用材料および配合

軽量コンクリート 2 種の使用材料を表-1 に, 配合を表-2 に示す. 前述した性能目標に対して, 圧縮強度は W/C を 32% することで確保した. 一般的なコンクリートの使用材料でセメントは最も密度が大きく, 使用量が多いほどコンクリートの単位重量は大きくなる. 一方で, 軽量骨材は密度が小さく, セメントなどの結合材が少なくモルタルの粘性が低い場合に材料分離を生じやすくなる. これに対して軽量コンクリート 2 種の配合設計では, 単位水量を 150kg/m^3 , 単位セメント量を 469kg/m^3 とすることで単位体積重量および材料分離抵抗性を確保した.

表ー1 軽量コンクリート2種の使用材料

種別	記号	種類	物性値等
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³
細骨材	S	石灰砕砂	表乾密度 2.67g/cm ³ 滋賀県犬上郡産
	SL	人工軽量骨材 (低含水品)	絶乾密度 1.67g/cm ³ 含水率 0.3%
粗骨材	GL	人工軽量骨材 (低含水品)	絶乾密度 1.26g/cm ³ 含水率 0.2%
水	W	水道水	
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
	AE	AE 剤	変性アルキルカルボン酸化合物系

表ー2 軽量コンクリート2種の配合

W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	SL	GL
32.0	5.0 ±1.5	41.0	150	469	32	429	494

2.3 強度特性

コンクリートの静弾性係数は軽量化とともに低下する。加えて、軽量コンクリートは普通コンクリートと比較して、圧縮強度に対する引張や曲げ、せん断、付着などの強度が低いとされている³⁾。今回、軽量コンクリート2種のプレキャスト PC 床版への適用にあたり走行性および押抜きせん断耐荷力への影響が考えられる静弾性係数、引張・せん断強度について特性を確認した。

図ー2 に各強度特性として試験におけるデータの分布、平均値、標準偏差および特性値を示す。ここで、圧縮強度試験は JIS A1108 に、静弾性係数試験は JIS A1149 に、引張強度試験は JIS A1113 (割裂引張強度試験) に、せん断強度は JSCE-G553 (二面せん断試験) に準拠して行っている。確認された各物性の平均値は、式(1)～(3)により算出される圧縮強度 $f'_c = 58.5 \text{ N/mm}^2$ の普通コンクリートの物性値に対して静弾性係数は約 56% (34,700 N/mm² に対して 19,600 N/mm²)、引張強度は約 61% (4.06 N/mm² に対して 2.47 N/mm²)、せん断強度は約 77% (7.72 N/mm² に対して 5.93 N/mm²) である。

$$\text{静弾性係数 } E_c = \left(3.1 + \frac{f'_c - 40}{50}\right) \times 10^4 \quad (\text{N/mm}^2) \quad \text{式(1)}$$

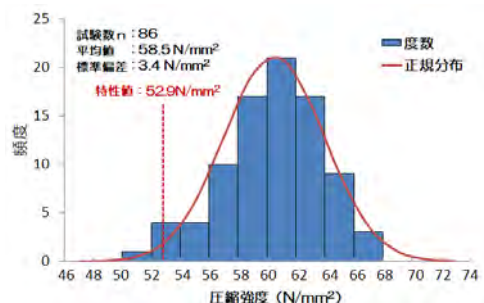
$$\text{引張強度 } f_t = 0.269 f'_c^{0.667} \quad (\text{N/mm}^2) \quad \text{式(2)}$$

$$\text{せん断強度 } f_{cv} = 0.656 f'_c^{0.606} \quad (\text{N/mm}^2) \quad \text{式(3)}$$

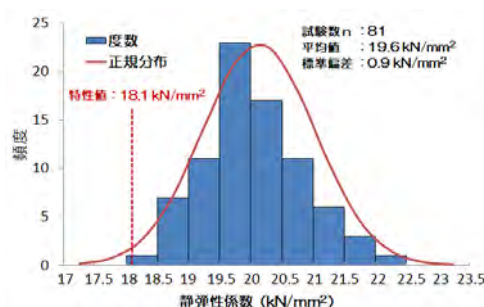
2.4 耐久性

軽量コンクリートは、一般に凍結融解作用への抵抗性に劣るとされている³⁾。また、道路橋 RC 床版の劣化は、凍結防止剤が散布される積雪寒冷地において顕著であり、取替に用いられるプレキャスト PC 床版には、塩分浸透に対する抵抗性が求められる。

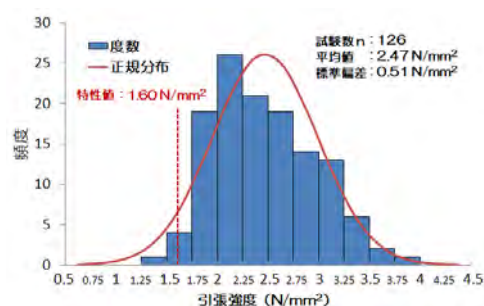
プレキャスト PC 床版に用いた軽量コンクリート2種では、表ー1 に示すように出荷時含水率が粗骨材で 28 ± 2.5%、細骨材で 15 ± 2.5% をとされる軽量骨材をそれぞれ含水率 2.0% 以下の低含水状態で使用することにより凍結融解に対する抵抗性を付加している。ここでは、軽量コンクリート2種の耐凍結融解性および耐塩分浸透性について述べる。



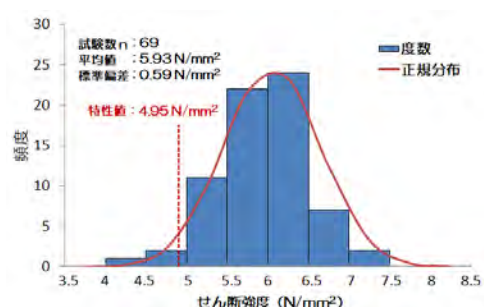
(a) 圧縮強度



(b) 静弾性係数



(c) 引張強度



(d) せん断強度

図ー2 軽量コンクリート2種の強度特性 (材齢 28 日)

(1) 耐凍結融解性

凍結融解に対する抵抗性の確認は、JIS A1148 (A 法) に準拠して行うものとし、真水および塩水として 3% の塩化ナトリウム水溶液 (以下、NaCl3% 水溶液) 中で 300

サイクルの凍結融解作用を与えることにより行った。ここで、試験に用いる供試体は、蒸気養生後、材齢 21 日まで温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%$ の環境下で気中養生、その後材齢 28 日までの 7 日間 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中に浸漬した後に試験を開始している。

図-3 に凍結融解サイクルに対する相対動弾性係数および質量減少率の計測結果を示す。相対動弾性係数は、真水、NaCl3%水溶液による試験とも 300 サイクルで低下は見られない。質量変化率は、NaCl3%水溶液による試験で低下が見られたが 300 サイクルで 1%程度であり、凍結融解に対する抵抗性を有することが確認された。

(2) 耐塩分浸透性

塩分浸透性は、JSCE-G572 (浸せき試験) に準拠し、蒸気養生後に温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 5\%$ の環境下で気中養生を行った $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体を材齢 28 日より 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸せきして行った。

図-4 に 1 年間浸せきさせた円柱供試体より切り出した試験片について、電子線マイクロアナライザ (EPMA) で確認した塩化物イオンの面分析結果を、表-3 にコンクリート標準示方書⁴⁾に示されるフィックの第 2 法則に基づく拡散方程式をもとに算定した見掛けの拡散係数を示す。ここでは、比較として同等の圧縮強度を有する W/C=40%の普通コンクリートの測定結果も示している。

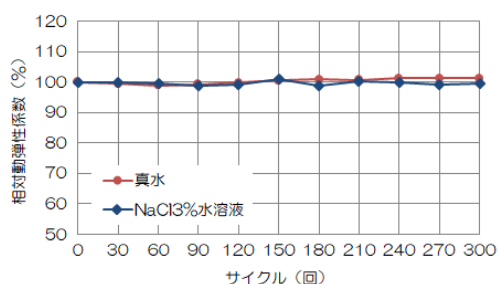
軽量コンクリート 2 種の塩分浸透深さは、普通コンクリートに対して小さく拡散係数として低い値が得られている。軽量コンクリート 2 種は、普通コンクリートに対して同等の圧縮強度となるときの W/C が小さく、モルタルの組織が緻密となる。加えて軽量骨材を低含水状態で使用することにより塩化物イオンが透過することなく高い耐塩分浸透性が得られるものと推察される。

3. 軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版の疲労耐久性

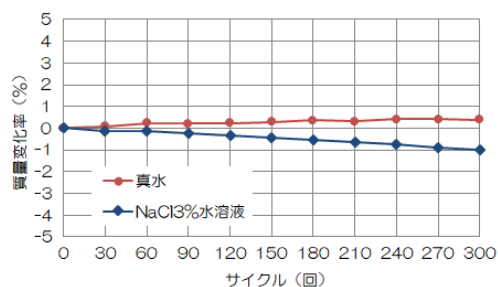
3.1 輪荷重走行試験の概要

前述したように軽量コンクリート 2 種の引張強度およびせん断強度は、圧縮強度が同等の普通コンクリートと比較して小さい。これに対して床版の押抜きせん断耐力は、圧縮域コンクリートのせん断強度と引張域コンクリートの引張強度で算定できるとされている⁵⁾。このため、軽量コンクリート 2 種の道路橋床版への適用にあたってプレキャスト PC 床版の構造は、図-1 に示すように橋軸直角方向をプレテンション方式、橋軸方向をポストテンション方式とした 2 方向 PC 構造を採用して押抜きせん断耐力の向上を図っている。ここでは、軽量コンクリート 2 種を用い、2 方向にプレストレスを導入した PC 床版の疲労耐久性の検証を目的として行った輪荷重走行試験について概説する。

試験にあたり床版試験体は、プレテンション方式によりプレストレスを導入した長さ 2.8m の PC 版 4 体をボス

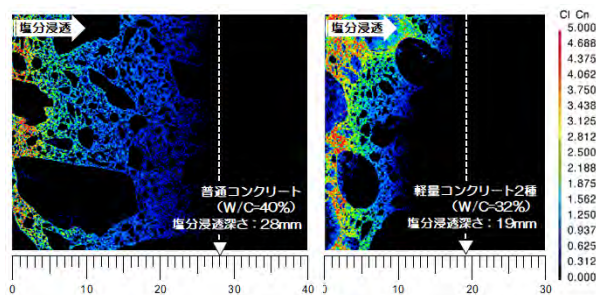


(a) 相対動弾性係数



(b) 質量変化率

図-3 凍結融解試験結果



(a) 普通コンクリート (W/C=40%) (b) 軽量コンクリート 2 種 (W/C=32%)

図-4 塩化物イオンの面分析結果 (塩分浸透深さ)

表-3 見掛けの拡散係数

コンクリート種類	W/C (%)	見かけの拡散係数 D_{ap} ($\text{cm}^2/\text{年}$)	表面塩化物イオン濃度 C_{so} (%)	初期塩化物イオン濃度 C_i (%)
普通	40.0	0.930	3.10	0.0194
軽量 2 種	32.0	0.270	4.30	0.0263

トテンション方式によりプレストレスを導入して接合、 $4.5\times 2.8\text{m}$ の 2 方向 PC 版を形成した。軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版の床版取替への適用にあたっては連続版となることを想定している。これに対して輪荷重走行試験は床版支間 2.5m の単純支持で行うため、床版試験体は荷重による支間中央の曲げモーメントが支間 2.5m の単純支持版と同等となる床版支間 3.0m の連続版として設計、床版厚を 180mm とした。図-5 に床版試験体の形状を示す。

試験は、床版試験体上に一列に並べた $500\times 200\text{mm}$ の載荷ブロック上を、幅 320mm の鉄輪が図-5 の平面図に示す床版中央より $\pm 1.5\text{m}$ (走行区間 3m) の範囲で往復す

ることにより行った。載荷は、建設省土木研究所で実施された階段状の荷重漸増載荷に準拠することし、初期荷重を 157kN として 4 万回走行ごとに 19.6kN ずつ荷重を増加させ、破壊に至るまで走行を行った。

3.2 疲労耐久性の評価

試験は、載荷荷重 412kN で 56 万回まで走行後、荷重を 431kN に上げて約 5 千回走行させた時点で、プレキャスト床版部で押抜き破壊に至り終了した。図-6 に輪荷重走行試験の走行回数と活荷重たわみの関係を示す。既往の研究では、床版の使用限界状態を式(4)による劣化度 D_δ が 1.0 となる、活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した理論たわみ量に達した時点としている⁹⁾。

$$\text{劣化度 } D_\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_c - \omega_0} \quad \text{式(4)}$$

ここで、 ω ：活荷重たわみの実測値 (mm)、 ω_0 ：コンクリートの全断面を有効とした理論たわみ (mm)、 ω_c ：引張側コンクリートを無視した理論たわみ (mm)

今回の試験条件では、劣化度 D_δ が 1.0 となる活荷重たわみは 4.6mm である。試験では、活荷重たわみが 4.6mm に達して以降走行回数は伸びず変位が急激に増加した。これより劣化度 D_δ が 1.0 となる使用限界状態を疲労限界とし、この時の走行回数 56 万回 (≒560,390 回) を最終走行回数、載荷荷重 431kN を最大荷重とした。本結果は、土木研究所式の輪荷重走行試験で高耐久性床版と評価される載荷最大荷重 392kN、総走行回数 52 万回を超えており⁷⁾、また、初期荷重 157kN の等価繰返し走行回数は 200 万回に達しており、軽量コンクリート 2 種を用いた PC 床版は十分な疲労耐久性を有することが示された。

4. 軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版による床版取替

4.1 橋梁および工事の概要

群馬県と長野県との県境である内山峠近くに位置する国道 254 号 16 号橋は、1973 年 10 月に建設された橋長 107m (32.1m+42m+32m)、全幅 9.9m (有効幅員 9.1m) の単純合成鋼 I 桁 (3 主桁) + 鋼方杖ラーメン (合成鉸桁橋) + 単純合成鋼 I 桁橋 (3 主桁) である。I 桁と方杖ラーメンとの間はゲルバーヒンジで繋がっており、下部工は控壁式橋脚、基礎は直接基礎で TL-20 対応となっている。

本橋では、2009 年に車道部の床版ひび割れ補修、翌 2010 年度に車道部の舗装打替えおよび床版防水、地覆・高欄の取替 (歩道部および取付部)、伸縮装置の取替 (全箇所) を施したが、その後も舗装面にポットホールや床版上下面に石灰分が析出するなどの損傷が生じたため、損傷の軽微な中央径間部を除く側径間部について床版取替が行われるに至った (図-7)。

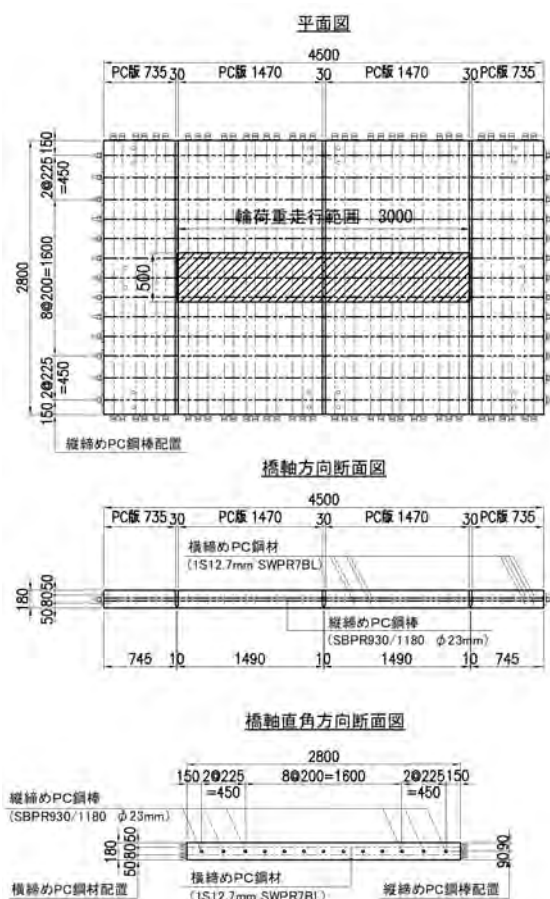


図-5 床版試験体の形状

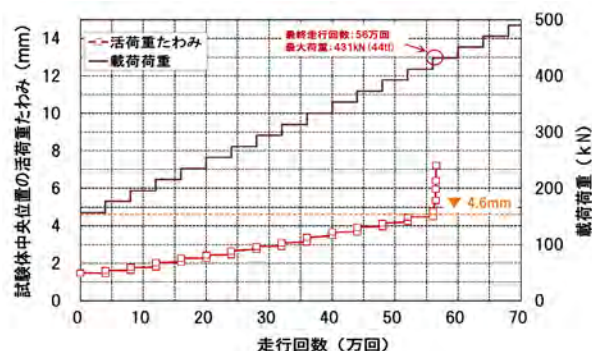


図-6 走行回数と活荷重たわみの関係

同橋を含む国道 254 号は群馬県の富岡市や下仁田町、長野県の佐久市を結ぶ最短ルートであり、第 1 次緊急輸送道路として使われている重要な道路であるため、交通量も多い。そのため、全面通行規制を行ったうえでの全断面による床版取替は難しく、片側通行規制下での幅員を分割した床版取替が採用されている。

4.2 軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版への床版の取替え

(1) 床版自重の軽減

床版取替には、先に述べた軽量コンクリート 2 種を用いた PC 床版を採用した。本床版は軽量コンクリート 2

種の使用により床版自重を軽減するだけでなく、床版を PC 構造とすることで床版厚を RC 床版の 90%に低減することができ、普通コンクリートを用いた RC 床版に対して約 34%の自重の軽減となる。本工事では、既設 RC 床版の床版厚が 220mm であったのに対して、新設するプレキャスト PC 床版の床版厚は、縦桁を見込まない主桁間隔 3.6m を床版支間として、道路橋示方書の規定より最小床版厚 200mm に設定した。これにより 1 径間あたりの床版重量は、167t から 112t と約 55t の軽減となる。本橋の既設主桁は、床版取替え時に非合成状態でクレーンや通行車両の荷重を支持する必要があるため、先に非合成化対応の補強がなされており、約 35t 重量が増加していたが、軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版の採用によりこの重量増はキャンセルされた。

(2) 床版の撤去・架設

床版の撤去・架設は、既設 RC 床版上に据え付けた 25t ラフタークレーンで 2 枚/日の実施を標準とした。幅員左側の床版取替を行う一次施工では、幅員を分割する橋軸方向カッターは 1 日の施工範囲ごとに切断を行い、クレーン設置箇所では切断を行わないことで、スタッドで接合された 2 本の主桁で床版を支持し、安定な状態を確保した。合成構造である既設主桁は、スタッドが密に配置されておりカッターのブレードと干渉する可能性が高い。また、フランジの損傷防止のためにブレードを深く入れられず、大幅な施工性低下が懸念されたため、橋軸方向の切断は中央桁上を避けて計画した。橋軸方向のカッター切断後、幅員右側の床版は 2 本の主桁で支持されるが、幅員左側の床版では床版取替時に縦桁にもスタッドを設置して、幅員右側の床版取替を行う二次施工での交通解放時に 2 本の主桁での支持を確保した (図-8)。

(3) 橋軸方向の接合

先に述べたように本床版は、橋軸方向・橋軸直角方向とも PC 構造を採用しており、工場でプレテンション方式により橋軸直角方向のプレストレスが導入されたプレキャスト床版を現場でポストテンション方式によりプレストレスを導入し、橋軸方向を接合する。

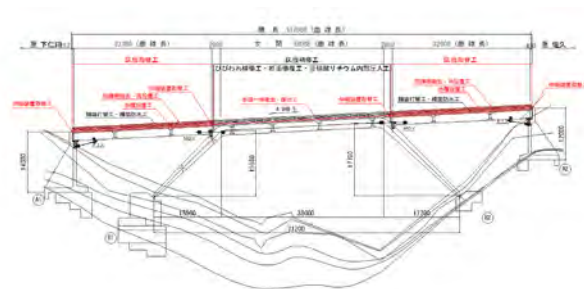
本工事では、橋軸直角方向プレテン PC 鋼材 1S15.2

(SWPR7BL)を床版 1 枚当り 16~24 本配置、橋軸方向ボステン PC 鋼材 1S21.8(SWPR19L)を半断面当り 11 本配置してプレストレスを導入した (図-9)。ここで、橋軸直角方向、橋軸方向ともに死荷重時および設計荷重時の引張応力制限はフルプレストレスの設定である。

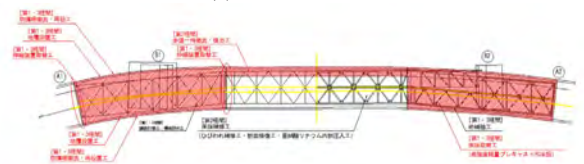
橋軸方向のプレストレスは、床版を敷設後に幅 30mm の目地部に無収縮モルタルを充填した後に導入する。現地での施工となるため、橋軸方向 PC 鋼材のシースはポリエチレン製カップラーで接続し、施工時のシース内へのモルタルの流入を防止するとともに、供用後の劣化因子浸入防止を図っている (図-10)。

(4) 橋軸直角方向の接合

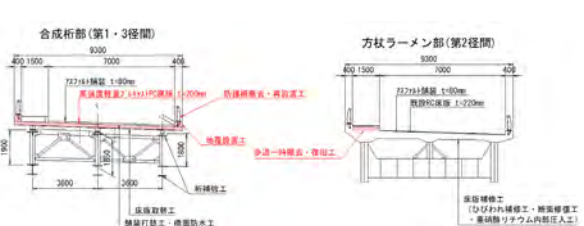
幅員を分割した施工では、一次施工側と二次施工側の



(a) 側面図



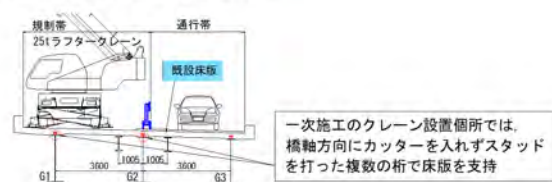
(b) 平面図



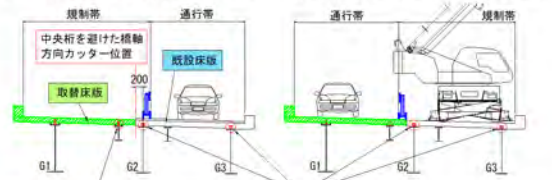
(c) 断面図

図-7 補修一般図

① 一次施工 (クレーン設置時)



② 一次施工 (床版取替完了時)



③ 二次施工 (クレーン設置時)

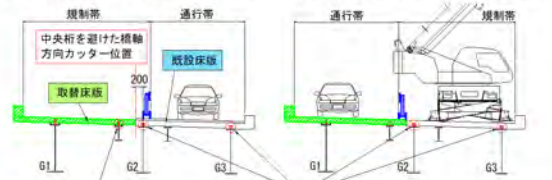


図-8 施工ステップ

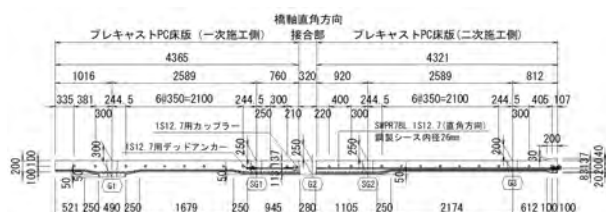


図-9 プレキャスト PC 床版の断面

間に橋軸直角方向を接合する橋軸方向の接合部が必要となる。特に幅員の小さい橋梁では、片側交互通行規制下において一般車および工事車両の通行幅の確保が困難で

あり、接合部の幅の縮小が求められる。

本工事では、先端を半楕円形状に拡張加工した鉄筋により鉄筋の付着力と拡張部の支圧力で接合部に生じる引張力を伝達する「D エッジ鉄筋継手」を採用した（図-11）。本継手は重ね継手による接合部に対して接合幅を半減（D19 の場合、接合部幅を 650mm から 320mm に縮小）できるものであり、輪荷重走行試験により疲労耐久性も確認されている⁸⁾。

今回の工事では、一次施工側は機械継手と組み合わせ、床版側からの鉄筋突出長を抑えることで、既設 RC 床版側の幅員を最大限確保した。この接合部は RC 構造として設計しているが、一次施工側の床版に予めデッドアンカーを埋め込み、接合部でカップラー接続を行い、コンクリート打設後に二次施工側端部から緊張することで接合部に 1.0N/mm^2 程度のプレストレスを付加的に導入、耐久性の向上を図った（図-12）。

橋軸直角方向接合部へのコンクリート打込みを片側の交通を解放した状態で行うと、強度が発現するまでの車両通行による主桁間のたわみ差や床版の振動の影響によるひび割れの発生が懸念された。このため、コンクリート打込み時は、1 日 1 径間ずつ夜間 0 時から早朝 5 時までの全面通行止めを実施した。限られた時間内で施工を行うため超速硬コンクリートを使用し、3 時間で $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ の強度発現を確認後、交通を解放することで交通規制を最小限に抑えつつ、ひび割れの発生を防止した。

5. おわりに

床版取替工事は大規模更新として高速道路で多く実施されているが、道路橋 RC 床版の劣化は、積雪寒冷地など環境の厳しい橋梁においても多く報告されており、本橋もその一つである。本橋のように迂回路を確保できず交通規制の難しい道路橋において、片側交通の確保や工事時間外の交通確保が可能なプレキャスト PC 床版への床版取替は有効な手段であり、軽量コンクリート 2 種を用いた本床版が、既設鋼主桁や下部工の補強の簡略化、小規模化が可能な床版として選択肢の一つとなれば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば、小林崇，中村定明，石川寛範：低含水状態の軽量骨材を使用したコンクリートの材料特性，土木学会第 72 回年次学術講演会，V-617，pp.1233-1234，2017。
- 2) 例えば、小林崇，中村定明，郷保英之，松井繁之：軽量コンクリート 2 種を用いたプレキャスト PC 床版の疲労耐久性，プレストレストコンクリート工学会，第 26 回シンポジウム論文集，pp.563-568，2017。



図-10 橋軸方向の接合

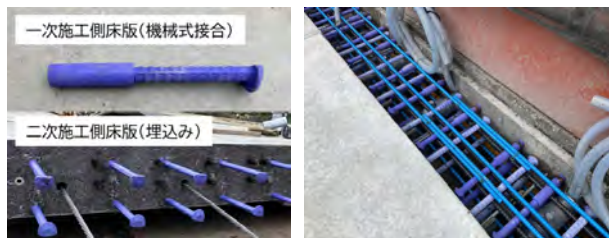


図-11 橋軸直角方向の接合
(D エッジ鉄筋継手)

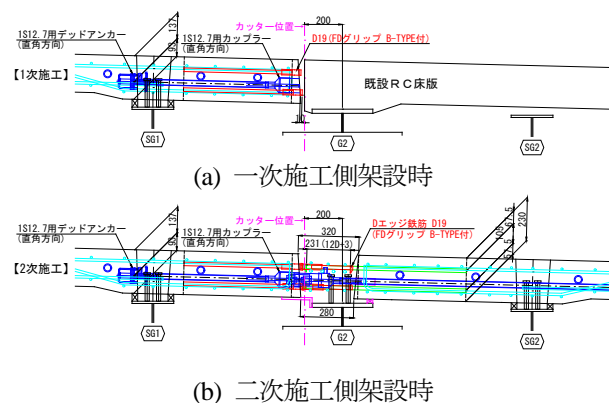


図-12 幅員の確保および付加プレストレスの導入

- 3) 土木学会：人工軽量骨材コンクリート設計施工マニュアル，コンクリートライブラリー-56，1985。
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2012。
- 5) 東山浩士，太田博士，朴淳珍，松井繁之：PC 床版の押抜きせん断耐荷力について，プレストレストコンクリート技術協会，第 7 回シンポジウム論文集，pp.13-16，1997.10。
- 6) 松井繁之，前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，第 374 号/I-6，pp.419-426，1986.10。
- 7) 松井繁之：床版研究の変遷と輪荷重走行試験機の役割，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.1-12，2006.7。
- 8) 高木祐介，小林崇，中村定明：半楕円形状に拡張加工した鉄筋を用いたプレキャスト PC 床版継手の開発，プレストレストコンクリート工学会，第 27 回シンポジウム論文集，pp.371-374，2018.11。

(2024 年 7 月 12 日受付)