

新設橋に適用するワッフル型 UFC 床版の設計

— 阪神高速道路 信濃橋入路橋 架替え工事 —

齋藤 公生*1・藤代 勝*2・谷口 祥基*3・福岡 純一*4

阪神高速道路西船場ジャンクションの改築工事に伴い信濃橋入口に新設されるランプ橋に、阪神高速道路(株)と鹿島建設(株)が共同で開発を進め実用段階に達したワッフル型 UFC 床版 (UFC: 超高強度繊維補強コンクリート) を日本で初めて適用することとなった。そこで、開発時に実施した試設計や実験結果をもとに、本橋での要求性能にあわせて設計を行った。実適用にあたっては、活荷重による床版のたわみやプレストレスによる床版のそりの抑制が求められた。同時に、舗装打替え時に床版上面が切削される事象への配慮も求められた。設計の結果、PC 床版や RC 床版に対して大幅な軽量化が実現された。床版構造全体を均質な材料で形成するため、接合部に使用する間詰め材料に UFC に準ずる材料を使用した。さらに、床版と鋼桁のずれ止めを高強度化するため、UFC に準ずる間詰め材料に太径の頭付きスタッドを組み合わせた。パネル間の接合部では、横リブに設置した孔空き鋼板ジベルとパネル間に導入するプレストレスにより、先の間詰め材を介してパネルとパネル、パネルと横リブを一体化した。万一の場合には、パネル間にプレストレスを導入する PC 鋼棒を交換できる構造とした。

キーワード: ワッフル型 UFC 床版, 2 方向プレストレス, 接合部構造, 間詰め材料

1. はじめに

ワッフル型 UFC 床版は、筆者らが共同開発を進めてきた、耐疲労性に優れ、鋼床版と同程度にまで軽量化が可能な、超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) 製のプレキャスト PC 床版である¹⁾。阪神高速道路西船場ジャンクションの改築工事に伴い、信濃橋入口が本町通を跨ぐ部分の橋 (以下、信濃橋入路橋) が架け替えられるのにあたって、新設のランプ橋にワッフル型 UFC 床版が日本で初めて適用されることとなった²⁾。本稿では、信濃橋入路橋に適用されるワッフル型 UFC 床版の設計について報告する。



写真 - 1 信濃橋入路橋 (鋼桁架設直後)

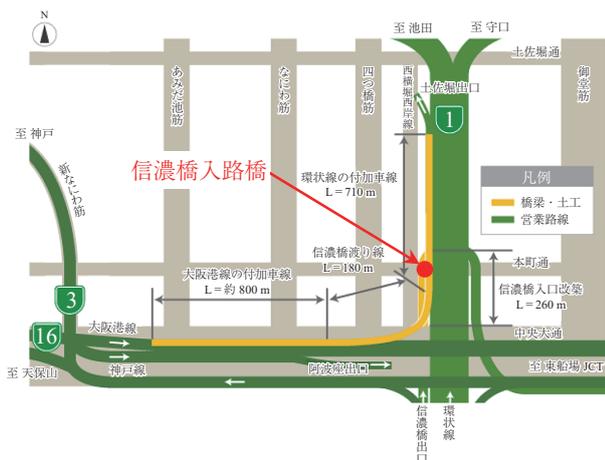


図 - 1 信濃橋入路橋 位置図

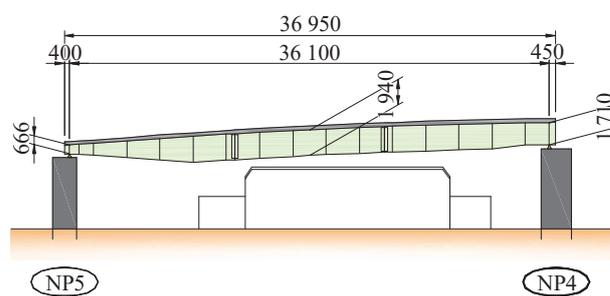


図 - 2 信濃橋入路橋側面図 (G1 桁)

*1 Kimio SAITO: 鹿島建設(株) 土木設計本部 構造設計部

*2 Masaru FUJISHIRO: 鹿島建設(株) 土木設計本部 構造設計部 橋梁グループ

*3 Yoshiki TANIGUCHI: 阪神高速道路(株) 建設事業本部 大阪建設部 設計課

*4 Junichi FUKUOKA: 阪神高速道路(株) 建設事業本部 大阪建設部 設計課

2. 信濃橋入路橋

信濃橋入路橋は、阪神高速道路西船場ジャンクションの改築に伴い、信濃橋入口が本町通を跨ぐ部分に新設される橋長 37.0 m、幅員 5 750 m の鋼単純合成鈹桁橋である（図 - 1、写真 - 1）。NP5 橋脚上で掛け違いとなる隣接の PC 橋に合わせて、NP5 橋脚での桁高が 700 mm 以下まで絞られている（図 - 2、3）。本橋の諸元を表 - 1 に示す。

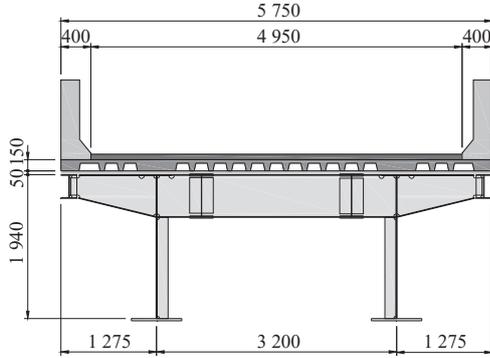


図 - 3 信濃橋入路橋断面図

表 - 1 信濃橋入路橋諸元

路線名	信濃橋入路
構造形式	鋼 2 主単純合成鈹桁橋
橋長	37.000 m
支間長	36.100 m
幅員	5.750 m ~ 5.828 m
斜角	NP5 側：88°55'32"， NP4 側：88°49'14"
縦断勾配	8.000 % ~ 1.093 %
横断勾配	-0.518 % ~ 1.500 %
桁高	G1 桁：666 mm (NP5) - 1 940 mm - 1 710 mm (NP4) G2 桁：660 mm (NP5) - 1 940 mm - 1 759 mm (NP4)
主桁間隔	3 200 mm

3. ワッフル型 UFC 床版

筆者らは、鋼床版を代替するコンクリート系床版を目指して、ワッフル型 UFC 床版を開発した。鋼床版のように主桁、側縦桁、横桁および横リブによって構成される床組に支持され、試設計によれば鋼床版と同程度にまで軽量化が可能である。

ワッフル型 UFC 床版は、スラブと橋軸方向および橋軸直角方向のリブで構成される。換言すれば、平らな板状の床版の下面に四角錐台状のくぼみが多数設けられて、軽量化が図られている。ワッフル型 UFC 床版には 2 方向のリブ内に PC 鋼材が配置され、橋軸方向および橋軸直角方向にプレテンション方式でプレストレスが導入される（図 - 4）。

輪荷重走行試験によってワッフル型 UFC 床版の優れた耐疲労性が確認されており、2015 年には土木学会技術評価証を取得している³⁾。数々の実験や検討を経て実用段階に達したワッフル型 UFC 床版が、日本で初めて信濃橋入路橋の床版として採用された。

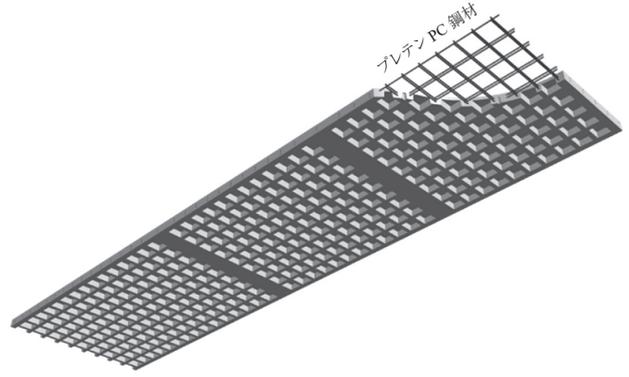


図 - 4 ワッフル型 UFC 床版概念図

4. ワッフル型 UFC 床版の設計

4.1 使用材料および制限値

信濃橋入路橋のワッフル型 UFC 床版には、これまでの共同研究と同様にエトリンガイト生成系の UFC を使用した⁴⁾。PC 鋼材には SWPR7BL 15.2 mm を使用した。エトリンガイト生成系 UFC の力学的特性値と本橋における制限値を表 - 2 に示す。

表 - 2 UFC の特性値と設計での制限値

UFC の特性値	圧縮強度	$f'_{ck} = 180 \text{ N/mm}^2$
	ひび割れ発生強度	$f_{cr} = 8.0 \text{ N/mm}^2$
	引張強度	$f_t = 8.8 \text{ N/mm}^2$
	ヤング係数	$E_{ufc} = 46\,000 \text{ N/mm}^2$
制限値	圧縮応力度	$f_{ca} = 0.6 f'_{ck} = 108 \text{ N/mm}^2$
	引張応力度	$f_{ta} = f_{cr} = 8.0 \text{ N/mm}^2$
	引張応力度(床版継目)	$f_{taj} = 0.0 \text{ N/mm}^2$
	T 荷重による横リブ間の床版のたわみ量	$\delta_a = 1.5 \text{ mm}$

4.2 応答の確認方法

本橋の設計では、スラブと 2 方向のリブで構成され、一般的なコンクリート床版より形状が複雑なワッフル型 UFC 床版の応答の確認には 3 次元 FEM 解析が適当と判断した。

着目するパネルの応答への隣接パネルの影響を考慮するため、標準部では着目パネルとその前後の 2 パネルずつ、合計 5 パネルをソリッド要素でモデル化した（図 - 5）。床版同士の接合部および床版と主桁の接合部もソリッド要素モデル化した。主桁、横リブおよび側縦桁の鋼部材をシェル要素でモデル化し、床版内に配置されるプレテンション PC 鋼材を線要素でモデル化した。施工手順にしたがって荷重を載荷するとともに、パネルの支持条件を変化させた。

4.3 平面形状

信濃橋入路橋の床版を、標準パネル 12 枚、拡幅パネル 1 枚、端部パネル 2 枚、合計 15 枚のワッフル型 UFC 床版で構成した。輸送方法を考慮して、標準パネルおよび拡幅パネルの長さを 2 450 mm に設定し、後述のように標準パネルより床版厚が増加する端部パネルの長さを 2 220 mm とした。

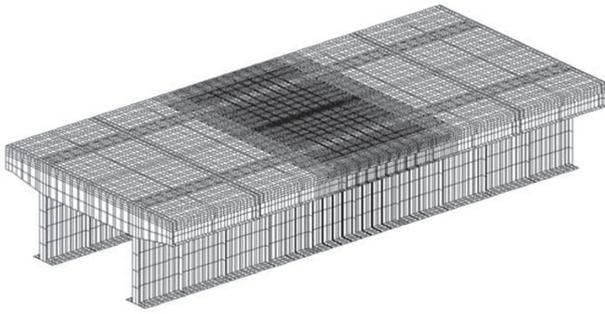
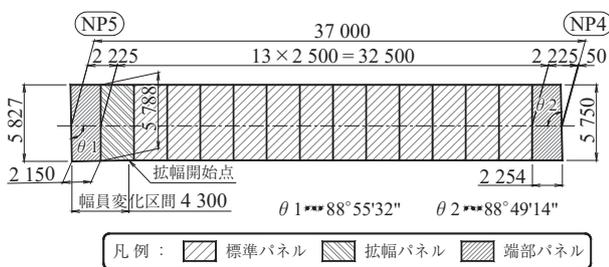


図 - 5 標準パネルの解析モデル

ワッフル型UFC床版の幅を入路橋の幅に合わせることで、NP4側の端部パネルと標準パネルの幅を5750mmとした。幅員が変化する区間に配置される拡幅パネルとNP5側の端部パネルの幅を、幅員に合わせて5750mmから5827mmに変化させた。斜角には端部パネルの形状に対応した(図-6)。



注) 図中のパネル長さにはパネル間の間詰め幅が含まれる。

図 - 6 ワッフル型 UFC 床版の平面形状

4.4 断面形状および PC 鋼材配置

(1) 標準パネル

前述の制限値のなかで、T荷重による横リブ間での床版のたわみ量の設定を満足するため、信濃橋入路橋では標準パネルの厚さを150mmとした。ここで、既往の試設計の結果から、より薄く軽量のワッフル型UFC床版でも、発生応力度の制限値を満足することを確認している。この結果、T荷重による横リブ間の相対たわみ量は最大で1.39mmとなった(図-7, 9)。

舗装打替え時に床版上面が切削される状況を想定し、スラブ厚を既往の試設計より5mm厚い45mmとし、リブの高さを105mmとした(図-8)。

床版断面の図心から断面内のPC鋼材位置までの偏心を小さく抑えてプレストレスによる標準パネルのそり変形を抑制するため、橋軸直角方向のPC鋼材を鉛直に2本並べてリブ内に配置し、鉛直に並んだ橋軸直角方向のPC鋼材の間に橋軸方向のPC鋼材を水平に2本並べてリブ内に配置した。ここでも舗装打替え時に床版上面が切削される場合を想定し、最上段に配置される橋軸直角方向のPC鋼材までのかぶりに規定のかぶり⁵⁾(PC鋼材径の1.5倍)に対して10mmの余裕をもたせ、床版上面からPC鋼材中心までの距離を41mmとした。最下段に配置される橋軸直角方向のPC鋼材の中心位置を床版上面から85mm(床版下

面から65mm)とした。この結果、PC鋼材の偏心量は橋軸方向断面で4.9mm、橋軸直角方向断面で15.5mmとなり、FEM解析から求められるプレストレスによる床版設置時の橋軸方向の床版のそり量が0.72mmとなった(図-10)。一般に道路橋床版に求められる平坦性と比較しても、十分に小さい量といえる。

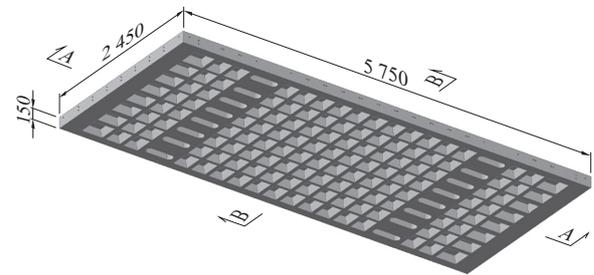
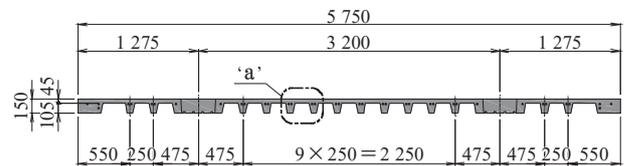
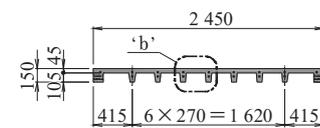


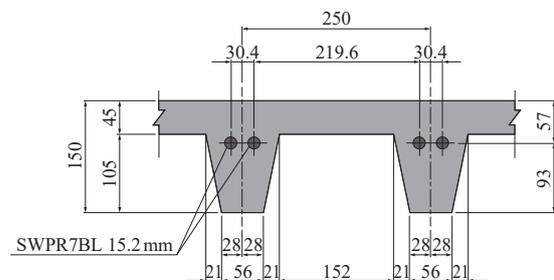
図 - 7 標準パネル概念図



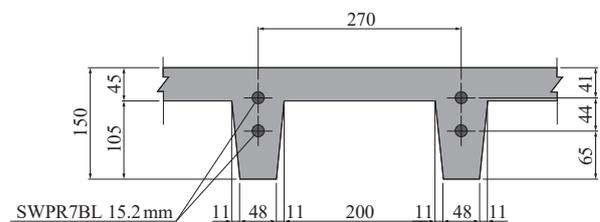
(a) 標準パネル横断面図 (A-A 断面)



(b) 標準パネル縦断面図 (B-B 断面)



(c) 橋軸方向リブ拡大断面図 ('a' 部拡大)



(d) 橋軸直角方向リブ拡大断面図 ('b' 部拡大)

図 - 8 標準パネル断面図 (リブ拡大断面図)

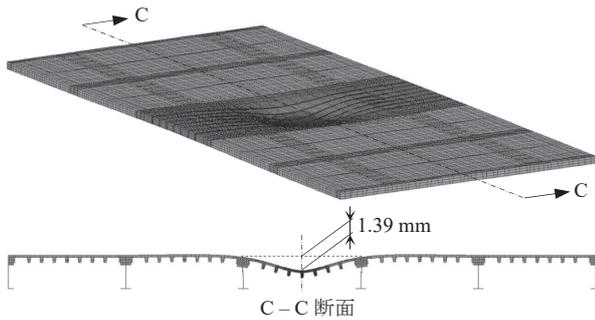


図 - 9 T 荷重による変形図

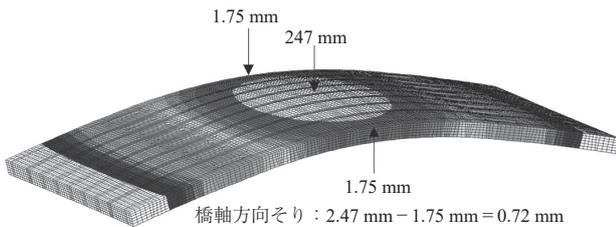


図 - 10 プレストレスによる変形図

橋軸方向に配置される PC 鋼材の中心位置を床版上面から 57 mm として、最上段に配置される橋軸直角方向の PC 鋼材の直下となるようにした。このとき、リップ内に水平に並ぶ 2 本の PC 鋼材間に規定のあき (PC 鋼材径) を確保した。

橋軸方向リップの中心間隔を 250 mm として、道路橋示方書に規定される T 荷重 (幅 : 500 mm) がどこに荷重された場合も、真下にはつねに複数のリップが存在する配置とした。一方で、橋軸直角方向リップの中心間隔には幾何的な制約を設けず、発生応力が制限値を満たす範囲で設定することとした。本橋では、橋軸直角方向リップの中心間隔を橋軸方向リップの中心間隔より 20 mm 広い 270 mm に設定した。

橋軸方向リップの断面形状を、PC 鋼材が配置される位置で PC 鋼材から左右へ規定のかぶりを満足する幅を有し、下端に向かって狭くなるよう、上端を 98 mm、下端を 56 mm とした。橋軸直角方向リップの断面形状を、最下段の PC 鋼材が配置される位置で PC 鋼材から左右へ規定のかぶりを満足する幅を有し、下端に向かって狭くなるよう、上端を 70 mm、下端を 48 mm とした。

(2) 端部パネル

端部パネルには伸縮装置設置用に深さ 45 mm の切欠きを設けるため、端部パネルの厚さを標準パネルより 15 mm 厚い 165 mm とした。スラブ厚を標準パネルと同じ 45 mm とし、リップの高さを 120 mm とした。

4.5 床版重量の比較

本橋のワッフル型 UFC 床版の重量を、他の形式の床版と比較する。ワッフル型 UFC 床版の断面形状が変化するため、標準パネル 1 枚の長さ隣接するパネルとの間詰め部の長さを含めた 2.5 m の重量で比較する (表 - 3)。まず、主に旧道路橋示方書にしたがって設計された今日よりも薄い RC 床版の更新用に開発された平板型 UFC 床版との比較を示す。ワッフル型とすることによる軽量化の効果を明

らかにするために、平板型 UFC 床版の厚さをワッフル型 UFC 床版と同じ 150 mm とした。次に、場所打ちのプレストレストコンクリート床版 (以下、PC 床版) および鉄筋コンクリート床版 (以下、RC 床版) との比較を示す。PC 床版や RC 床版はワッフル型 UFC 床版と床版の支持機構が異なるが、主桁中心間隔が 3.200 m の場合の最小床版厚を道路橋示方書に規定される式から求め、重量を算出した⁵⁾。このとき、主桁間での最小床版厚は、PC 床版で 220 mm、RC 床版で 300 mm となった (図 - 11)。場所打ちの PC 床版および RC 床版と比較するため、平板型 UFC 床版とワッフル型 UFC 床版の重量には間詰め材の重量を含めた。

表 - 3 床版重量の比較 (標準部 2.5 m あたり)

	ワッフル型 UFC 床版	平板型 UFC 床版	PC 床版	RC 床版
床版 (kN)	35.3	49.4	98.8	127.0
間詰め (kN)	7.9	5.9		
合計 (kN)	43.2	55.3	98.8	127.0
比率 (%)	100.0	128.0	228.7	294.2

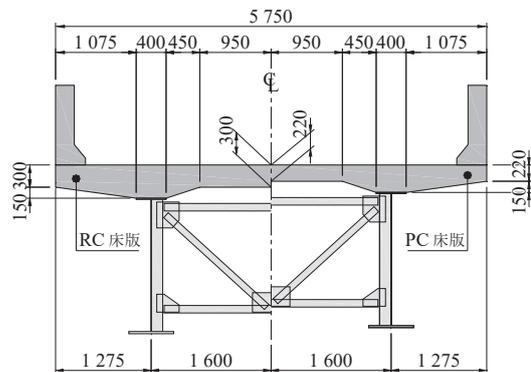


図 - 11 PC 床版, RC 床版断面図

ワッフル型 UFC 床版に対して平板型 UFC 床版が 28 % 重くなっており、本比率が平板型からワッフル型とすることによる UFC 床版軽量化の効果といえる。一方で、ワッフル型 UFC 床版に対して、PC 床版が 128.7%、RC 床版が 194.2% 重くなっている。したがって、ワッフル型 UFC 床版は新設の道路橋におけるコンクリート系床版としては、大幅な軽量化が実現できる床版であるといえる。

5. 接合部の設計

5.1 間詰め材料

信濃橋入路橋では、接合部を含む床版構造全体をできる限り均質な材料で形成すること、および床版と鋼桁間のずれ止めを高強度化することを目的に、床版同士の接合部およびスタッド孔を含む床版と床組みの接合部に充填する間詰め材として、UFC に準ずる材料 (以下、間詰め UFC) を適用した⁶⁾。間詰め材料としての充填性を確保するため、エトリンサイト生成系の UFC から鋼繊維量を減らすこととし、 $L=15$ mm の鋼繊維のみを 0.75 vol% 混入させた。本材料の間詰め材としての充填性能を、実物大の接合部模型を用いた試験によって確認したうえで、採用を決定した

(写真 - 2)。

5.2 床版と鋼桁の接合

本橋においては、鋼桁同士の接合部で添接板とボルトの突出高さが 33 mm であることを考慮して、ワッフル型 UFC 床版下面と鋼主桁フランジを含む床組み上面の隙間を 50 mm とした (図 - 15)。ここで、合成桁における床版と鋼桁の接合部では、作用する水平せん断力に対してずれ止めを設計する。本橋では、前述のとおり NP5 側の桁端部において、主桁高さが 700 mm 以下に抑えられているため、合成断面の中立軸から接合部までの距離が小さくなり、接合部に作用する水平せん断力が大きくなる。G1 桁に着目すると、桁高が 1 710 mm の NP4 において接合部に作用する水平せん断力が 571 N/mm なのに対して、桁高が 666 mm の NP5 において接合部に作用する水平せん断力が 1 162 N/mm と約 2 倍になっている。そこで、φ 25 mm の頭付きスタッドと間詰め UFC を組み合わせたずれ止めの降伏耐力が、φ 22 mm の頭付きスタッドと有機繊維入り無収縮モルタルを組み合わせた従来のずれ止めの約 1.5 倍にあたる 150 kN/本となることを押抜きせん断試験によって確認し、設計に反映した⁷⁾。すなわち、接合部に作用する水平せん断力が大きくなる NP5 側の端部パネルと拡幅パネルの 2 パネルに φ 25 mm の頭付きスタッドを採用し、残る 13 パネルに φ 22 mm の頭付きスタッドを採用した。NP5 側の端部パネルには、16 箇所のスタッド孔に φ 25 mm の頭付きスタッドをそれぞれ 6 本ずつ配置した (図 - 12, 13)。



写真 - 2 実物大模型による充填試験

5.3 パネル間の接合

本橋におけるワッフル型 UFC 床版のパネル間の接合部は、つねに横リブ上に位置し、パネル同士を連結すると同時にパネルと横リブを結合する。すなわち、横リブの上フランジに設置された孔空き鋼板ジベル (以下、PBL) を介して、間詰め UFC と横リブを合成化し、PC 鋼棒を用いてパネル間にプレストレスを導入してパネル同士を連結するとともに、パネルと間詰め UFC を一体化することで、パネルと横リブを結合する。ここで、パネル間の接合部には、各作用の組合せに対して引張応力が発生しないようにプレストレスを導入する。

本橋では接合用の PC 鋼棒として、B 種 1 号 (SBPR930/1080) φ 17 mm を採用した。ワッフル型 UFC 床版の橋軸方向リブ間に PC 鋼棒を 2 本ずつ配置し、橋軸直角方向の縁端リブに定着した。PC 鋼棒の緊張作業ならびに万一の交換作業 (PC 鋼棒の撤去・再挿入) を考慮して、橋軸直角方向の縁端リブと隣り合う中間リブとの下端間隔を標準部 (222 mm) よりも広い 280 mm に設定した (図 - 14, 15)。PC 鋼棒の防錆には、ダクロタイズド処理を採用した。

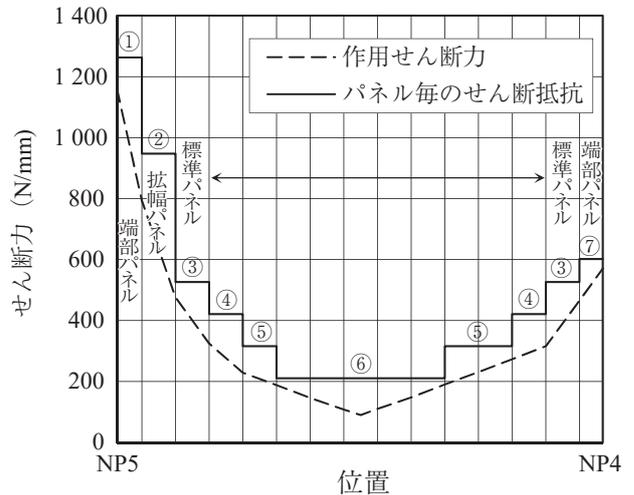


図 - 12 作用せん断力とずれ止めのせん断抵抗

①	②	③	④
φ 25-6 本	φ 25-6 本	φ 22-5 本	φ 22-4 本
210 mm ピッチ	280 mm ピッチ	280 mm ピッチ	280 mm ピッチ
⑤	⑥	⑦	
φ 22-3 本	φ 22-2 本	φ 22-4 本	
280 mm ピッチ	280 mm ピッチ	210 mm ピッチ	

図 - 13 頭付きスタッドの配置図

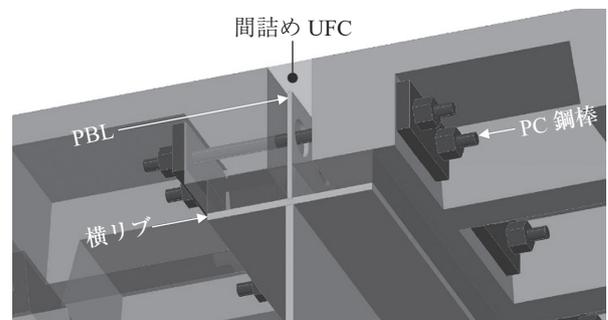


図 - 14 パネル間接合部概念図

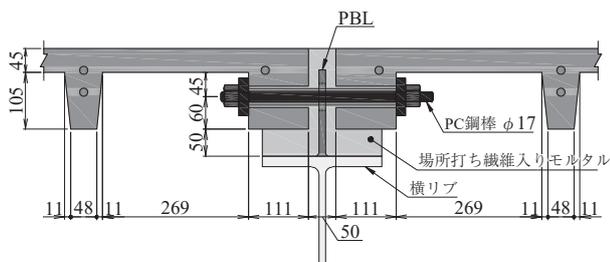


図 - 15 パネル間接合部縦断面図

6. おわりに

新設される信濃橋入路橋に適用されるワッフル型 UFC 床版の設計について報告した。本橋におけるワッフル型 UFC 床版の設計は、以下にまとめられる。

- (1) 活荷重に対する横リブ間の相対たわみを 1.5 mm 以下とするため、ワッフル型 UFC 床版の厚さを 150 mm とした。
- (2) 舗装打替えに伴う床版上面の切削を想定して、床版上面から最上段の PC 鋼材までのかぶりを 33.4 mm として規定のかぶりに対して 10 mm の余裕を持たせた。
- (3) プレストレスによるワッフル型 UFC 床版のそり変形を抑制するため、橋軸方向の PC 鋼材を水平に 2 本並べてリブ内に配置し、偏心量を 4.9 mm とした。
- (4) 本橋のワッフル型 UFC 床版に対して、平板型 UFC 床版は 128 %、PC 床版は 229 %、RC 床版は 294 % の重量となった。
- (5) 床版構造全体を均質な材料で形成し、床版と鋼桁間のずれ止めを高強度化するため、間詰め材としてエトリングایت生成系 UFC から鋼繊維量を 0.75 vol % まで減じた間詰め UFC を適用した。
- (6) φ 25 mm の頭付きスタッドと間詰め UFC の組合せに

よるずれ止めの高強度化を押抜きせん断試験によって確認し、設計に反映した。

- (7) パネル間の接合部では、PBL およびプレストレスにより、間詰め UFC を介してパネルとパネルおよびパネルと横リブを結合した。万一に備えて PC 鋼棒の撤去・再挿入が可能な細部構造を採用した。

日本初の実適用となるワッフル型 UFC 床版の研究開発では「UFC を用いた道路橋床版に関する検討会」において、大阪大学松井名誉教授、長岡技術科学大学長井名誉教授、東京工業大学二羽教授、岐阜大学内田教授および神戸大学三木教授にご指導をいただいたことに、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇, 齋藤公生: 鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版の開発, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.1, pp.37-42, 2014.1
- 2) 小坂 崇, 金治英貞, 森川 信, 堀岡良則, 丹羽信弘, 仲村賢一: 西船場ジャンクション設計コンセプトと構造計画: 橋梁と基礎, Vol.53, pp.8-14, 2019.2.
- 3) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート (UFC) 道路橋床版に関する技術評価, 技術推進ライブラリー No.17, 2015.
- 4) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書, 技術推進ライブラリー No.3, 2006.11
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2018.11
- 6) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー No.113, 2004 年 9 月
- 7) 小嶋進太郎, 一宮利通, 永井勇輔, 小坂 崇, 長澤光弥, 近藤恒樹: 高強度繊維補強モルタルを間詰めとした UFC 床版と鋼桁の接合部に関する検討, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, V-59, 2019.9

【2019 年 8 月 29 日受付】



刊行物案内

プレキャスト PC 床版による道路橋更新設計施工要領

2018 年 3 月

定 価 7,407 円 + 税 / 送料 300 円

会員特価 5,600 円 + 税 / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会