

# 新設橋に適用するワッフル型 UFC 床版の製作と施工

## — 阪神高速道路 信濃橋入路 架替え工事 —

藤代 勝\*1・木原 大樹\*2・谷口 祥基\*3・藤林 健二\*4

阪神高速道路(株)と鹿島建設(株)は、2011年から超高強度繊維補強コンクリート<sup>1)</sup>(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下 UFC)を使用した道路橋床版の研究開発に取り組んできた。UFC 床版は、薄肉・軽量でありながら非常に高い耐久性を有するプレキャスト PC 床版である<sup>2)</sup>。UFC 床版には、旧設計基準で設計された薄い RC 床版より軽量な平板型と、鋼床版と同程度までの軽量化を目指したワッフル型があり、2018 年度には阪神高速 15 号堺線の床版取替工事に平板型 UFC 床版を実構造物へ適用した<sup>3)</sup>。続く 2019 年度には阪神高速道路西船場ジャンクションの改築事業において、国道 172 号(本町通)と交差する新設の鋼単純合成鈹桁橋(以下、信濃橋入路橋)に日本で初めてワッフル型 UFC 床版を適用した。

ワッフル型 UFC 床版の適用によって、床版の高耐久化と同時に、コンクリート系床版ではこれまでにない軽量化、床版架設工事の急速化を実現した。信濃橋入路橋へのワッフル型 UFC 床版の適用は、今後の適用拡大を見据えた試験的な実施工の位置付けである。本稿では、専用製作架台を用いて 2 方向にプレストレスを導入したワッフル型 UFC 床版の製作と架設について報告する。

キーワード：ワッフル型 UFC 床版，超軽量，2 方向プレストレス

### 1. はじめに

ワッフル型 UFC 床版は、阪神高速道路(株)と鹿島建設(株)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、UFC 製のプレキャスト PC 床版である<sup>4)</sup>。阪神高速道路西船場ジャンクションの改築事業に伴い、信濃橋入路が本町通を横過する部分の信濃橋入路橋を架け替えるのにあたって、新設のランプ橋にワッフル型 UFC 床版を日本で初めて適用することとなり、本誌で設計報告を行っている<sup>5)</sup>。本稿では、専用製作架台を用いて 2 方向にプレストレスを導入するワッフル型 UFC 床版の製作と信濃橋入路橋での架設について報告する。

### 2. 工事概要

西船場ジャンクション改築事業において<sup>5)</sup>、既設の信濃橋入路を改築した。改築現場は大阪市の中心部に位置し、国道 172 号(本町通)の上空となり大変狭隘な現場環境下にある。このため、改築にあたっては、できるかぎりの工事の合理化や急速化が要求された。そこで、信濃橋入路橋において日本で初めてワッフル型 UFC 床版を適用し、床版の高耐久化と軽量化、および床版架設の急速化を実現した。信濃橋入路橋の構造概要を図 - 1、2 に示す。

### 3. ワッフル型 UFC 床版の構造

ワッフル型 UFC 床版の断面は、スラブおよび橋軸方向と直角方向のリップで構成される(図 - 3)。つまり、平板状の床版下面が四角錐台状にえぐり取られたワッフル型とな

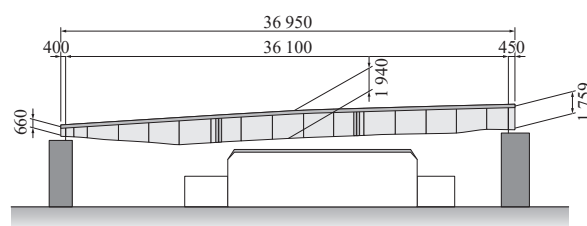


図 - 1 信濃橋入路橋(側面図)

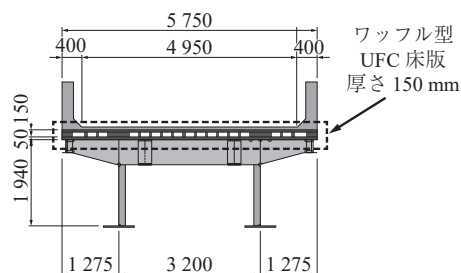


図 - 2 信濃橋入路橋断面図

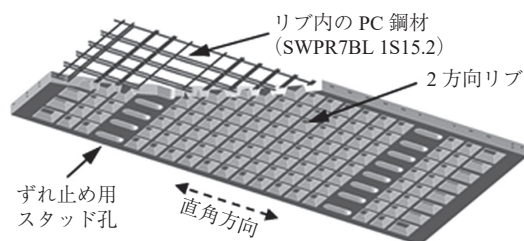


図 - 3 ワッフル型 UFC 床版概要

\*1 Masaru FUJISHIRO: 鹿島建設(株) 土木設計本部 構造設計部 橋梁グループ 設計長

\*2 Daiki KIHARA: 鹿島建設(株) 関西支店 土木部

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

\*4 Kenji FUJIBAYASI: 阪神高速道路(株) 建設事業本部 大阪建設部 大阪改築事務所 工事長代理

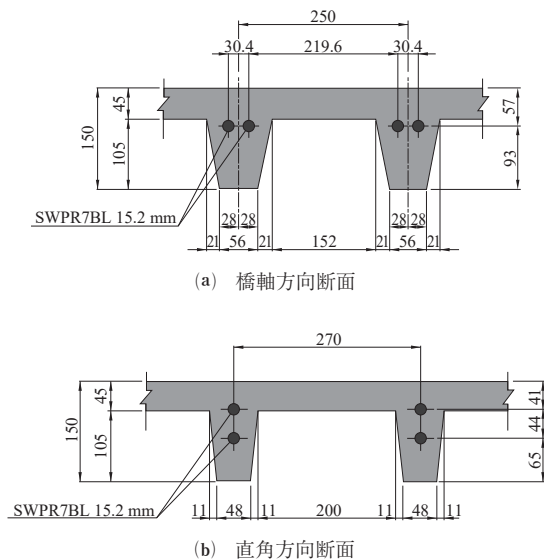


図 - 4 ワッフル型 UFC 床版断面図

り、軽量化が図られた構造である。2方向のリップ内にはPC鋼材（SWPR7BL 15.2 mm）が配置され、断面にはプレテンション方式で20 N/mm<sup>2</sup>を超える高レベルのプレストレスが導入される。これにより、活荷重による発生応力の変動幅が大きい薄肉部材でも、合成応力をひび割れ発生強度以下に抑えることができる。

ワッフル型 UFC 床版の断面を図 - 4 に示す。橋軸方向リップの中心間隔は250 mmとし、道路橋示方書規定のT荷重（載荷幅：500 mm）がどこに載荷されても、直下にはつねに複数のリップが存在する配置とした。一方、直角方向リップの中心間隔は、発生応力が制限値を満たすよう270 mmに設定した。床版厚は、T荷重作用時におけるパネル1枚（床版支間2.5 m）あたりの相対たわみ量を、1.5 mm以下に抑えられる剛性を確保するため、スラブ厚を45 mm、リップの高さを105 mm、合計で150 mmとした。

PC鋼材の配置にあたっては、製作時の反りを抑制するため床版断面図心からPC鋼材図心までの偏心量を小さくする工夫をした。直角方向には鉛直に2本並べた配置とし、その間に橋軸方向のPC鋼材を水平に2本並べて配置することで、両方向ともに図心付近にPC鋼材を配置することが可能となり、偏心量を小さく抑えることができた。

## 4. ワッフル型 UFC 床版の製作

### 4.1 製作手順

信濃橋入路橋に使用するワッフル型 UFC 床版は図 - 5 に示すフローに従って標準パネルを13枚、端部パネル2枚の合計15枚を製作した。

2方向にプレテンション方式でプレストレスを導入するワッフル型 UFC 床版の製作においては、1方向の緊張設備を有する一般的なプレキャスト PC 床版製造ラインに直交する緊張架台を追加設置することが考えられるが、本工場の床版を製作する工場のレイアウト上、その方法は不可能であった。そこで、過去にプレテンション方式で2方向にプレストレスを導入した羽田D滑走路の UFC 床版の製

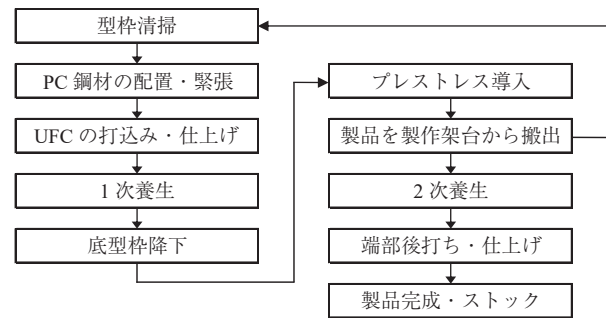


図 - 5 床版製作のフロー

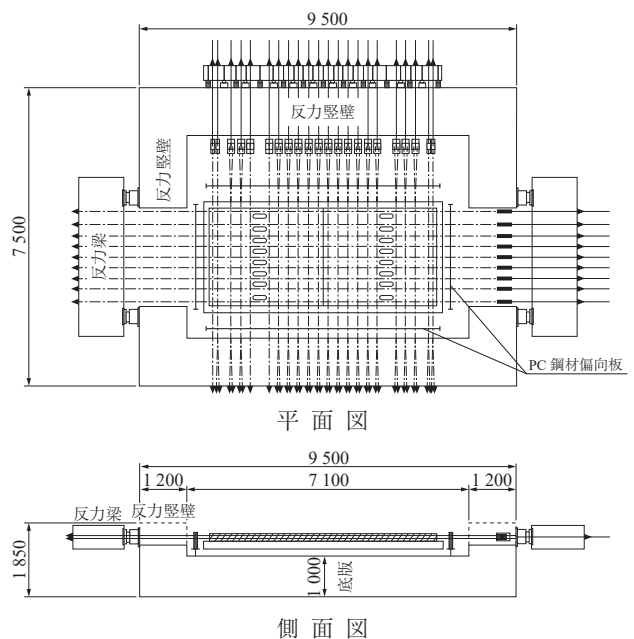


図 - 6 専用製作架台

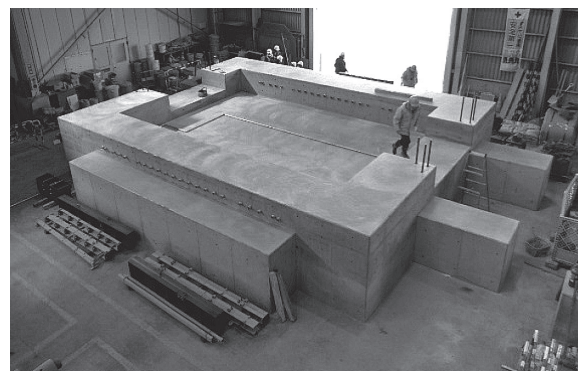


写真 - 1 専用製作架台

作事例を参考に、図 - 6、写真 - 1 に示すような4辺にPC鋼材の緊張力を保持する機能を有するコンクリート製の専用製作架台を構築した。

ワッフル型 UFC 床版の製作手順は以下のとおりである。

- ① 専用製作架台の内部に、側枠および底枠を設置し、床版下面のリップ成形には、柔軟性のあるウレタン製の四角錐台の型枠を底枠上に設置した。
- ② PC鋼材を型枠内に配置・緊張して、製作工場敷地内

にあるプラントで製造した UFC を打ち込んだ。

- ③ UFC が凝結するタイミングで最終仕上げを行ったのち、1 次養生として 30℃ の湿潤養生を実施した。
- ④ 翌日、UFC がプレストレスを導入可能な強度に至っていることを、同条件で養生されたテストピースで確認し、側枠および底枠を脱枠した。
- ⑤ PC 鋼材を直角方向、橋軸方向の順に解放することでワッフル型 UFC 床版にプレストレスを導入した。
- ⑥ PC 鋼材の余長を切断して製品を専用製作架台から仕上げヤードに仮移動し、端部の切断余長を処理して 2 次養生を行った。
- ⑦ 床版の直角方向端部は外面に露出するため、あらかじめ PC 鋼材端部のかぶり確保のために凹部を設けている。この部分にステンレスメッシュを配置し有機繊維入り無収縮モルタルを充填する端部の後打ち処理を行って製品が完成し、仮置きヤードにストックした。自重とプレストレスによる仮置き期間中のクリープ変形が最小となるよう、仮置き時の床版の支持点位置を決定した。

#### 4.2 プレテンション PC 鋼材の緊張

ワッフル型 UFC 床版の特徴である 2 方向のプレストレス導入手順について詳述する。床版パネルは非常に薄いため、PC 鋼材の配置誤差によって好ましくない変形が生じるおそれがある。そのため、通常の  $\pm 5 \text{ mm}$  より厳しい管理限界 ( $\pm 2 \text{ mm}$ ) を設けた。この  $\pm 2 \text{ mm}$  は偏心により作用する想定外のプレストレスに対し、設計上問題とならない範囲である。

一般的なプレテンション製品の製作は、延長のある製造設備によって長い PC 鋼材のたるみを取り、緊張架台で同時に緊張するため、PC 鋼材ごとの緊張力はほぼ同じとなる。しかし、専用製作架台は床版 1 枚を製作するサイズであるため、短い PC 鋼材を 1 本ごとに緊張して、セットロスにばらつきがあるくさび定着とした場合、1 本ごとの緊張力が不均等になる危険性があると考えられた。プレストレスが不均等に導入された場合には、弾性変形によって設計で想定していない挙動によって局所的な応力が発生するおそれがあることから、PC 鋼材の配置のほか、緊張力を均等にする配慮が重要であると考えられた。そこで、床版に導入するプレストレスを均等にするため、専用製作架台の剛性や緊張方法、手順において工夫を行った。

専用製作架台は、PC 鋼材緊張後の反力を保持する耐力と、緊張後の形状を保持する剛性を確保するため、7.5 m  $\times$  9.5 m、高さ 1.85 m の矩形とした鉄筋コンクリート製とし、内部に型枠を設置できる形状とした (写真 - 1)。弾性 FEM 解析を行い、架台の外側が緊張力で浮き上がらない剛性と自重を有する形状とした。PC 鋼材の緊張反力に対し、橋軸方向はその両端を反力壁として PC 鋼材を配置する孔を設け、直角方向は、標準パネルと端部パネルで PC 鋼材配置が異なることからそれぞれ専用の反力梁を作製し、それを入れ替えることにより配置変更に対応した (図 - 6)。

橋軸方向の緊張方法は、個々の緊張力のばらつきを抑え

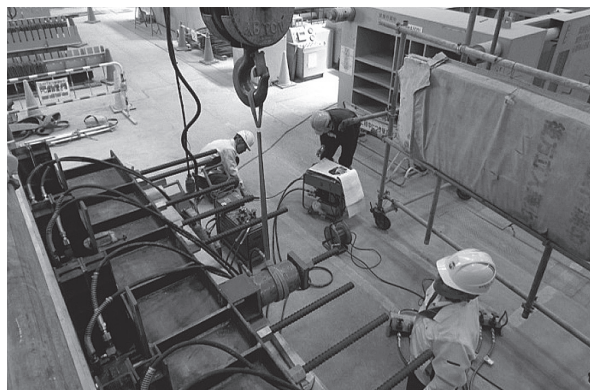


写真 - 2 橋軸方向の緊張作業

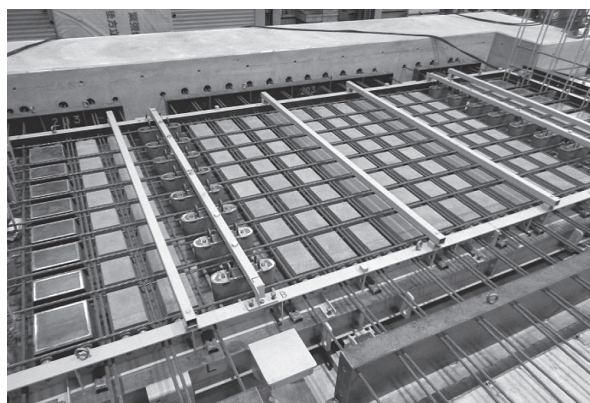


写真 - 3 床版製作状況

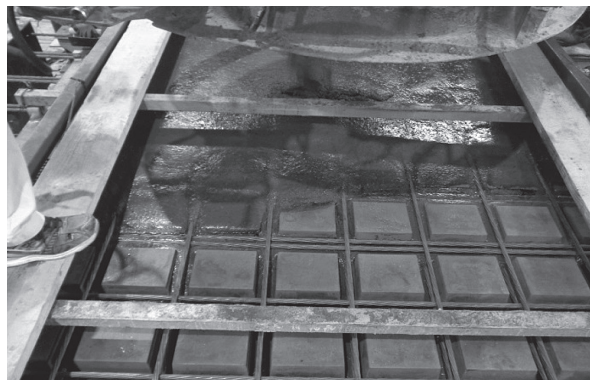


写真 - 4 UFC の打込み状況

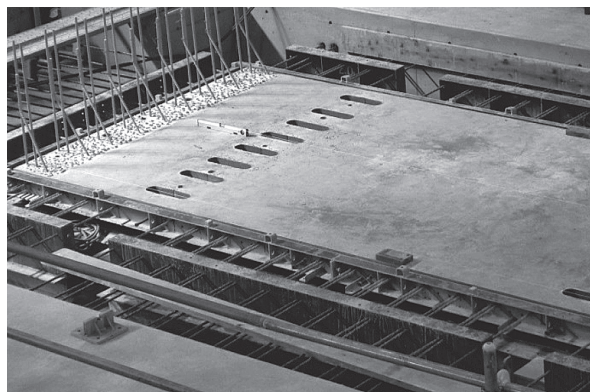


写真 - 5 1 次養生完了状況

るため、PC 鋼より線 2 本を 1 組として  $\phi 32 \text{ mm}$  の総ネジ PC 鋼棒と接続する治具を使用し、PC 鋼棒側を緊張してナット定着することでセットロスによるばらつきを小さくした。また、解放時に全体の張力を均等に解放できるように反力壁の外側に 10 台のジャッキと鋼製梁を挟んで定着した。緊張の状況を写真 - 2 に示す。

直角方向の緊張方法は、標準パネルと端部パネルの PC 鋼材の配置変更に対応するため、鋼材配置に応じて貫通孔を設けた 2 種類の反力梁を用意した。反力梁は解放時に両側の梁の変位を均等に制御できるように大型ジャッキを設置し反力を支持した。反力梁は PC 鋼材の緊張によってジャッキを支持点とした単純梁として曲げを受けるため、 $\phi 36 \text{ mm}$  の総ネジ鋼棒で、梁に曲げひび割れが発生しないプレストレスを導入した PC 梁とした。また、専用製作架台側のジャッキ支持点付近には、支持点の大きな反力により構造的な局部応力が発生するため、ひび割れを抑制するために総ネジ鋼棒で鉛直方向にもプレストレスを導入した。緊張完了後の状況を写真 - 3 に示す。床版下面のリブ成形には、柔軟性のあるウレタン製型枠を用いることで、1 次養生中の自己収縮の影響を受けないよう配慮を行った。

1 枚目の床版パネル製作時には、設計緊張力が確実に導入されることを確認するため、緊張中の PC 鋼材の応力度をひずみゲージを用いて随時計測した。想定した総ネジ鋼棒や反力梁のなじみによる緊張力の低下などが確認でき、2 枚目以降の製作でも同様の管理を行うこととした。

### 4.3 プレストレスの導入

UFC の打込みは、床版の中央から周囲のリブに確実に充填されるようゆっくりと実施した（写真 - 4）。1 次養生を行い所定の強度発現を確認したのち（写真 - 5）に、側枠を解体し、底版枠を下方に降下させて脱枠した。

型枠の脱型後、直角方向からプレストレスの導入を行った。プレテンション PC 鋼材の解放は、PC 反力梁を支持するジャッキの油圧を解放することにより実施した。解放時にストロークが戻る量を確保するため、PC 鋼材の緊張前にはあらかじめ必要量のストロークを確保して油圧をロックした。解放作業は、床版がプレテンション PC 鋼材の解放によって移動しないように、直角方向の両側に設置した反力梁両端の合計 4 台のジャッキを同時に解放した。この作業のために、ストローク量を高感度変位計で計測しながら同調して解放作業を実施した。

橋軸方向は、鋼製梁を支持する 10 台のジャッキを用いて一方向に解放した。PC 鋼材の配置ピッチやそれを支持するジャッキが、主桁や端部リブ付近で均等に配置されていないため、場所によってジャッキの反力は異なる。鋼製梁が剛性の高い梁であればジャッキ反力は均等になると考えられるが、鋼製梁が変形するとプレストレス導入中に不均等な状態が発生する。これを回避するため、ジャッキ配置に応じて油圧を 2 系統にし、鋼製梁の変形を極力低減した配置と油圧のバランスを解析で検討して、段階的に解放しプレストレスの導入を行った。このような床版を大量生産をする場合には、緊張のために用いる梁は、曲げ剛性の

高い反力梁を用いることで、ジャッキを多数使用してプレストレスを導入する場合と比較して複雑な制御が不要となるため、プレストレスの導入作業がより合理的に行えると考えられる。

## 5. ワッフル型 UFC 床版の架設

### 5.1 架設手順

本橋におけるワッフル型 UFC 床版の架設作業は、架設準備、運搬、設置、間詰め部の充填、プレキャストパネル同士の接合の 5 段階に分かれる。各プレキャストパネルの橋軸方向にはプレテンション方式でプレストレスが導入されているため、平板型 UFC 床版のように架設後にポストテンションでプレストレスを導入する方法に比べ手順がシンプルになっている。具体的には、床版設置後に床版と床



写真 - 6 架設前の鋼主桁

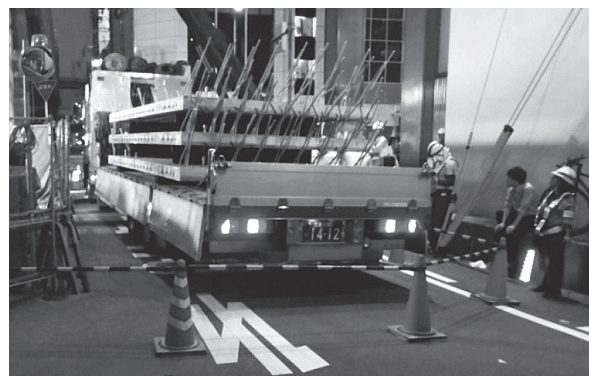


写真 - 7 現場への搬入状況



写真 - 8 床版設置状況

版間の間詰め部の充填，橋軸方向 PC 鋼材の挿入・緊張・グラウト，床版と鋼桁間の間詰め部の充填の工程が必要となる。

(1) 架設前準備

床版架設前の状況を写真 - 6 に示す。架設前準備では，主桁と床版の間に充填する間詰め UFC の型枠として，鋼主桁，横桁および側縦桁のフランジ端部に型枠用のシールスポンジを設置した。また，鋼桁上面の測量を行い，床版設置後の上げ越し高さに合うように，床版設置時の高さ調整ボルトの突出量を決定した。合成桁として設置する主桁上のずれ止め用頭付きスタッドおよび横リブ上の孔あき鋼板ジベルは，工場であらかじめ設置したため，現場でのジベルなどの溶植作業を無くした。

(2) 床版の運搬

本橋のワッフル型 UFC 床版重量は，標準パネルで 35.3 kN/枚，もっとも重い端部パネルで 38.3 kN/枚である。15 t トラック 1 台に 3 枚のプレキャストパネルを積載することが可能であった。三重県の製作工場から架設現場に搬入した状況を写真 - 7 に示す。この結果，1 径間 15 枚の床版架設に対し，2 夜間で実施した架設において，合計 5 台の 15 t トラックでワッフル型 UFC 床版の搬入を完了した。

(3) 床版の設置

本橋のワッフル型 UFC 床版の設置は夜間，60 t ラフテレーンクレーンを使用して施工した。これにより全 4 車線の本町通を，2 車線の規制に留めて設置することができた。床版の設置状況を写真 - 8 に示す。1 日目に 6 枚，2 日目に 9 枚を設置し，2 日間の夜間規制のみで全 15 枚の設置を完了した。

ここで，標準長さ 2 m 程度の一般的なプレキャスト PC 床版を採用した場合を考える。標準パネル重量が約 79 kN/枚として，10 t トラック 1 台に 1 枚のプレキャストパネルを積載して搬入する場合，合計で 19 台の 10 t トラックが必要となる。また，床版の架設には 120 t ラフテレーンクレーンが必要となり，本町通の夜間全面通行止めが求められる。

(4) 間詰め部の充填

床版同士の間詰め部には，スタッド孔や主桁と床版の接合部分に充填が可能な流動性を確保するため，エトリンガイト生成系 UFC の鋼繊維量を低減した，鋼繊維入り高強度モルタル<sup>®</sup>（以下，間詰め UFC）を用いた。この間詰め UFC を用いて床版の外周および主桁上となる，鋼横リブ上の床版 - 床版間，鋼主桁 - 床版間および側縦桁 - 床版間の間隙を充填した。これらの間隙はすべて連通しているため，橋軸方向に充填区間を定めて一日で施工可能な範囲を一度に充填することとした。鋼主桁 - 床版間の間隙にはスタッド孔から間詰め UFC を充填した。側縦桁上のスタッドの間隔は約 0.8 m 離れており，施工性，充填性および作業時間を施工前に確認する必要があると考えた。そこで実物大の模型を用いた試験を事前に行い，充填性を確認するとともに，充填の手順および作業時間を確認して実施工に反映した。

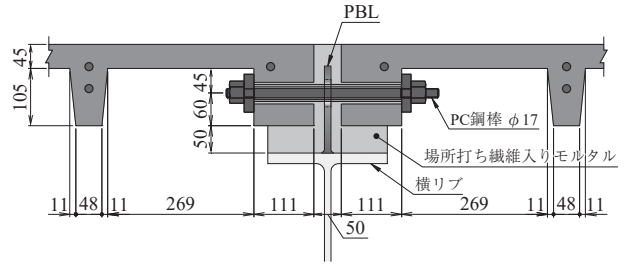


図 - 7 床版同士の接合部縦断面図

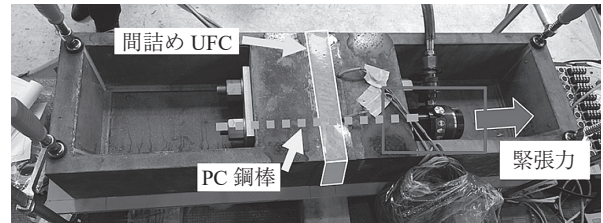


写真 - 9 緊張試験状況



写真 - 10 接合部緊張状況

5.2 床版同士の接合概要

(1) 床版同士の接合構造

床版同士の接合部構造を図 - 7 に示す。床版の支持構造は，橋軸方向に主桁および側縦桁，直角方向には横リブで支持され，床版同士は横リブ上で接合される構造である。そのため，輪荷重が橋軸方向に移動することによって，横リブ上の床版接合部には橋軸方向の負曲げが発生する。この負曲げに対して床版上面に引張を生じさせないように，床版同士の端部リブ間に，間詰め部の施工後にポストテンション方式でプレストレスを導入する。

(2) 接合構造の事前確認

床版 - 床版間に配置した PC 鋼棒を，ワッフル型のくぼみ部の内部で操作可能な大きさの専用ジャッキで緊張し，接合部にプレストレスを導入する。通常の PC 鋼棒の緊張管理では，セットロスの影響が小さいため考慮しないが，本接合部の短い PC 鋼棒では，わずかなセットロスや定着プレートなじみの影響を考慮する必要があると考え，接合部を模擬した試験体で緊張試験を行った。試験では実際の施工で用いる専用ジャッキを用いて実際の作業と同様に

手工具でナットを締め付け、その際のセットロスや定着プレートなじみを再現した。また、隣接する鋼棒の緊張の影響も計測した。試験緊張の状況を写真 - 9 に示す。計測の結果、最大緊張力から 11% のセットロスなどを見込むこととし、実施工での必要緊張力を決定した。

### (3) 接合部の緊張順序

本橋の床版同士の接合部は全 15 枚のパネル間に 14 ラインあり、そのライン内に PC 鋼棒が直角方向すべての 17 個のワッフル型のくぼみ部の内部に 2 本ずつ 34 本配置され、全体では 476 本となる。

緊張作業は、部分的に行くと緊張力の偏りが発生するため、不均等な弾性変形によって床版接合部に肌隙が発生することが考えられた。その対応として、床版間 14 ラインの接合部と、1 ライン内の 34 本（直角方向に配置）をできるだけ満遍なく行う必要がある。そのため、1 ラインを 1 工程で行わず、ライン内（34 本）で 3 分割し、緊張作業を 3 ステップに分けた。全 14 ラインそれぞれで、まず約 3 分の 1 にあたる 1 ステップを順に完了させ、再度最初のラインに戻って 2 ステップ、3 ステップと繰り返した。緊張装置は 2 セット用意し、手動の油圧ポンプにデジタル油圧計を用いて正確に管理した。緊張作業は 1 台の油圧ポンプからホースで分岐し、2 本を同時にテンショナーを用いて行った。それらで断面中心を挟んで対称な配置の PC 鋼棒を緊張し、1 ライン内でも偏りが起こらないような作業手順とした。全本数を緊張後、張力確認のため同じ作業を行い、確実な張力導入を行った。緊張作業の状況を写真 - 10 に示す。

## 6. おわりに

筆者らは耐久性に優れ、しかも鋼床版と同程度まで軽量化が可能なワッフル型 UFC 床版を開発し、今後の新規路線などへの適用を見据えて、阪神高速道路信濃橋入路橋に日本で初めて適用した。桁下から見上げた完成状況を写真 - 11 に、橋面からの完成状況を写真 - 12 に示す。

本橋のワッフル型 UFC 床版の製作では新たに専用製作架台を設け、ワッフル状の床版の効率的製作、高精度プレストレス導入などを実現した。

ワッフル型 UFC 床版の架設にあたっては、軽さを活かした運搬・設置の省力化を実現した。また、新たに適用した間詰め UFC を使用して、床版同士の接合部に使用する PC 鋼棒の緊張方法を確立した。

ワッフル型 UFC 床版の開発・適用にあたっては、「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准教授にご指導をいただいたことに、深く感謝の意を表す。



写真 - 11 完成状況（下面から）



写真 - 12 完成状況（橋面から）

### 参考文献

- 1) 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 113 号、2004.9
- 2) 土木学会：UFC 道路橋床版に関する技術評価報告書、技術推進ライブラリー No.17、2015.
- 3) 藤代 勝、齋藤公生、鈴木英之、佐藤彰紀：阪神高速道路玉出入路橋の床版取替工事、プレストレストコンクリート、Vol.61、No.1、pp.28-33、2019.
- 4) 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
- 5) 齋藤公生、藤代 勝、谷口祥基、福岡純一：新設橋に適用するワッフル型 UFC 床版の設計、プレストレストコンクリート、Vol.61、No.5、pp.11-16、2019.
- 6) 小嶋進太郎、小坂 崇、長澤光弥、一宮利通：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、プレストレストコンクリート工学会、第 28 回シンポジウム論文集、pp.351-356、2019.11

【2020 年 4 月 15 日受付】