

超軽量で高い疲労耐久性を有するワッフル型UFC床版の設計

阪神高速道路(株)		○福岡 純一
阪神高速道路(株)		谷口 祥基
鹿島建設(株)	正会員 工修	齋藤 公生
鹿島建設(株)	正会員 工博	藤代 勝

キーワード：ワッフル型UFC床版，超軽量，2方向リブ，プレキャスト床版

1. はじめに

超軽量で高い疲労耐久性を有するワッフル型UFC床版を、日本で初めて新設の鋼合成鈹桁橋に適用するにあたっての設計について報告する。ワッフル型UFC床版は、UFCの優れた材料特性を活かして2方向に通常よりも高いプレストレスを導入したプレキャスト床版である。スラブと2方向のリブを有した構造で、PC鋼材を配置したリブ断面以外は、床版の軽量化のために下面を四角錐台に窪ませた形状である。本文ではとくに、床版の構造成立性確認のために実施した3次元FEM解析や床版同士の接合方法、および鋼桁と合成するずれ止め構造について報告する。

2. ワッフル型UFC床版の概要

日本で初めてワッフル型UFC床版（以下、UFC床版）を適用するのは、都市高速道路の入路となる新設の鋼単純合成鈹桁橋で、橋長37m、幅員5.75mである（図-1）。今回使用するプレキャスト製のUFC床版は標準パネル13枚と端部パネル2枚で、橋軸方向に配置された主桁と側縦桁、直角方向に配置された横リブまたは横桁からなる床組構造に支持される。また、床版同士の接合にはPC鋼棒を用いる。当初は場所打ちコンクリート床版を3主桁で支持する構造であったが、UFC床版の適用により、床版自重を50%低減できることから2主桁へ変更した。また、鋼桁を含む上部構造重量としても40%低減が可能となったことで、地震時の下部構造への影響を小さくすることができる。

UFC床版は、重量軽減のため床版下面に四角錐台のくぼみを設け、2方向のリブを形成することで鋼床版と同程度にまで軽量化が可能な構造である（図-2）。橋軸方向と直角方向のリブ内にPC鋼材が配置され、プレテンション方式で2方向のプレストレスが導入される。

作用荷重は、スラブを介して床版を構成する橋軸方向と直角方向の2方向リブを通じて床組構造へ伝達される。そのため、同じ作用荷重に対しても床組を構成する主桁間隔や、横桁間隔が変化するとともに、2方向リブの荷重分散効果により床版に発生する応力が変化する。

床版はリブを有する2方向に支持される構造のため、設計にあたっては道路橋示方書の設計曲げモーメント式に依らず、鋼桁を含めた構造を3次元でモデル化したFEM解析により応答を明らかにした。

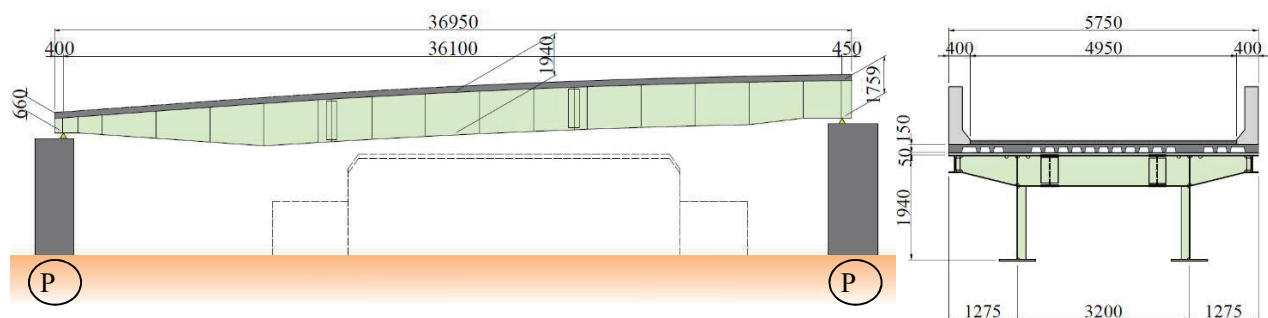


図-1 側面図および断面図

また、輪荷重走行試験により接合部構造を含め100年を上回る耐疲労性を確認している¹⁾。

3. 3次元FEM解析によるUFC床版の設計

3.1 解析条件

本橋で用いるUFC床版には、平板型UFC床版²⁾と同様に、圧縮強度の特性値が180N/mm²のエントリングait生成系UFCを用いる。圧縮応力度ならびに引張応力度の制限値は、使用するUFC材料の設計・施工マニュアルを参考に、それぞれ $\sigma_{ca}=108\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_{ta}=-8.0\text{N/mm}^2$ (常時)、 $\sigma_{ta}=-12.0\text{N/mm}^2$ (衝突荷重時)とした。床版同士の接合部は、活荷重による変動応力で目開きを発生させないように、引張応力度の制限値を0.0N/mm²として常時圧縮状態となる様にした。かぶりや鋼材のあきなどの構造細目についてもマニュアルを参考に設定した。

荷重として自重、橋面荷重 (舗装、壁高欄、遮音壁)、風荷重、活荷重、衝突荷重およびプレストレス力 (橋軸方向、直角方向) を考慮した。T荷重 (100kN/箇所) 1組は、主桁間ならびに張出し部それぞれで、床版中央や主桁上、および床版接合部など曲げとせん断が厳しくなる状態を想定してモデルに載荷した。活荷重には衝撃係数 ($i=0.37$) および解析係数 ($\alpha=0.1$) を考慮した。

本橋の施工手順は、新設の鋼桁を架設後、UFC床版を設置し、主桁と床版および床版同士の遊間に繊維入りモルタルを充填して合成構造化する。その後に床版同士をPC鋼棒で接合し、橋面工を施工する。解析では、それぞれの荷重載荷時の支持条件について、施工手順を考慮して設定した。

本橋の施工手順は、新設の鋼桁を架設後、UFC床版を設置し、主桁と床版および床版同士の遊間に繊維入りモルタルを充填して合成構造化する。その後に床版同士をPC鋼棒で接合し、橋面工を施工する。解析では、それぞれの荷重載荷時の支持条件について、施工手順を考慮して設定した。

3.2 床版の形状

標準パネルの平面寸法は、幅5.75m、橋軸方向長さ2.45mで、床版高は活荷重たわみが鋼床版と同程度となるように、スラブ厚45mmリブ高さ105mmの合計150mmに設定した (図-3)。伸縮装置が設置される端部パネルは、伸縮装置用の切欠きを設けるため、リブ高さを120mmとし、床版高さを165mmとした。

直角方向のPC鋼材配置は、上段PC鋼材の位置を最小芯かぶり ($2.0\phi=30.4\text{mm}$) に舗装取替え時の過切削代としての10mmを加えて決定し、下段PC鋼材の位置は床版下縁に生じる直角方向応力を制限値以内に収めるように配置した (図-3(a))。橋軸方向のPC鋼材配置は、プレストレス導入によるそりを最小化するため、床版の断面図心と鋼材図心を極力近づけるよう、上段の橋軸直角方向鋼材下に添わせた。また、鋼材のあきを満足する最小間隔 (2.0ϕ) だけ離して2本のPC鋼材を並列に配置した (図-3(b))。橋軸方向のリブ間隔は、T荷重 (幅: 500mm) が常に2本以上のリブに直接伝達されるよう、250mmとした。一方、直角方向のリブ間隔は、床版支持間隔が橋軸方向よりも直角方向の方が大きく、主たる荷重分担が橋軸方向リブになることから、スタッド孔の配置間隔などを考慮し、橋軸方向よりも若干広い270mmを基本とした。

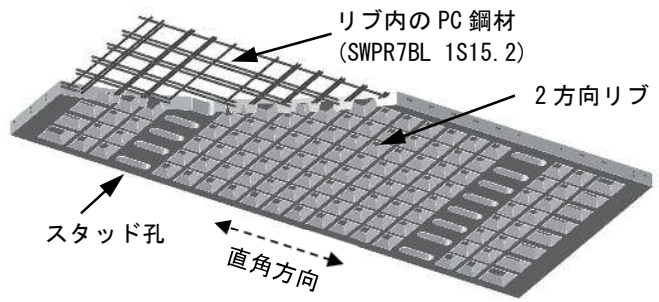
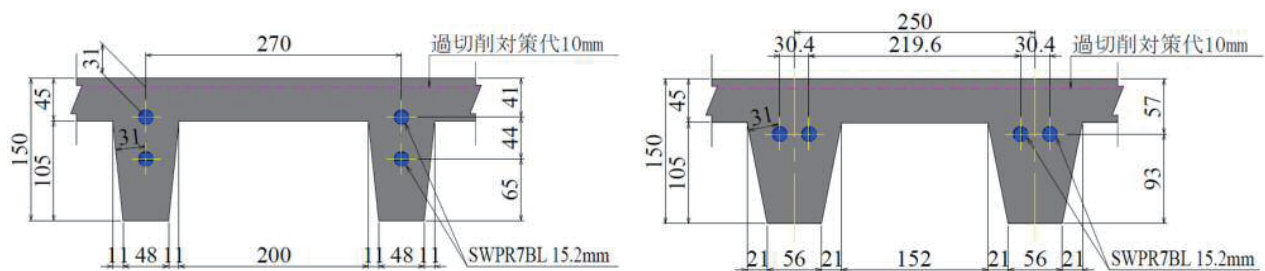


図-2 ワッフル型 UFC 床版 (下面から)



(a) 直角方向断面

(b) 橋軸方向断面

図-3 標準パネルの断面形状

橋軸方向リブの下端幅は、T荷重載荷時にリブ下端の橋軸方向応力度が、制限値 (-8.0N/mm^2) を満足するよう56mmとし、リブ上端幅は並列する2本のPC鋼材の芯かぶりを確保できる98mmにした。橋軸直角方向のリブ形状は、輪荷重走行試験で確認したリブ上端幅70mmを最小寸法として採用し、リブ下端幅は鋼材の芯かぶり 2.0ϕ を満足する48mmとした。

3.3 解析モデル

UFC床版の設計は、2方向のリブの荷重分散効果やリブに発生する局部応力を確認するため、標準部では5パネル分をリブ形状やスタッド孔を含め、詳細にモデル化して解析を実施した(図-4)。UFC床版や床版同士の接合部、および主桁接合部をソリッド要素で、鋼桁をシェル要素でモデル化した。プレテンションPC鋼材は線部材として床版内部に配置した。実際の施工手順を考慮し各荷重が載荷されるタイミングの境界条件を再現した。

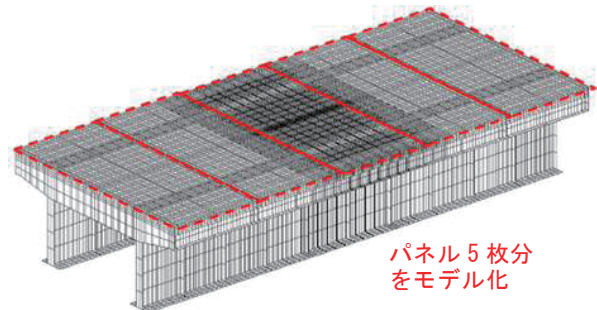


図-4 解析モデル(標準パネル)

3.4 解析結果

床版にはプレストレスの導入によって、橋軸方向リブの下端で約 20N/mm^2 、直角方向リブの下端で約 30N/mm^2 の高いプレストレスが導入される。一方、変動荷重も大きく、活荷重と風荷重や衝突荷重の組合せによって、床版中央の直角方向リブ下端には活荷重作用時に制限値に近い引張応力度が確認された。リブ形状やPC鋼材配置のトライアルを行いながら、プレストレスによるたわみや活荷重などの組合せ応力度を算出し、床版同士の接合部を含め、制限値内での挙動となることを確認した。

4. 床版の接合構造

4.1 床版同士の接合構造

床版同士の接合構造を図-5に示す。接合部では、床版同士を連結すると同時にUFC床版を鋼横リブ上のPBLを介して鋼横リブにも結合する。床版同士の遊間部には繊維入りモルタルを充填し、リブ間に2本のPC鋼棒を用いて直角方向の端部リブを挟んだ接合部にプレストレスを導入する。これによって活荷重により横リブ上の接合部に橋軸方向の負曲げによって発生する上縁引張を抑制する構造としている。

遊間部に充填される繊維入りモルタルとPC鋼棒は付着させない構造のため、万一の場合にも、PC鋼棒のみを撤去でき、隣接する床版に影響を与えずに、UFC床版を取り替えることを可能とする。また、やむを得ずPC鋼棒を交換する場合には、PC鋼棒のみの撤去と再挿入が可能となる空間を確保するため、直角方向の端部リブと隣り合う標準リブとの下端間隔を標準部(247mm)よりも広い280mmに設定した。

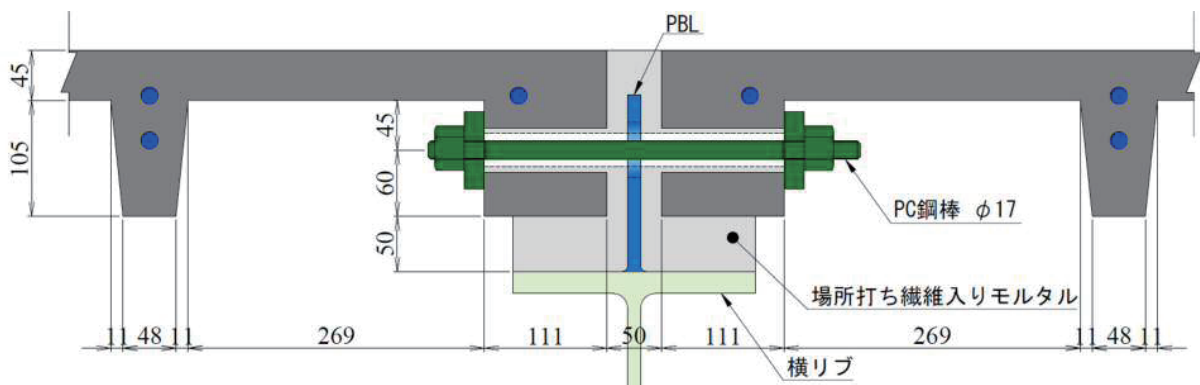


図-5 床版同士の接合構造

床版同士を接合する緊張材には、鋼材の材質やリラクセーションなどの機械的性質が明らかで、本

構造の長さにも対応可能なPC鋼棒B種1号を使用する。床版同士の接合部に作用する変動荷重に対してプレキャストセグメント部材と同様に常時圧縮状態となる導入力を確保するため、PC鋼棒の径はφ17mmとした。

4.2 床版と鋼桁の接合構造

UFC床版は、橋軸方向には横桁または横リブで支持され、直角方向は側縦桁または主桁で支持される。床版下面と鋼主桁フランジ上面の遊間は、鋼主桁接合部の添接板とM22高力ボルトの突出高さが33mmに対し、さらに横断線形への対応として標準パネルで50mm、端部パネルで35mmを確保した。UFC床版は2方向版としての挙動を示し、横リブは鋼床版で一般的に採用される2.5m間隔で配置した。張出し部には側縦桁を設置し、活荷重や風荷重による張出し床版先端のたわみを抑制した。

合成桁における床版と鋼桁間のずれ止めは、作用する水平せん断力に対して設計する。本橋では平板型UFC床版の実績²⁾を用いてφ22mmの頭付きスタッドを用いたずれ止め配置を検討したが、P5側の桁端部において主桁高さが路下条件の制約から桁高が低く、断面図心からずれ止めまでの偏心量が小さいことでずれ止めに作用する水平せん断力が大きくなった。このため、P5側の端部の2パネルの区間では主桁上に配置しきれない本数となった。

そこで、φ25mmの頭付きスタッドと鋼繊維入り高強度モルタルを組み合わせたずれ止め構造を採用した。別途行った要素実験で、従来のφ22mmと有機繊維入り無収縮モルタルの組合せの約1.5倍のせん断耐力を確認した。P5側のずれ止め配置は、桁端側から2パネルの範囲にφ25mmの頭付きスタッドを1列6本の配置とし、残りの区間はφ22mmの頭付きスタッドを使用し、作用せん断力に対してスタッド孔に必要な本数を配置する設計とした(図-6)。

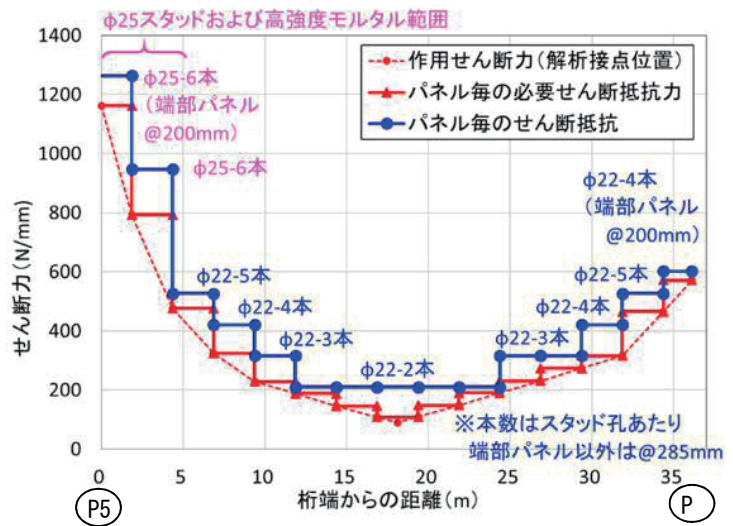


図-6 ずれ止めの配置

5. おわりに

日本で初めて新設橋にワッフル型UFC床版を適用するための設計を行った。UFCの優れた材料特性を設計に有効活用し、3次元FEM解析を行って、2方向リブを有するワッフル型UFC床版の成立性を確認した。床版厚さは活荷重によるたわみが鋼床版と同等となる150mmとし、スラブ厚さは舗装打替え時の切削代を10mm考慮したため45mmとした。床版同士の接合にはPC鋼棒を採用し、床版と主桁の合成には、桁端部でφ25mmの頭付きスタッドと鋼繊維入り高強度モルタルを用いる。今回の構造にワッフル型UFC床版を適用する場合には、一般的なコンクリート床版と比較して床版重量を約50%、上部構造重量全体を約40%低減することができた。

<参考文献>

- 1) 一宮ら：鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高いUFC道路橋床版の輪荷重走行試験，第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，プレストレストコンクリート工学会，2013. 10.
- 2) 佐藤ら：既設道路橋の床版取替えにおける平板型UFC床版の適用，第25回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，プレストレストコンクリート工学会，2018. 11.