

(5) 連続合成桁に用いる超高強度繊維補強 コンクリート道路橋床版の開発

小坂 崇¹・金治 英貞²・一宮 利通³・齋藤 公生⁴

¹正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)
E-mail:takashi-kosaka@hanshin-exp.co.jp

²正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)
E-mail:hidesada-kanaji@hanshin-exp.co.jp

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:ichinomt@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)
E-mail:saito-k@kajima.com

都市高速道路では施工性の観点から軽量の鋼床版の使用頻度が高い。しかし、近年、鋼床版のデッキプレートとリブの溶接部において、輪荷重走行時の変形による疲労き裂が顕在化しており点検や補修など維持管理にかかるコストが増加する傾向にある。そこで、著者らは鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高いコンクリート系床版を実用化するために、超高強度繊維補強コンクリート (UFC) を用いた道路橋床版を開発した。開発にあたっては、その床版を用いた連続合成桁について試設計をおこない、鋼床版と同等の質量の床版の形状を算定した。また、輪荷重の繰返し載荷に対する耐久性を確認するため、輪荷重走行試験を行った。設計輪荷重の2倍程度でリブ側面に微細なひび割れは生じたものの、剛性低下は見られず、床版の構造性能は健全であることを確認した。

Key Words : Ultra high strength fiber reinforced concrete, UFC, bridge deck, composite girder, steel plate deck

1. はじめに

著者らは、超高強度繊維補強コンクリート (以下 UFC という) を用い、自重が鋼床版と同程度となる軽量かつ耐久性の高い道路橋床版を開発している。都市高速道路では、設計施工における制約上、重量で優位性のある鋼床版の使用頻度が他道路と比べ相対的に高いが、近年、既設橋においてさまざまな要因により疲労き裂が顕在化している。新設橋梁においては、開断面リブやデッキプレートの増厚などの対応により、そのリスク低減が図られているが、舗装の損傷など付随した懸念点も残されている。そこで、鋼床版を代替する軽量かつ耐久性の高いコンクリート系の道路橋床版を開発するために、床版の材料に UFC を適用した。

2. UFC を用いた道路橋床版の開発

UFC は圧縮強度の特性値が 150N/mm^2 以上、ひび割れ発生強度の特性値が 4N/mm^2 以上、引張強度の

特性値が 5N/mm^2 以上の繊維補強を行ったセメント質複合材である¹⁾。プレキャスト部材として製作し、熱養生 (蒸気養生) することによって、部材製作後における収縮やクリープの影響が低減され、組織の緻密化によって耐久性が向上する。引張鋼材としては PC 鋼材を使用し、UFC の高い圧縮強度を生かして、大きなプレストレスを導入することができ、特殊部以外には鉄筋を配置しない。近年、このような UFC の特徴を生かした構造として、空港着陸帯における床版や歩道橋での施工実績がある^{2),3)}。

UFC を用いた道路橋床版 (以下 UFC 床版という) の適用イメージを図-1 に示す。鋼床版のデッキプレートおよび縦リブを同等質量の UFC 床版とし、鋼床版の支間規模から鋼箱桁を想定し、鋼主桁、鋼縦桁および鋼横桁または鋼横リブの4辺で支持される床版構造とした。また、UFC 床版と鋼桁はスタッドなどで接合するものとし、後死荷重や活荷重に対して、UFC 床版と鋼桁が合成桁として挙動するものとした。

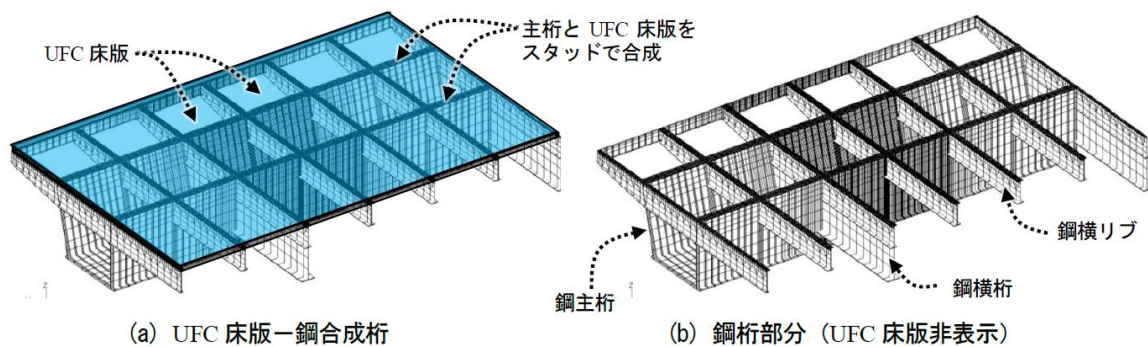


図-1 適用構造の概要図

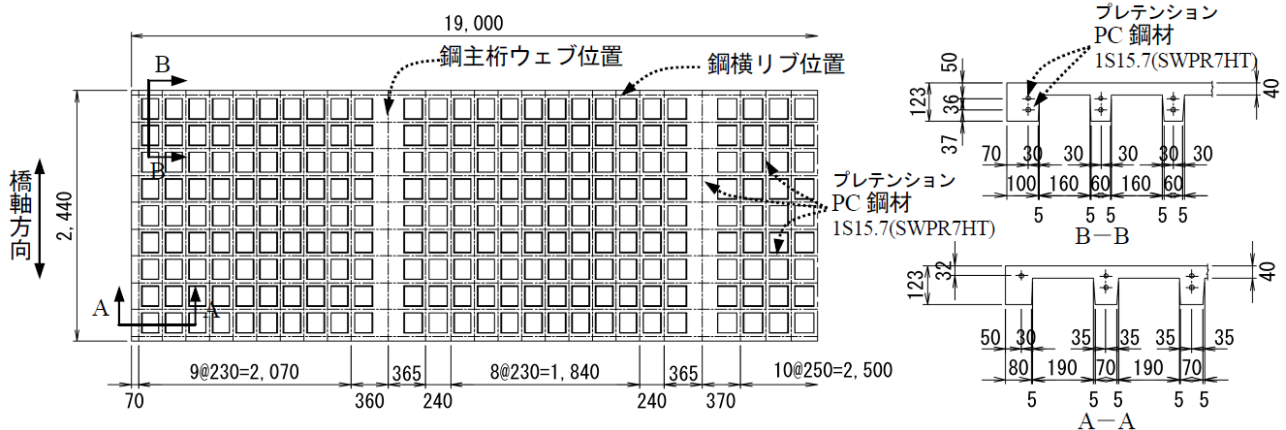


図-2 試設計によって算定した UFC 床版（単位：mm）

表-1 検討に用いた UFC の材料特性

弾性係数 N/mm ²	ひび割れ発生強度 f_{cr} N/mm ²	引張強度 f_t N/mm ²	圧縮強度 f_{ck} N/mm ²
4.6×10^4	8.0	8.8	180.0

合成桁の床版への適用を想定し、UFC床版の開発として、床版形状を算定するための試設計、各種基本性能の確認（床版部材の座屈に対する安全性、床版部材と鋼桁の接合部の安全性、床版部材の疲労）、床版の製作方法に関する検討（UFCの打設に対する繊維の配向性など）を行った。また、UFC床版は部材厚が従来のコンクリート系床版に比べ薄いことから疲労耐久性に関する性能検証として輪荷重走行試験を実施した。これらの床版開発の中から、本文では、床版の形状算定とプレテンションPC鋼材量および鋼床版と同等の軽量の床版の成立性を検討するために、FEM解析を用いた試設計と、疲労耐久性の性能検証のために実施した輪荷重走行試験について報告する。

3. UFC床版の試設計

(1) 床版形状の設定コンセプト

UFC床版は、活荷重（輪荷重）を直接支持するスラブと、プレテンションPC鋼材を配置するリブから

構成することとし、床版質量を鋼床版と同等とすることを目標に、それぞれ最小の部材厚として設定した。リブ厚についてはPC鋼材のかぶり、リブ間隔については輪荷重に配慮して設定した。

プレキャスト床版としての製作は、図-1に示す鋼横リブ間隔（橋軸方向に約2.5m程度）×幅員（橋軸直角方向）の形状を想定している。床版は鋼横リブで線状に支持されているため、床版の主たる支間方向は橋軸方向となる。開発当初、既往の空港着陸帯における床版2)を参考に、床版の支間方向である橋軸方向のリブを密に配置することを考えていたが、試設計の結果、鋼主桁支点上における応力などに対して橋軸直角方向にも橋軸方向と同程度のPC鋼材が必要となったため、図-2に示す様な2方向に同程度のリブを配置する、ワッフル状の床版形状となった。

(2) 試設計の対象構造

試設計は、実橋である鋼5径間連続鋼床版箱桁（平均支間長70m）を対象モデルとして、鋼床版のデッキプレートおよび鋼縦リブ部分をUFC床版に置き換えて試設計した。試設計の結果、算定されたUFC床版は、図-2に示すようにスラブ厚40mm、リブ高123mmであり2方向にリブを配置したワッフル状の床版である。

本検討に用いたUFCの材料特性を表-1に示す。UFC床版に生じる応力度は指針¹⁾に準拠し、引張はひび割れ発生強度 $f_{cr}=8.0\text{N/mm}^2$ 、圧縮は $0.6 f_{ck}=$

108N/mm²を制限値とした。PC鋼材は、高強度な1S15.7（SWPR7HT）を床版1枚あたり橋軸方向に152本（2本／リブ）、橋軸直角方向に18本（2本／リブ、支点部は1本／リブ）配置した。

(3) 床版の試設計

a) 設計・解析条件

床版の設計については、活荷重による発生応力度に対して構造の成立性を確認することを目的に3次元FEM解析によって行った。解析にあたっては、UFC床版を支持する鋼横リブの配置間隔を2.5mとし、橋軸方向に15.0m（6パネル）の範囲をモデル化した。床版と鋼桁は実構造ではスタッドで接合することで合成桁として挙動するものとし、解析上は一体として挙動する境界条件とした。解析モデルにおいて各部材は、鋼桁はシェル要素、UFC床版はソリッド要素、PC鋼材はバー要素を用いてモデル化した。プレテンション緊張力は、バー要素に温度荷重を与えて所定の緊張力が生じるようにした。また床版端部から600mm区間の緊張力のロスについては、バー要素に与える温度荷重を変化させて表現した。プレテンションPC鋼材の解析モデルを図-3に示す。

載荷荷重は、活荷重（面分布荷重）、床版自重（物体力）、橋面荷重（面分布荷重）とした。拘束条件としては箱桁ウェブ下端を線支持とした。支持条件および境界条件を図-4に示す。床版と鋼桁は実構造ではスタッドで接合することで合成桁として挙動するものとし、解析上は一体として挙動する境界条件とした。

活荷重については、T荷重を床版に対して曲げもしくはせん断が厳しくなると想定される箇所に載荷するものとし、張出床版先端付近や箱桁間など6パ

ターンに載荷した。輪荷重の載荷面積は500×200mmとし、衝撃係数（ $i=0.4$ ）および安全係数（ $\gamma_a=0.1$ ）を考慮した。

b) 設計結果

発生応力度が最も大きくなった載荷パターンである「張出し床版先端付近での曲げ」と「箱桁一箱桁間での曲げ」に着目した載荷パターンの解析結果（死荷重+プレストレス+活荷重）として、最大主応力分布と最小主応力分布を、図-5、図-6に示す。床版上面で6.6N/mm²の引張応力度、床版下面側で-80.2N/mm²の圧縮応力度が生じている。上縁と下縁の応力度の差は大きいものの、全ての載荷パターンについて制限値内であり、図-2に示す薄肉部材による軽量のUFC床版の設計を成立させることができた。図-7に変形図を示す。鋼横リブに対する相対変位量は最大4.9mmであった。

(4) 質量比較

試設計の結果算定された図-2に示すUFC床版と、鋼床版およびPC床版に対する、19m×2.5mの床版の質量比較を

表-2に示す。鋼床版については、縦リブにUリブを有する構造を想定し、表の括弧内の数値はデッキプレートの板厚を示す。算定したUFC床版の質量は、デッキプレートの板厚が16mmの鋼床版と同等となった。

表-2 UFC床版と他形式床版の質量比較

UFC床版	鋼床版	PC床版
8.472 t	8.272 t	34.963 t
(1.00)	(0.98)	(4.13)

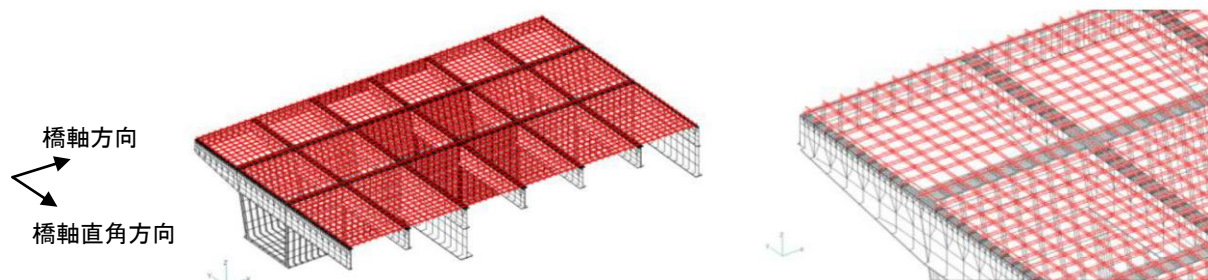


図-3 プレテンションPC鋼材の解析モデル

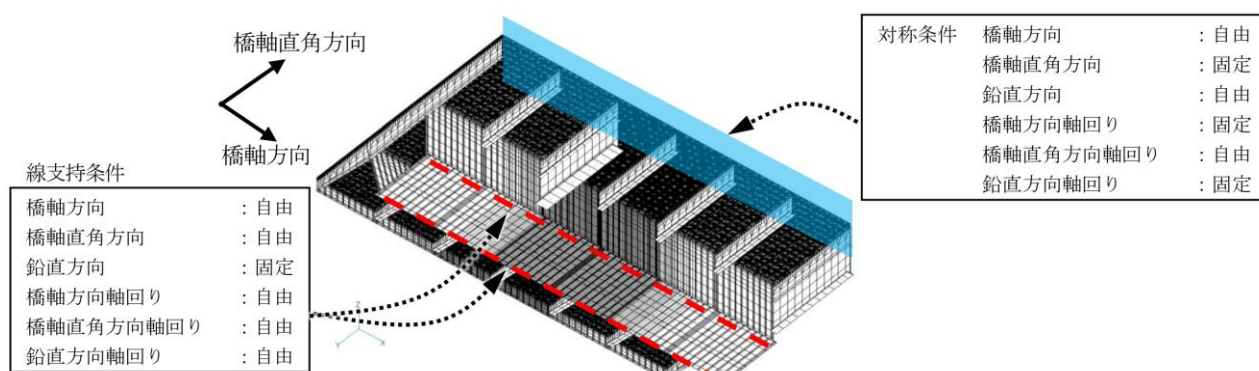


図-4 解析モデルの支持条件および境界条件

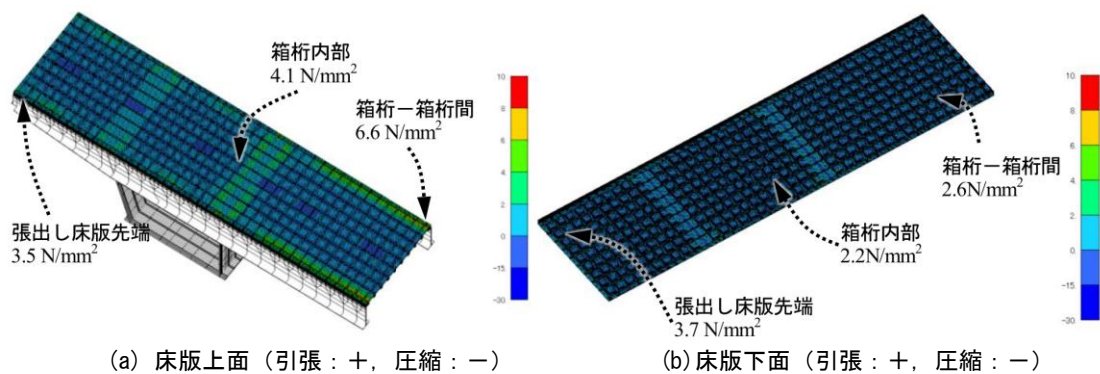


図-5 最大主応力分布

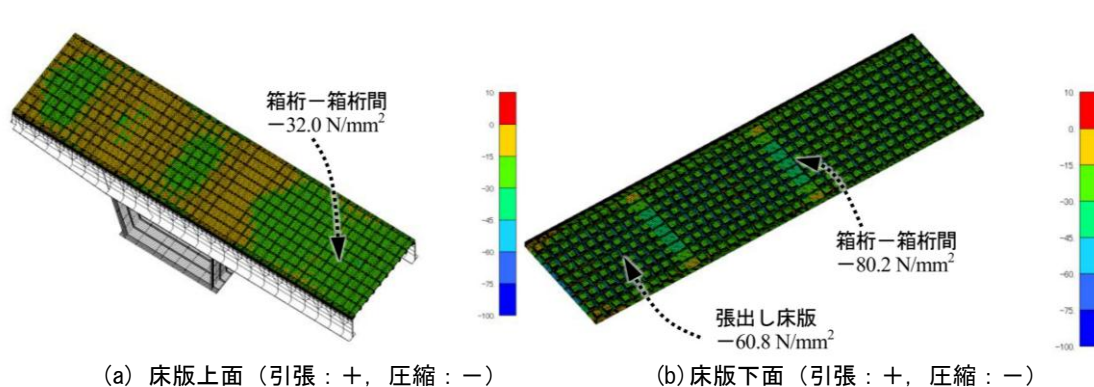


図-6 最小主応力分布

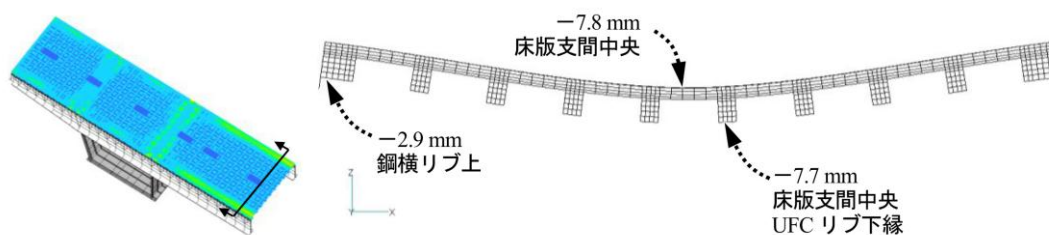


図-7 変形図（箱桁一箱桁間）

(5) 連続合成桁としての試設計

a) 設計・解析条件

鋼桁とUFC床版を合成をした状態での全体挙動としての桁作用の影響を確認するために、3次元FEM解析を行った。図-8に解析モデルを示す。支間長40mの連続合成桁を想定し、中間支点から20mの範囲、直角方向には半断面をモデル化し、境界条件と荷重の載荷方法によって、中間支点上での挙動と支

間中央での挙動を確認する解析とした。

活荷重については、中間支点上の負曲げが最大となるように、L荷重の主載荷および従載荷位置を決定した。中間支点上の負曲げによって床版に作用する引張応力度については、外ケーブルによるプレストレスを導入することによって対応するものとして、図-8(b)の赤矢印で示すように、横リブのウェブにプレストレス力を載荷するものとした。

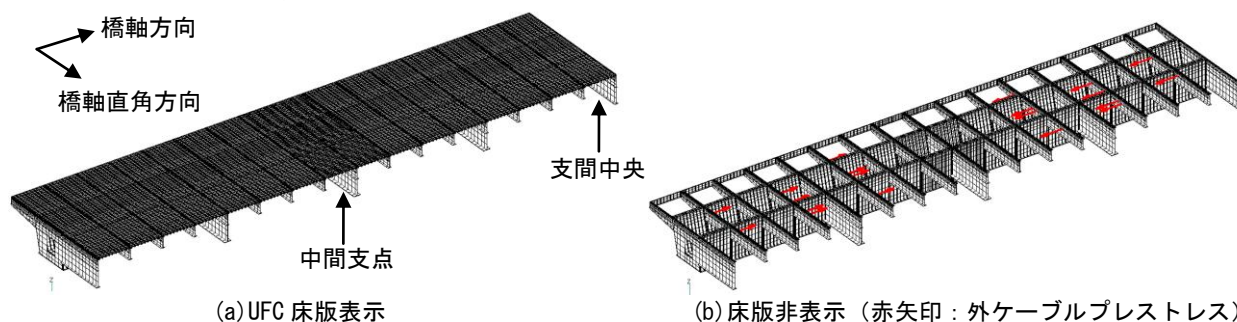


図-8 全体挙動解析モデル

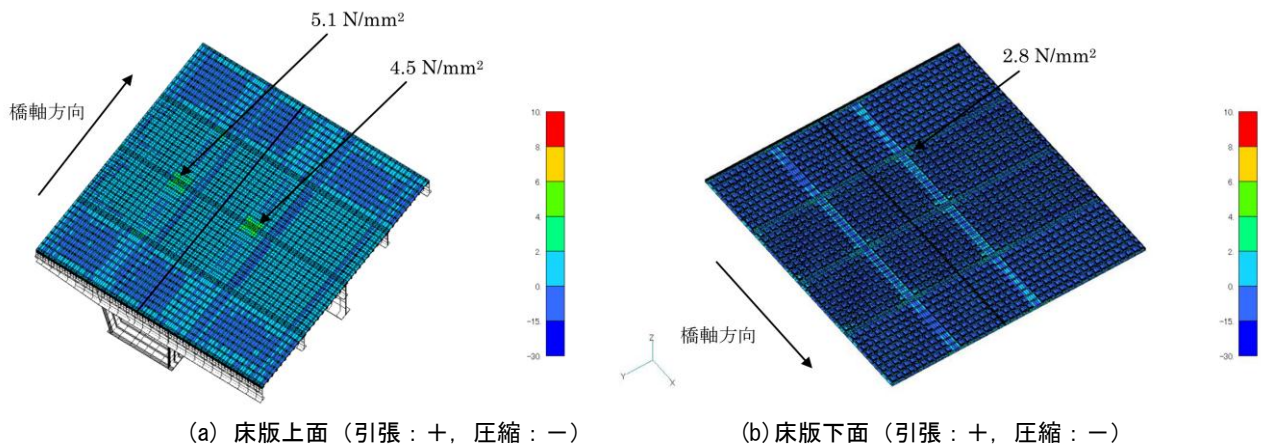


図-9 中間支点付近の最大主応力分布

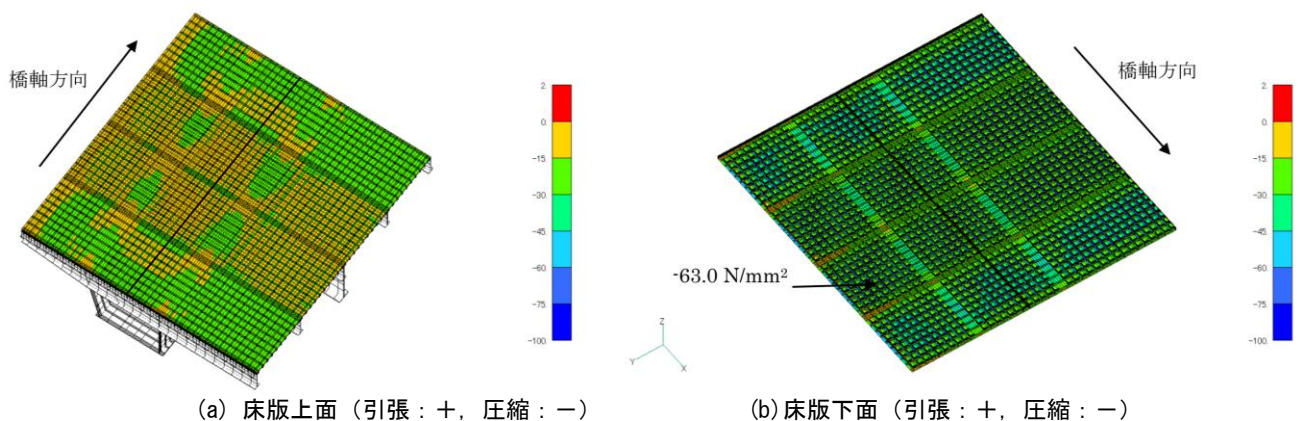


図-10 中間支点付近の最小主応力分布

b) 設計結果

発生応力度が最も大きくなった载荷パターンである主载荷荷重位置を高欄寄りとした载荷パターンの解析結果（死荷重＋プレストレス＋活荷重）について、最大主応力分布と最小主応力分布を図-9、図-10に示す。床版上面で 5.1N/mm^2 の引張応力度、床版下面側で -63.0N/mm^2 の圧縮応力度が生じている。

橋梁の全体挙動解析の結果、中間支点断面に外ケーブル（19S15.2）を 24 本配置しプレストレスを導入することによって、UFC 床版による連続桁構造が成立することを確認した。

合成桁としての UFC 床版と鋼桁の接合部は、スタッドジベルで接合するものとして試設計した。主桁に作用する最大せん断力から桁と床版との間に作用する水平せん断力を算出し、スタッドジベルの本数を算出した結果、 $\phi 16$ のスタッドジベルを 1 ウェブあたり直角方向に 2 本、橋軸方向に 135mm 間隔で配置することが必要と算定された。鋼桁と UFC 床版のスタッドについては、複数本のスタッド用の孔を UFC 床版に設け、鋼桁上に UFC 床版を架設後に、孔に UFC を後施工することによって、鋼桁と UFC 床版を合成することを考えている。

4. 輪荷重走行試験

(1) 試験概要

本床版は前述のように2方向にリブを有する構造となっており、輪荷重载荷によるリブのねじりなど局所的な応力が問題となる可能性がある。また、これまでにない床版構造のため、輪荷重の繰返し走行に対する安全性を検証する必要がある。そこで本研究では、輪荷重の载荷による床版の挙動を確認するための静的载荷試験、ならびに輪荷重の移動繰返し载荷に対する安全性を確認するための輪荷重走行試験を行った。

(2) 試験体概要

試験体を図-11に示す。試験体は、実構造物と同様に橋軸方向に2.5mピッチに配置された横リブに支持される構造とした。橋軸直角方向の長さは、実橋における鋼主桁または鋼縦桁の最小間隔と同程度の2.5mとした。橋軸方向に3枚の床版を並べ、中央の試験体は横リブのみで支持される2辺支持とし、両側の試験体は鋼主桁または鋼縦桁で支持されることを想定して4辺支持とした。なお、2辺支持とした場合の床版としての剛性は、幅が十分に大きい場合と大きく変わらないことを確認している。

本実験に用いたUFCの配合を表-3に示す。本UFCは設計基準強度 180N/mm^2 のエトリンガイト生成系のUFC⁴⁾である。PC鋼材を緊張した状態で丸口バケットを用いて床版の中央にUFCを打ち込み、放射状に流動させながら充填した。一次養生として $20\sim 30^\circ\text{C}$ の湿潤養生を2日行い、圧縮強度が $100\sim 120\text{N/mm}^2$ で緊張力を解放してUFC床版にプレストレスを導入した。その後、 85°C の蒸気養生を24時間行い、試験時の圧縮強度は $182\sim 198\text{N/mm}^2$ であった。

試験には、大阪工業大学所有の輪荷重走行試験装置を用いた(写真-1)。床版の挙動を確認するための静的載荷試験では、実際の大型車のタイヤを模擬したダブルタイヤを用い、走行方向には図-11に矢印で示す位置に、直角方向には二つのタイヤが中央のリブを跨ぐように、 100kN の輪荷重を静的に載荷した。載荷前後において、荷重、床版ひずみおよび床版たわみを計測した。輪荷重の移動繰返し載荷に対する安全性を確認するための試験では、最大 220kN まで載荷できるジャンボタイヤを用いて 100kN から 220kN まで 30kN 刻みで階段状に荷重を増

加させながら各荷重で4万回ずつ繰返し載荷し、合計20万回(10万往復)輪荷重を走行させた。各荷重載荷開始前(0万回)および4万回載荷後(4万回)に、静的載荷試験を行い、床版のたわみおよびひずみを計測した。さらに床版表面に水を張って 130kN で2万回、 160kN で2万回の輪荷重走行試験を行った。高速道路で実測された軸重から100年分の載荷回数を推定して試験における等価回数を求めたところ、水を張らない輪荷重走行試験の 160kN 載荷時点であったため、本疲労試験により床版としての安全性を確認できると考えられる。図-12に載荷プログラムを示す。

表-3 収縮低減型 UFC の配合

空気量 (%)	単位量(kg/m^3)				鋼繊維 (kg)
	水	プレミックス 結合材	骨材	混和剤	
2.0	195	1287	905	32.2	137.4

水の単位量は混和剤の水分を含む

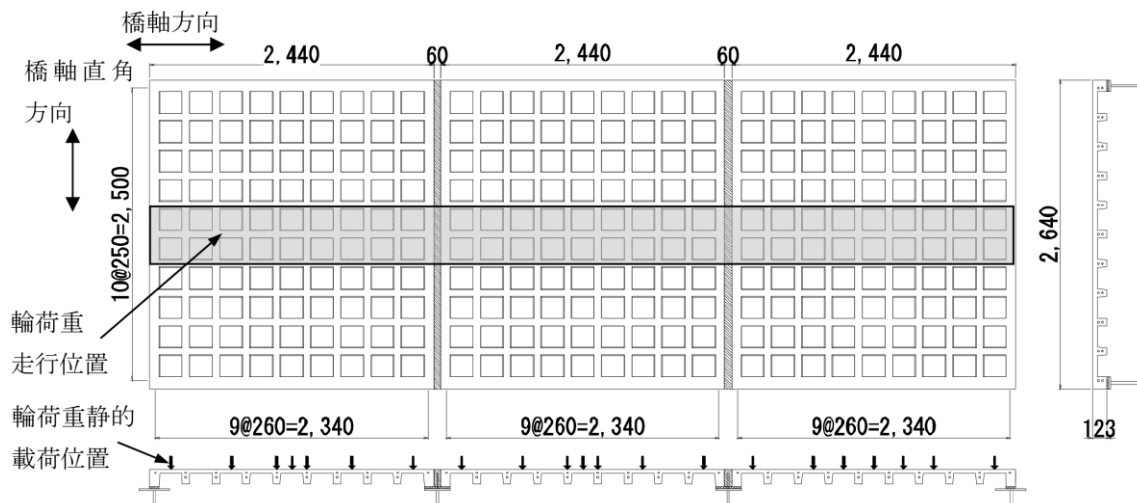


図-11 輪荷重走行試験の試験体

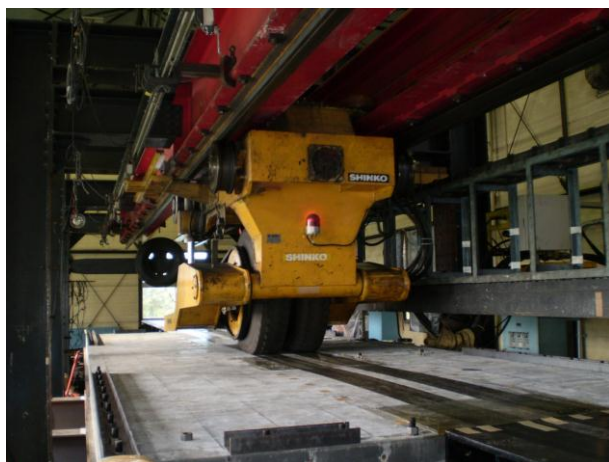


写真-1 輪荷重走行試験状況

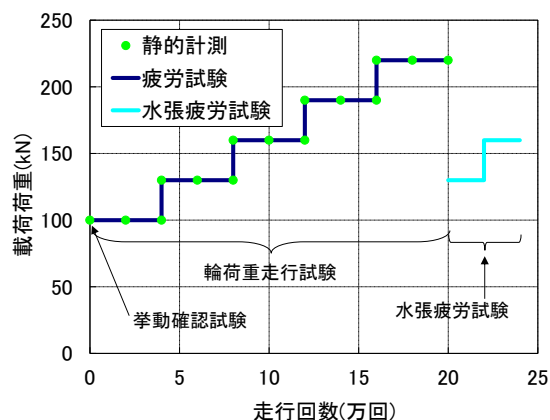


図-12 輪荷重走行試験載荷プログラム

(3) 試験結果

挙動確認試験結果の例として、輪荷重載荷位置の隣のリブ側面鉛直ひずみ、中央リブ直上の走行直角方向ひずみ、輪荷重直下の版部材下面の走行直角方向ひずみを図-13～図-15に示す。それぞれ、リブが横に開くことによる影響、輪荷重がリブを跨いで載荷される影響、薄い版部材の曲げの影響について確認するための計測である。横軸は図-11に矢印で示す載荷位置となっており、図-11に示す位置に影響線載荷した場合のひずみを示している。

図-13より、リブ側面の鉛直ひずみは計測点の直近に載荷された場合にひずみの変動が最も大きくなっており、リブの両側とも圧縮であった。引張ひずみは最大で 13μ （応力度に換算すると 0.6N/mm^2 ）であり、圧縮ひずみは最大で 61μ （応力度に換算すると 2.8N/mm^2 ）であった。載荷点に近い側が圧縮となったのは、輪荷重の載荷によって走行方向リブが横に開こうとするのを直角方向のリブが拘束したことによると考えられる。図-14より、リブを跨いでダブルタイヤが載荷されることによって、床版上面が直角方向に引っ張られる挙動を示すが、輪荷重の載荷によって床版上面直角方向には圧縮ひずみが生じており、引張ひずみが生じることはなかった。図-15より、輪荷重の直下の床版下面直角方向において 80μ 程度のひずみ（応力度に換算すると 3.7N/mm^2 ）が生じていたが、輪荷重が倍になった場合でもひび割れ発生応力度以下であること、プレストレスが導入されていることから、ひび割れ発生の可能性は低いと考えられる。

輪荷重走行試験結果の例として、荷重100kN、

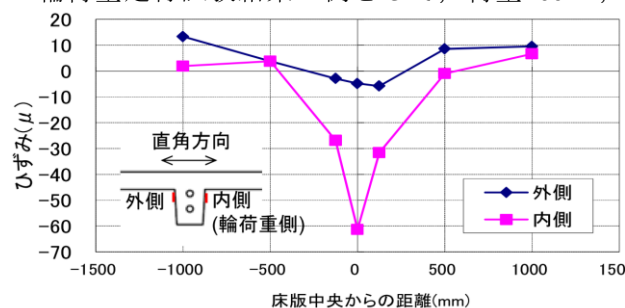


図-13 リブ側面の鉛直ひずみ

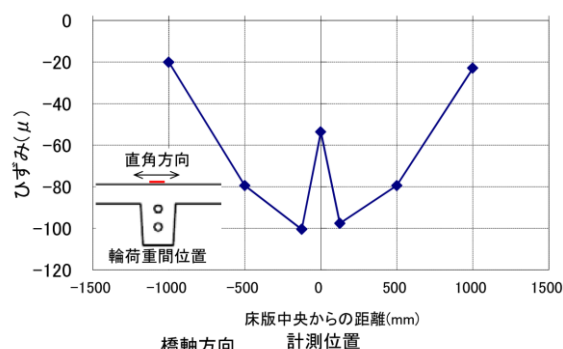


図-14 床版上面の走行直角方向ひずみ

160kNおよび220kNで0万回および4万回における中央床版のたわみ分布およびひずみ分布を図-16および図-17に示す。両者とも、輪荷重を載荷する前後の計測値の差をとったものである。たわみおよびひずみとも、荷重の増加に比例して増加した。また、それぞれの荷重における繰返し載荷前後で差はなく、輪荷重の繰返し載荷による剛性の低下は見られなかった。他の計測位置や他の床版も同様な結果であった。

190kNでの4万回載荷後、リブ付け根の側面水平方向に幅0.04mm未満の微細なひび割れが観察された。また、220kNでの4万回までに同様なひび割れが数十か所で観察された。ひび割れの原因は特定できないが、プレストレス導入時においてPC鋼材のポアソン効果によってUFCにPC鋼材直角方向の引張応力が生じ、引張応力が残留した状態のリブ側面に、輪荷重の繰返し載荷によって図-13に示す応力変動が作用することによって発生したものと推定される。ただし、ひび割れが生じたのは設計輪荷重の約2倍の荷重載荷時であったこと、UFCはひび割れが生じても鋼繊維の補強効果によりひび割れ発生強度以上の引張応力を伝達することができること、たわみ分布やひずみ分布からは剛性の低下は見られなかったことから、床版の構造的な性能に与える影響は小さいと考えられる。

さらに床版表面に水を張って130kNで2万回、160kNで2万回の輪荷重走行試験を行ったが、床版に損傷はなく、健全であった。

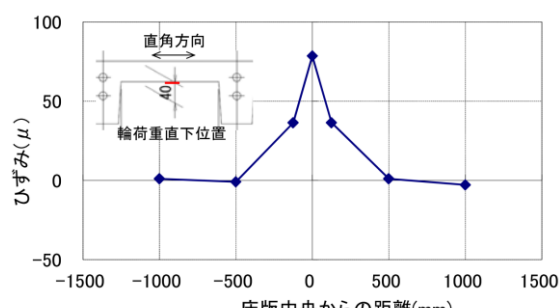


図-15 床版下面走行直角方向ひずみ

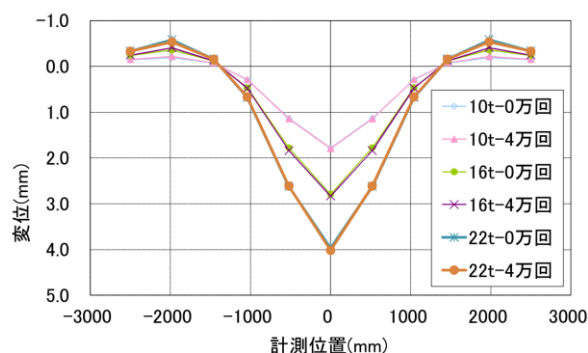


図-16 中央床版の橋軸方向たわみ分布

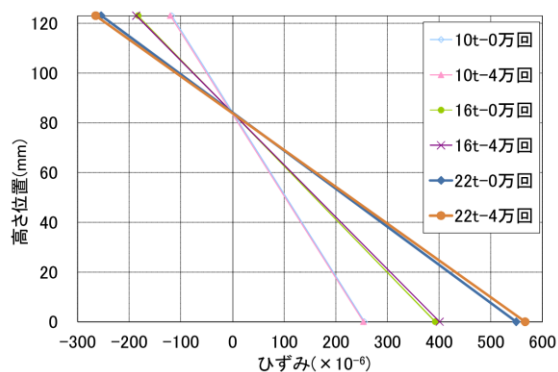


図-17 中央床版の橋軸方向ひずみ分布

5. おわりに

超高強度繊維補強コンクリート UFC を用いた軽量かつ耐久性の高い床版を開発するために試設計および輪荷重載荷による性能検証試験を実施した。

床版としての挙動を FEM 解析による試設計によって、ワッフル形状の床版形状を算定し、鋼床版と同等の軽量な構造で UFC 床版を構成することができた。

連続合成桁としての全体挙動についても FEM 解析による試設計を実施し、中間支点における負曲げに対して外ケーブル等によるプレストレスを考慮することによって UFC 床版による設計が成立することを確認した。また鋼桁と UFC 床版の接合についてもスタッドジベルの必要本数を算定し、製作可能な配置となることを確認した。

輪荷重の載荷による床版の挙動を確認するために静的載荷試験を行った結果、ひび割れが生じるような引張応力度は生じないことが分かった。また、設計荷重の 2 倍以上の荷重を載荷した輪荷重走行試験により輪荷重の移動繰返し載荷に対する安全性を確

認した。輪荷重載荷試験時に構造性能には影響が無いと評価されるひび割れがリブに生じた。

今後は、輪荷重試験時にリブに生じたひび割れの発生原因を解析および実験によって検討するとともに、輪荷重載荷試験における供試体の製作、施工で得られた知見もふまえ、実構造物への適用に向けた設計・施工の手引きを作成することを考えている。

謝辞：研究を行うにあたり、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および神戸大学三木准教授にご指導をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

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），2004.9.
- 2) 一宮利通，野口孝俊，上原正光，平陽兵：東京国際空港 D 滑走路橋部プレキャスト床版間詰部の性能確認実験，第 16 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論文集，2007.10.
- 3) 南雲広幸，一宮利通，安宅之夫，石井精一：リバーサイド千秋連絡橋（仮称）の設計と施工，橋梁と基礎，2007.12.
- 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) 小坂崇，金治英貞，一宮利通，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，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，2013.10.
- 6) 一宮利通，齋藤公生，金治英貞，小坂崇：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，2013.10.

DEVELOPMENT OF HIGHWAY BRIDGE DECK USING ULTRA HIGH STRENGTH FIBER REINFORCED CONCRETE USED FOR CONTINUOUS COMPOSITE GIRDER BRIDGES

Takashi KOSAKA, Hidesada KANAJI, Toshimichi ICHINOMIYA and Kimio SAITO

Recently, fatigue cracks at weld of deck plate and rib of steel plate deck have been occurred by repeating wheel loading. Therefore the deck using ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) has been developed whose dead load is the same as that of steel plate deck. And, it's used for continuous composite girder bridges. In this study, decided the shape of UFC deck by FEM analysis. And, wheel loading test was carried out to inspect the safety of the UFC deck. Although small cracks occurred on the side of ribs at around 2 times of the design wheel load, reduction of rigidity was not observed and it is confirmed that the structural performance of the deck was not reduced.