

超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を用いた 道路橋床版の開発 ～新設・更新に資する軽量かつ耐久性の高い UFC 床版～

阪神高速道路(株)技術部湾岸線技術調査室 小坂 崇
阪神高速道路(株)技術部湾岸線技術調査室 金治 英貞
阪神高速道路(株)技術部湾岸線技術調査室 佐藤 彰紀

要 旨

都市高速道路では軽量の鋼床版の使用頻度が高いが、近年、鋼床版におけ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費用が増加する傾向にある。そこで、著者らは鋼床版と同等に軽量で、より耐久性の高い超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋床版（UFC 床版）を開発した。UFC 床版はスラブの厚さが 40mm、2 方向に配置したリブの高さが 83mm で、従来のコンクリート系床版と比較して部材厚が極めて薄い床版である。この薄い床版構造に対する安全性の確認としては FEM 解析によって、活荷重に対する応力および変位の力学的性状を確認した。また、輪荷重載荷試験によって実大試験体に動的な輪荷重を繰り返し載荷し疲労耐久性を確認した。設計輪荷重の 2 倍程度でリブ側面に微細なひび割れが生じたが剛性は低下しておらず、十分に高い疲労耐久性があることを確認した。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, UFC, 道路橋床版, 床版取替え, 合成桁

はじめに

都市高速の道路橋では、橋脚の位置や基礎の規模が制約されたり、非常に短い期間での建設が要求されたりすることから、軽量の鋼床版の使用頻度が他の道路と比べ相対的に高い。しかし、近年、既設橋の鋼床版において様々な要因により溶接部における疲労き裂が顕在化している。新設橋梁において鋼床版を採用する場合は、開断面リブやデッキプレートの増厚などの対応により、疲労き裂に対する損傷発生リスクの低減が図られているが、根本的な解決とはなっていない。

そこで、筆者らは、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、超高強度繊維補強コンクリート（Ultra high strength Fiber reinforced Concrete, 略称UFC）を用いた道路橋床版（以下、UFC床版という）を開発した^{1)~3)}。

阪神高速の技術戦略では、想定事業シナリオとして、ネットワーク強化や、大規模修繕・更新に関する取り組み内容を記載しており、そのための研究・技術開発戦略として「軽量かつ耐久性の高い床版の開発、実用化」を掲げている。ロードマップとして平成 28 年試験施工、平成 31 年の実用化・実橋での採用という目標をたてており、平成 22 年から目標に沿って実施している。この技術戦略に基づく開発は、阪神高速グループビジョンにおける「世界水準の卓越した都市高速道路技術で発展する阪神高速」に資するものである。

1. UFC を用いた床版構造

土木学会指針（案）⁴⁾においてUFCは、圧縮強度の特性値が150N/mm²以上、ひび割れ発生強度の特性値が4N/mm²以上、引張強度の特性値が5N/mm²以上の繊維補強を行ったセメント質複合材と定義されている。表-1にUFC床版と従来のPC床版に用いる材料特性の比較を示す。

本研究ではエトリングait生成系のUFC⁵⁾（以下Aft系UFCという）の使用を想定して検討を行っている。現時点ではAft系UFCの強度がUFC床版の適用条件といえるが、他のUFCも同等の性能があることが確認できれば適用可能である。UFC部材内に配置する引張抵抗材はPC鋼材である。UFCは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、伸縮装置や壁高欄など現場施工部分との接合部以外には鉄筋を配置しない構造としている。

近年、この様な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⁶⁾。鋼桁と組み合わせた道路橋床版としては海外に事例がある⁷⁾。この床版はスラブ厚が50mm、2方向のリブを有しリブの高さが330mm、リブ間隔が600mmである。プレストレスはプレテンションPC鋼材とリブ間の外ケーブルを併用している。床版自重は約0.40 t/m²とされている。従来のPC床版（約0.74 t/m²）の約半分であり、鋼床版の約2倍の自重である。

このようにUFCを用いた床版は他社においても開発されているが^{7),8)}、著者らの提案するUFC床版は、鋼床版と同等の質量という超軽量を目指した道路橋床版であり、この点において新規性のある床版構造の研究・技術開発といえる。

2. 構造の設定コンセプト

2-1 床版

UFC床版の概要を図-1および図-2示す。UFC床版は、活荷重である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た。床版質量を鋼床版と同等とすることを旨し、PC鋼材のかぶり及びあき（20mm以上かつ補強鋼材の直径以上）⁵⁾を踏まえ、スラブ厚を40mm、リブ高を83mm、最小リブ幅を70mmとした。リブ間隔については道路橋示方書（以下、道示という）におけるT荷重の直角方向幅500mmを踏まえ、2本以上のリブでひとつのT荷重を支持するものとして中心間隔を250mm以下として設定した。この様にリブを有するUFC床版を床版形状から、ワッフル型UFC床版と呼ぶ。

表-1 UFC 床版と PC 床版の材料比較⁵⁾

項目	単位	UFC 床版	PC 床版
圧縮強度	N/mm ²	180	40
ひび割れ強度	N/mm ²	8.0	1.2
引張強度	N/mm ²	8.8	2.7
弾性係数	kN/mm ²	46	31
水結合材比		0.15	0.3~0.6
透気係数	m ²	4.5×10 ⁻²⁰	10 ⁻¹⁵ ~10 ⁻¹⁷
透水係数	cm/s	4.0×10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹¹
細孔空隙量	vol. %	3~4 程度	10 程度

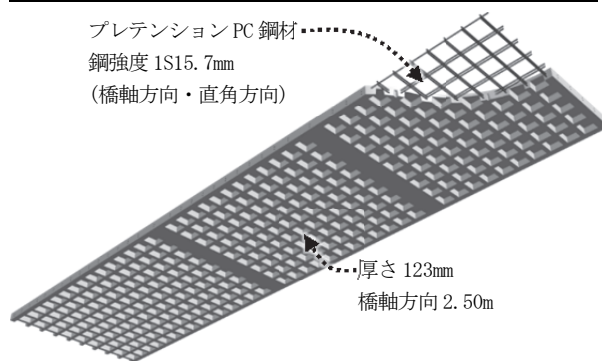


図-1 ワッフル型 UFC 床版

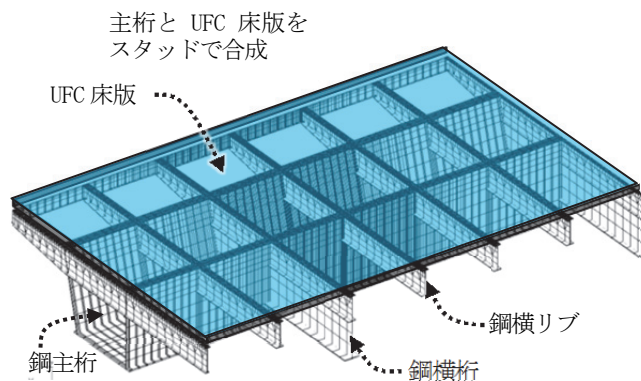


図-2 UFC 床版合成桁の床組構造

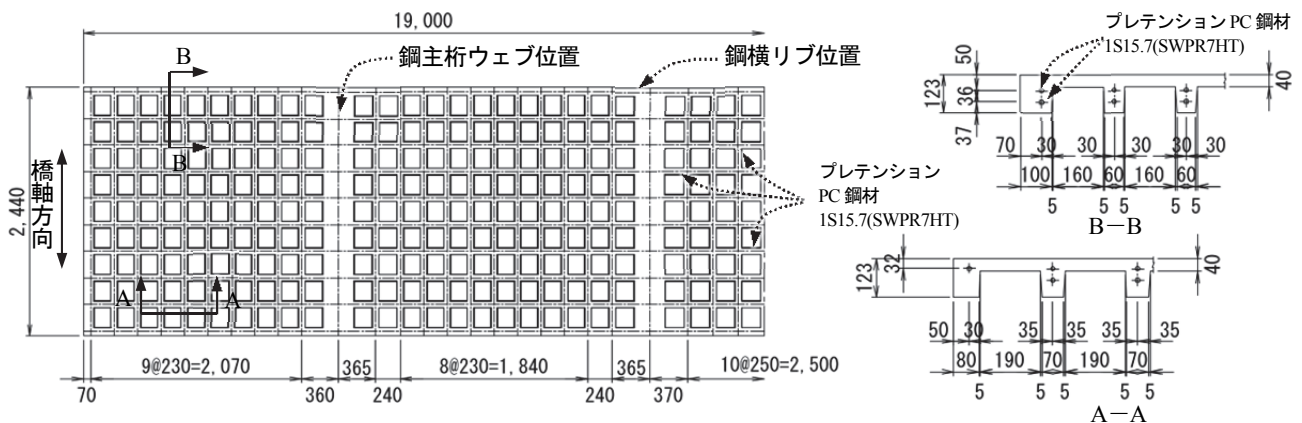


図-3 ワッフル型 UFC 床版構造図 (単位 : mm)

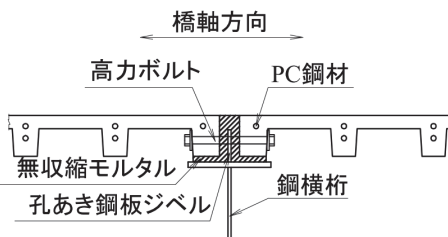


図-4 床版同士の接合部

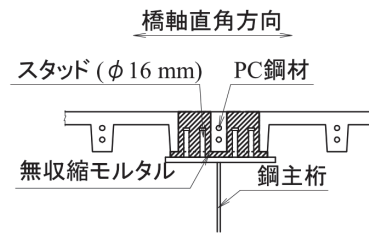


図-5 床版と桁の接合部

プレキャスト床版の形状は、図-2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、既往実績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、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。

2-2 接合部

床版横目地における床版同士の接合部を図-4に示す。床版間をモルタルで間詰めし、リブ間に高力ボルトを設置し軸力を導入する構造である。この部分には鋼横桁上に孔あき鋼板ジベルを設け、間詰め部のモルタルを介して床版と鋼桁を一体化する。床版横目地部以外の、床版と鋼桁の接合部を図-5に示す。UFC床版にスタッド用孔を設け、鋼桁上に設けた頭付きスタッドを介して床版と鋼桁を接合する構造とした。鋼桁上フランジと床版

下面間を縦横断勾配への対応や高さ調整代を考慮して50mmと設定している。スタッド高130mmのうち、50mmが間詰めモルタルとなるが、スタッド接合部の水平せん断耐力を確保するために、モルタルに繊維を混入した繊維補強モルタルを使用することとした。

3. 解析による構造成立性の検証

3-1 解析条件

解析による安全性評価においては、実橋である鋼5径間連続鋼床版箱桁（平均支間長70m）の、鋼床版デッキプレートおよび鋼縦リブ部分をUFC床版に置き換えるものとして、鋼箱桁および鋼横リブは実橋の構造を用いて解析した。

床版作用に関する検討については、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。解析モデルにおいて鋼桁はシェル要素、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。

活荷重については、道示に準拠したT荷重を載荷する。床版に対して曲げもしくはせん断が厳しくなると想定する箇所に載荷した。輪荷重は100kNに衝撃係数（ $i=0.4$ ）および安全係数（ $v_a=0.1$ ）を考慮し、154kNを橋軸直角方向幅500mm、橋軸方向幅200mmに分布荷重として載荷した。

3-2 解析結果

発生応力度が最も大きくなった載荷位置である「張出し床版先端付近での曲げ」と「箱桁一箱桁間での曲げ」に着目した載荷位置の解析結果（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-6、図-7に示す。床版上面で 6.6N/mm^2 の引張応力度（制限値 8N/mm^2 に対して0.83）、床版下面側で 80.2N/mm^2 の圧縮応力度（制限値 108N/mm^2 に対して0.74）が生じている。上縁と下縁の応力度の差は大きい

ものの、部材厚およびPC鋼材量の設定に対して、制限値の最大8割程度の発生応力度であり、設定寸法に対する構造成立性を確認することができた。

3-3 質量比較

UFC床版と鋼床版およびPC床版に関する $19\text{m}\times 2.5\text{m}$ 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UFC床版の質量を1とした場合の比率を示す。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 床版質量の比較（ $19\text{m}\times 2.5\text{m}$ ）

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

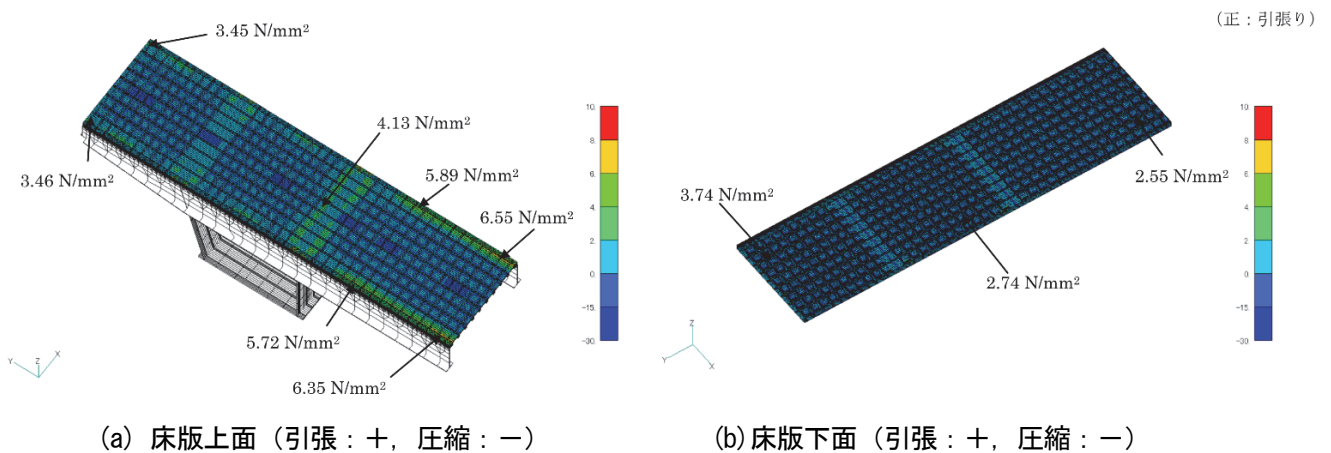


図-6 最大主応力分布

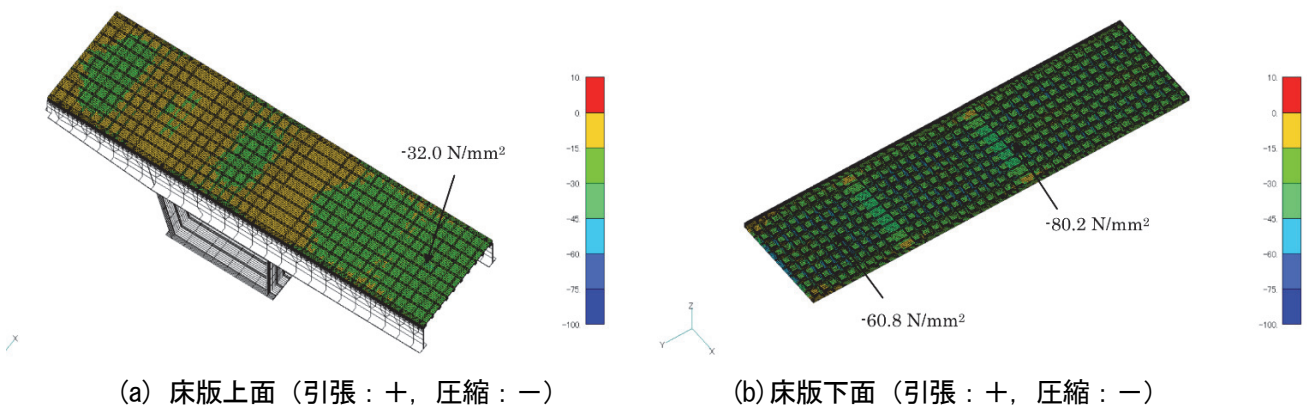


図-7 最小主応力分布

4. 実験による動的挙動および耐久性の検証

4-1 概要

UFC床版は2方向にリブを有する床版構造であるため、輪荷重載荷によって、リブ同士の交差部付近で応力が大きくなるなど局所的な応力が生じる可能性があった。局所応力を把握するために実際に輪荷重を走行させて移動載荷による応力の変動を把握する必要がある。そこで応力の変動を動的に計測した。

また、これまでにない床版構造のため、輪荷重の繰り返し走行に対する安全性を検証する必要がある。これに対し、輪荷重の繰り返し走行載荷による床版の疲労性状を確認するために、一定の載荷回数ごとに静的載荷試験し、ひずみやたわみを計測することによって疲労耐久性を確認した。

4-2 試験体

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20～30℃の湿潤養生を2日行い、圧縮強度が100～120N/mm²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℃の蒸気養生を24時間行い、試験時の圧縮強度は182～198N/mm²であった。試験体を写真-1に示す。

試験体の配置を図-8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鋼桁にボルトで緊結して4辺支持とした。2辺支持は主桁間中央付近の床版の支持状態、4辺支持は主桁ウェブ近傍における床版の状態を模擬したものである。床版と床版はM22のボルトをリブ間に配置し（ひとつの床版横目地あたり計20本）、1本あたり205kN（ボルト降伏軸力の75%）で緊結した。

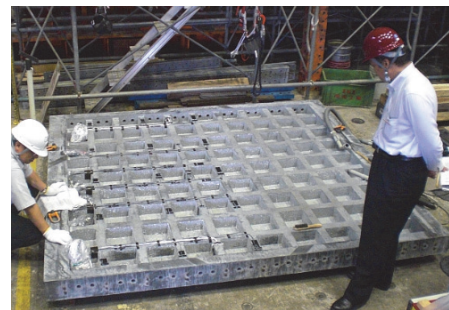


写真-1 試験体



写真-2 静的載荷用ダブルタイヤ (100kN)

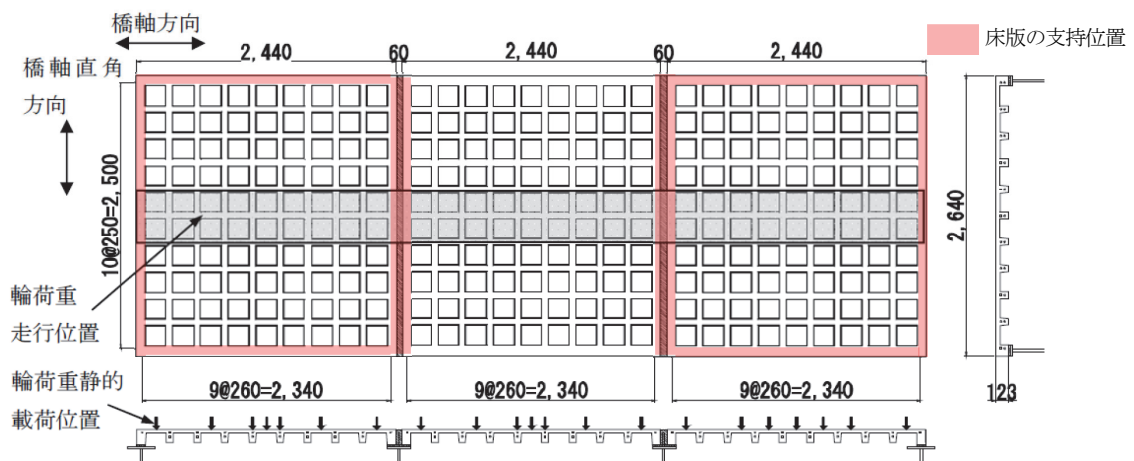


図-8 輪荷重走行試験の試験体

4-3 挙動確認試験

床版の挙動を確認するための静的載荷試験では、大阪工業大学所有の輪荷重走行試験装置を用いた。写真-2に示す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-8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2000回動的載荷し1回、100回、1000回時に静的載荷し計測した。

挙動確認試験結果として、100kNの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-9、図-10、図-11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。横軸を図-8に矢印で示す輪荷重走行位置における床版中央からの距離とし、それぞれの位置に載荷した場合の床版中央のひずみを示している。

図-9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 $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ ）であり、圧縮ひずみは最大で 61μ （応力度に換算すると $2.8\text{N}/\text{mm}^2$ ）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。実験供試体について事前に解析した結果においても、リブに着目すると荷重載荷の外側は引張応力が生じる傾向となっており実験結果と整合している。

図-10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-11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 $3.7\text{N}/\text{mm}^2$ ）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。

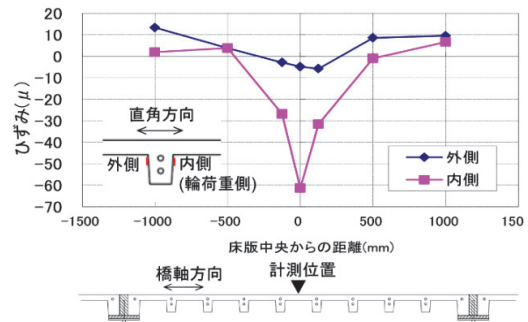


図-9 リブ側面の鉛直ひずみ

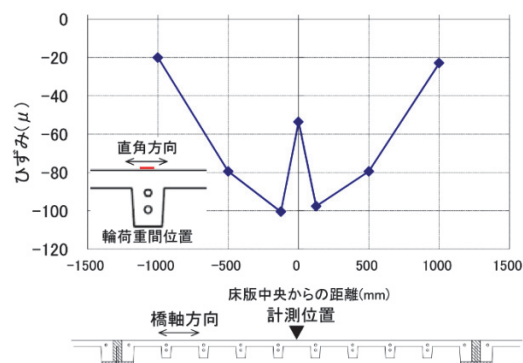


図-10 床版上面の走行直角方向ひずみ

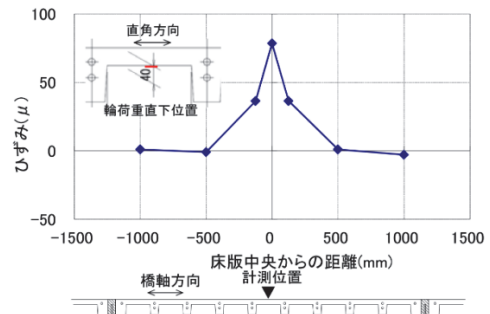


図-11 床版下面走行直角方向ひずみ

4-4 輪荷重載荷試験

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年分の载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载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に载荷荷重のステップを示す。

輪荷重走行試験結果の例として、荷重100kN、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-13および図-14に示す。両者とも、輪荷重を载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载荷前後で差はなく、輪荷重の繰返し载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。

図-15に床版横目地部において床版同士を接続するボルトの軸力の経時変化を示す。張力変動の残留分として7kN程度の軸力が低下した。これは導入軸力205kNの3.4%であり、輪荷重载荷試験に要した期間である1.5ヶ月を考慮するとボルト軸力のリラクゼーションと考えられる。弾性変位に着目するとほぼ張力の変動は生じなかったため、接合部に目開きは生じていなかったと考えられる。

190kNでの4万回载荷後、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。このひび割れの原因は特定できていないが、プレストレス導入時においてPC鋼材のポアソン効果（鋼材のポアソン比は0.3、UFCのポアソン比は0.2）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、輪荷重の繰返し载荷によって図-9に示す応力変動が繰返し作用することによって発生したものと推定している。ひび割れが生じたのは設計輪荷重の約2倍の荷重载荷時であったこと、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、床版の構造性能に与える影響は小さいと考えられる。

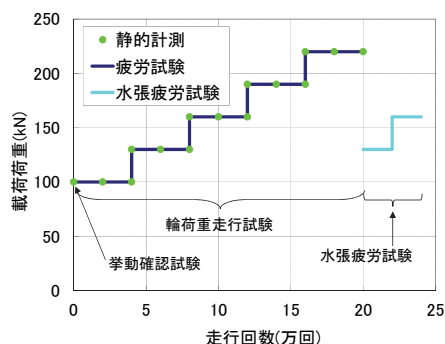


図-12 輪荷重走行試験载荷プログラム

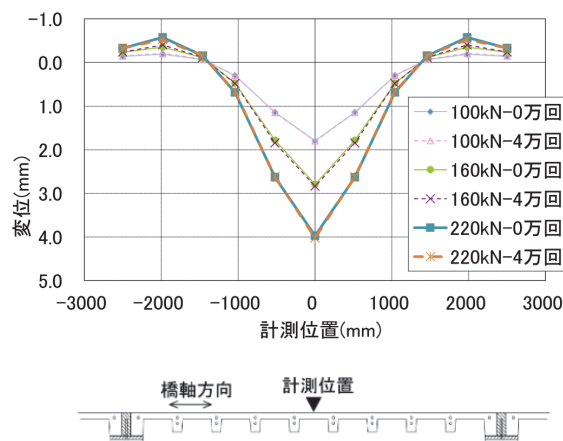


図-13 中央床版の橋軸方向たわみ分布

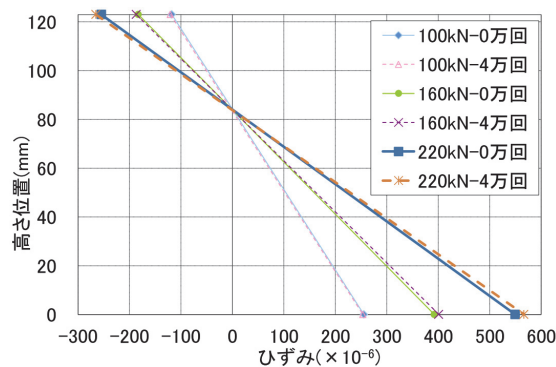


図-14 中央床版の橋軸方向ひずみ分布

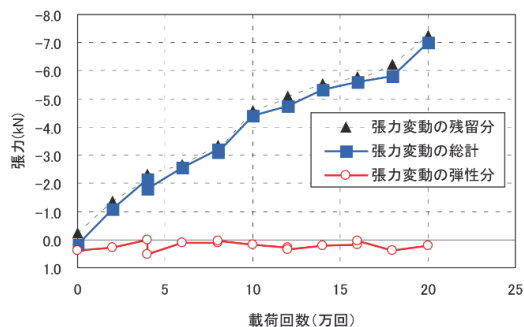


図-15 床版横目地部ボルト軸力の経時変化

5. まとめ

UFC 床版の開発において、解析によってワッフル形状の構造寸法を算定し、鋼床版と同等の軽量な構造でUFC 床版が成立することを確認した。このUFC 床版について、輪荷重の載荷による挙動を確認するために、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、移動繰返し載荷に対して十分な疲労耐久性を有し安全性を確認することができた。

謝辞：本研究は、鹿島建設(株)と公募型共同研究を遂行させて頂き、貴重なご意見を頂いている。また、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、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) 小坂崇ら：超高強度繊維補強コンクリートを用いた軽量かつ耐久性の高い道路橋床版の開発，土木学会年次学術講演会，2013.9.
- 2) 齋藤公生ら：超高強度繊維補強コンクリートを用いた軽量かつ耐久性の高い道路橋床版の輪荷重載荷試験，土木学会年次学術講演会，2013.9.
- 3) 一宮利通ら：鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高いUFC 道路橋床版の開発，プレストレストコンクリート，Vol.56, No.1, 2014.1.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 一宮ら：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.
- 7) François Toulemonde, Jacques Resplendino: Design and Building with UHPFRC, Chapter17 UHPFRC Waffle Deck Concept for a Bridge at Livron-Loriol, pp.249-262, 2011.
- 8) 趙唯堅ら：UFC プレキャスト PC 床版の技術的検討，土木学会年次学術講演会，2009.9.

DEVELOPMENT OF HIGHWAY BRIDGE DECKS USING ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE (UFC)

Takashi KOSAKA, Hidesada KANAJI and Akinori SATO

Orthotropic steel deck slabs have been frequently used, especially for urban highway bridges, because of their light weight. However, a number of fatigue cracks are detected in the steel deck slabs in recent years, pushing up the maintenance cost for the steel deck slabs. To solve this problem, we developed a deck slab using ultra high performance fiber reinforced concrete (UFC) with a compressive strength of 150 MPa, as an alternative to the conventional steel deck slabs. The own weight of the UFC deck slab is almost the same as that of an orthotropic steel deck slab. Mechanical properties and fatigue durability of the UFC deck slab were investigated, and satisfactory results were obtained.

小坂 崇



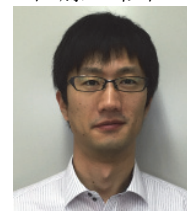
阪神高速道路株式会社
技術部 湾岸線技術調査室
Takashi Kosaka

金治 英貞



阪神高速道路株式会社
技術部 湾岸線技術調査室
Hidesada Kanaji

佐藤 彰紀



阪神高速道路株式会社
技術部 湾岸線技術調査室
Akinori Sato