

床版取替えに対応した UFC 道路橋床版の開発 — 軽量化と高耐久化を追求した床版の実現に向けて —

小坂 崇*1・金治 英貞*2・一宮 利通*3・藤代 勝*4

近年、道路橋床版において供用年数の経過による老朽化や重交通の繰返し载荷による損傷が顕在化している。既設橋における鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）にひび割れなどの損傷が生じており、このような損傷した構造物に対し、高速道路会社は大規模更新・修繕事業において床版取替えなどのリニューアルによる橋梁の長寿命化に取り組んでいる。取り替える既設 RC 床版は、旧基準で設計された床版厚が小さい橋梁であるため、鋼桁、橋脚および基礎構造への影響や橋梁の耐震性が低下しないように、軽量の床版を必要とされる。本稿では、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）を用いた軽量かつ耐久性の高い新たな道路橋床版の開発、平板型 UFC 床版に関する解析・実験による床版取替えへの適用性を示した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、UFC、床版取替え、疲労耐久性

1. はじめに

昭和 30 年代後半から昭和 40 年代に建設された高速道路は供用後 40 年以上が経過しており、劣化損傷が顕在化している。阪神高速道路では劣化損傷した構造物を長期的に維持管理していくために、大規模更新・修繕事業に取り組んでいる。そのなかで橋梁を対象とし、既設 RC 床版を耐久性の高い床版に取り替えることを計画している。

取り替える既設 RC 床版は、旧基準で設計された床版であり、現行基準の最小床版厚よりも床版厚が小さい場合が多い。よって、床版を取り替えることによって、鋼桁、橋脚および基礎構造への常時や地震時の荷重作用が増えることを避けるために既設 RC 床版よりも軽量の床版とする必要がある。また、床版取替え前後において、舗装厚を確保したうえで道路の縦断線形が変更となることを避けるために、既設 RC 床版と同等以下の床版厚とする必要がある。

著者らは、このような技術的な課題に対し、軽量かつ疲労耐久性の高いコンクリート系床版として、UFC (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete) を用いた道路橋床版（以下、UFC 床版）の開発に 2010 年に着手し実用化段階に至った。本床版はプレキャスト床版であり、スタッド

などのずれ止めを介し鋼桁と接合し合成桁を構成する。既設 RC 床版を UFC 床版に取り替えた合成桁を図 - 1 に示す。

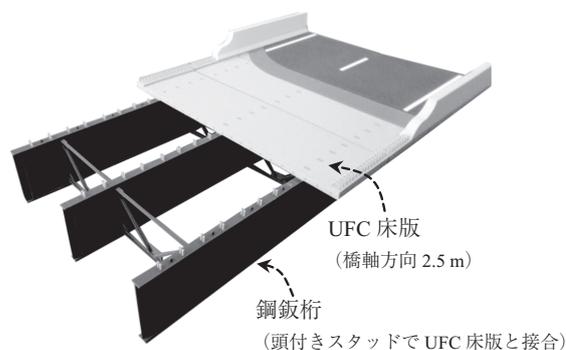


図 - 1 UFC 道路橋床版を用いた合成桁

2. UFC 道路橋床版の開発

本床版に用いる UFC は繊維補強セメント複合材の一種であり、超高強度、高靱性を有する材料と区分されている。土木学会の設計施工指針案¹⁾においては、圧縮強度が 150 N/mm² 以上で鋼繊維を混入するセメント複合材と定義



*1 Takashi KOSAKA

阪神高速道路(株) 技術部
湾岸線技術調査室



*2 Hidesada KANAJI

阪神高速道路(株) 技術部
湾岸線技術調査室長



*3 Toshimichi ICHINOMIYA

鹿島建設(株) 技術研究所
上席研究員



*4 Masaru FUJISHIRO

鹿島建設(株) 土木設計本部
橋梁設計部 設計長

されている。本開発では、エトリンガイト生成系（以下、AFt系）のUFC²⁾（圧縮強度 180 N/mm²）の使用を想定した。

著者らは、2種類のUFC床版を開発しており、ひとつが図-2に示す格子状のリブを有するプレキャスト床版であるワッフル型UFC床版である。この床版は質量が鋼床版と同等、従来のPC床版の1/4程度と超軽量である。本床版の構造は、リブ内にプレテンションPC鋼材を2方向に配置している。本床版の性能は解析・実験により確認している^{3~7)}。

もう一方が図-3に示す平板のプレキャスト床版である平板型UFC床版である。平板型UFC床版は、軽量さとコストのバランスを考慮した床版である。橋軸直角方向はプレテンションPC鋼材を配置し、橋軸方向は現場施工時にポストテンションPC鋼材を配置する構造としている。

床版取替えに適用するUFC床版は、対象橋梁の床版厚さや耐震性能などによって、ワッフル型と平板型を適材適所に使い分けることを考えているが、本稿では平板型UFC床版を適用することを想定した検討について述べる。

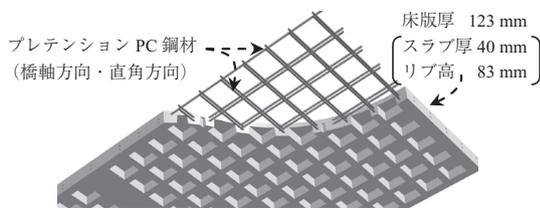


図-2 ワッフル型UFC床版

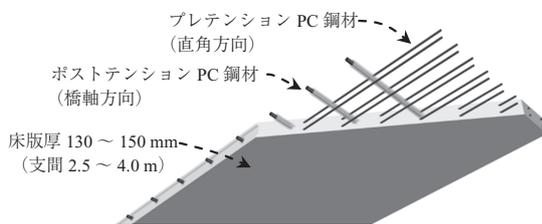


図-3 平板型UFC床版

3. 床版取替えへの適用性に関する検討

3.1 平板型UFC床版の試設計による検討

試設計の対象橋梁は昭和40年代建設の鋼単純合成桁（桁高2.0m、支間長32m、5主桁、床版厚180mm）である。

試設計の結果、UFC床版の厚さを150mmと算定した。この床版厚さは、床版支間4.0mでプレテンション鋼材およびポストテンション鋼材の配置に対し、あきおよびかぶりを考慮した設計上の必要な厚さである。PC鋼材の諸元を表-1に示す。床版厚が既設RC床版より薄くなることから、床版取替え後の道路縦断線形は変更の必要がなく、床版設置時の天端高さは、床版と鋼桁上フランジ間の無収縮モルタルによる間詰めやハンチなどで調整が可能である。

床版相互の接合構造は、無収縮モルタルを充填して硬化後にポストテンションPC鋼材で緊張し、橋軸方向に軸力

を導入するPC接合構造である。接合部は静的載荷実験、繰返し載荷によって耐力と疲労耐久性を算定し、十分な安全性を有していることを確認している⁸⁾。

表-1 PC鋼材の緒元

	項目	単位	設計値
直角方向 PC IS15.2 (SWPR7BL) プレテンション	かぶり	mm	22.4
	配置段数	段	2
	配置間隔	mm	180
橋軸方向 PC IS28.6 (SWPR19L) ポストテンション	かぶり (シース)	mm	48.5
	配置段数	段	1
	配置間隔	mm	400

3.2 曲げ剛性の比較

取替え後の床版曲げ剛性が既設RC床版よりも小さくなると鋼桁の疲労などの影響が懸念される。既設RC床版とUFC床版の剛性比較を図-4に示す。既設RC床版は設計基準強度が27 N/mm²、ヤング係数は2.65 × 10⁴ N/mm²であり、UFC床版は設計強度180 N/mm²、ヤング係数は4.6 N/mm²である。UFC床版150mmの曲げ剛性は既設RC床版180mmの曲げ剛性とほぼ同等であるため、床版取替えによって鋼桁に疲労などの影響が生じることはないと推定される。

なお、剛性が小さくなる場合の振動特性の確認として、ワッフル型UFC床版を現場に設置し加振および車輻走行実験を行い、共振などの問題がないことを確認している⁹⁾。

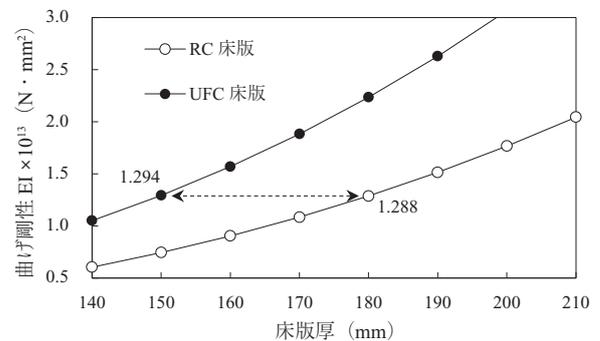


図-4 剛性の比較

3.3 床版および合成桁の質量比較

床版および合成桁の質量について既設RC床版、平板型UFC床版、PC床版の比較を表-2に示す。PC床版の最小厚さは現行の基準に従えば床版支間4.0mで厚さ210mmとなるが、床版の継手に一般的なループ継手を用いるとループ鉄筋の形状により最小厚さが240mmであ

表-2 単位長さあたりの質量比較（幅員18.4m）

	厚さ (mm)	床版のみ		合成桁	
		質量 (t/m)	比率	質量 (t/m)	比率
既設RC床版	180	8.7	1.00	17.3	1.00
平板型UFC床版	150	7.3	0.84	15.9	0.92
PC床版	240	11.7	1.34	20.3	1.18

る。UFC床版はPC床版や既設RC床版と比較し軽量となることから既設鋼桁、橋脚および基礎構造への影響が小さく、橋梁の耐震性が低下しない利点を有する。

3.4 鋼桁への影響検討

対象橋梁は建設時に死荷重合成桁として設計されていたが、床版取替え作業時は桁下の条件によって仮設ベント支柱を設けないこととし、床版取替え後は活荷重合成桁となることを想定した。この変更に伴う鋼桁下フランジの鋼あて板補強量を算出した。図-5に外側の主桁の補強範囲を示す。死荷重のうち床版重量を軽量化したことによって鋼桁補強量を約3割低減することができた。

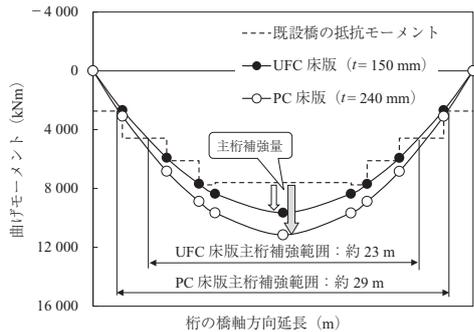


図-5 主桁の補強範囲

4. 解析・実験による平板型UFC床版の性能確認

4.1 断面破壊に対する安全性

平板型UFC床版の断面破壊に対する安全性を確認するために、床版厚さ150mm(床版支間長4.0m)に対し、非線形3次元FEM解析を実施した。載荷荷重は死荷重およびプレストレス力を考慮し、床版中央に輪荷重を想定した分布荷重(200×500mm)を漸増載荷した。解析結果として荷重-変位曲線を図-6に示す。漸増解析結果によると、UFCひび割れ時の荷重は設計T荷重140kN(衝撃係数0.4)の1.75倍、PC鋼材降伏時荷重は4.14倍、UFC圧縮破壊時荷重は6.07倍であり、断面破壊に対する十分な安全性を有しているといえる。

4.2 床版の疲労耐久性

平板型UFC床版の疲労耐久性は、輪荷重走行試験によって確認した。輪荷重走行試験については、鉄輪による動

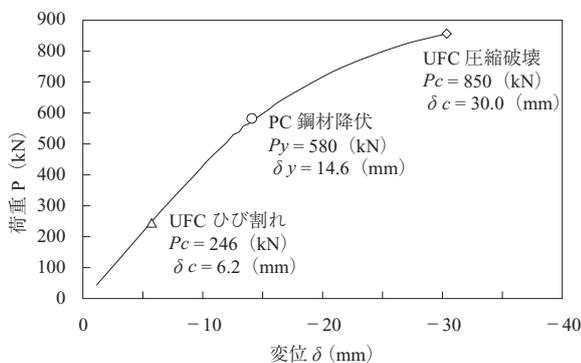


図-6 平板型UFC床版の荷重-変位曲線

的な輪荷重載荷とした。床版および輪荷重載荷部を図-7に示す。載荷荷重は100kNから30kNずつ加算し最大400kNまでの階段状載荷とし、各載荷段階で4万回ずつ合計40万回載荷した。なお、100kN～160kNの12万回については、床版上に水のある状態で載荷した。この載荷ステップは、既往のRC床版などの輪荷重走行試験を参考に決定した。輪荷重走行試験の状況を写真-1に示す。

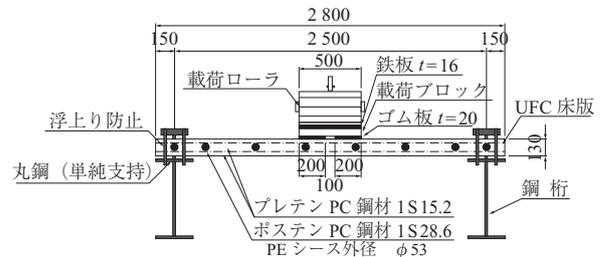


図-7 床版および輪荷重載荷部(単位:mm)

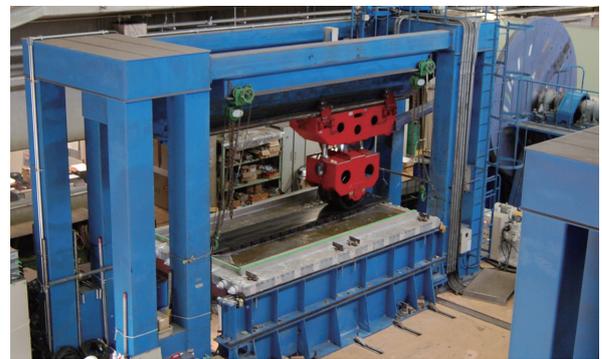


写真-1 輪荷重走行試験状況

載荷ステップにおける要求性能と試験結果を図-8に示す。要求性能は、阪神高速道路の実測活荷重をもとに100年に等価な荷重ステップとして160kN(約11万回)と設定した。平板型UFC床版は、40万回(最大400kN)の輪荷重走行試験に対して破壊しなかったことから、要求性能に対して十分な疲労耐久性があることが確認できたといえる。図中の既往輪荷重試験(PC8-1、PC8-2)は過去に実施されたPC床版の試験結果¹⁰⁾である。

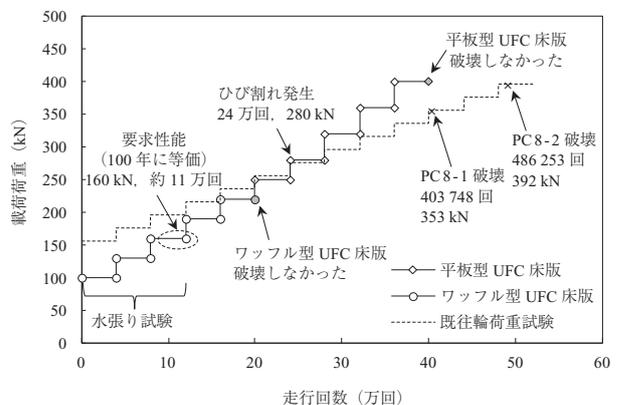


図-8 要求性能と輪荷重走行試験結果

PC床版との比較にあたり、荷重の仕様が異なるため、図-9に示すように横軸を載荷荷重100kNに対する等価回数、縦軸を正規化したたわみとして比較した。等価回数の算出に用いるS-N曲線の傾きの逆数は既往のRC床版を参考に12.76を用いた。縦軸の正規化したたわみは、計測たわみを作用荷重で除して単位荷重あたりのたわみを求め、さらに初期荷重作用時のたわみで除して、初期たわみからの比率として表したものである。正規化したたわみが1よりも大きくなれば、ひび割れなどの影響によって剛性が低下したことになる。

ワッフル型UFC床版の輪荷重走行試験結果³⁾を図示すると、正規化したたわみがほぼ1.0のまま試験を終了している。PC床版は正規化したたわみが2.0～2.5を超えたあたりで急激に大きくなって破壊に至っている。平板型UFC床版はPC床版が破壊した等価回数よりも大きな等価回数に対する輪荷重走行に対して破壊せず剛性低下も小さかったことから、PC床版よりも高い疲労耐久性を有すると推定される。

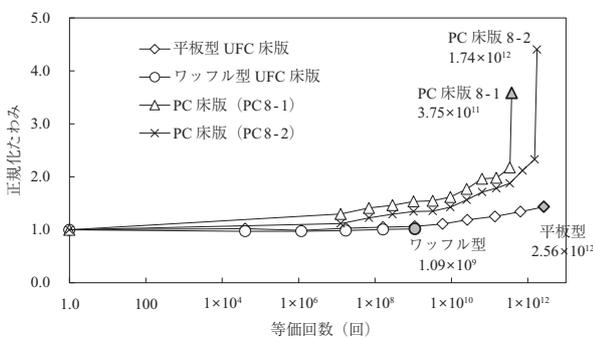


図-9 等価回数-正規化したたわみ

4.3 塩化物に対する耐久性

耐久性の比較としてPC床版、UFC床版の鋼材位置における塩化物イオン濃度の算出結果の比較を図-10に示す。塩化物イオン濃度はコンクリート標準示方書¹¹⁾に準じて算出した。表面塩化物イオン濃度として13.0kg/m³(飛沫帯)を想定し、かぶりをPC床版は70mm、UFC床版は20mmとした。塩化物イオン拡散係数DdはPC床版を0.251、UFC床版を0.002～0.006(Aft系UFCの実測値は0.002)として計算した。鋼材の腐食発生限界に達する年数はPC床版に比べて約3～10倍長く、高い耐久性を有している

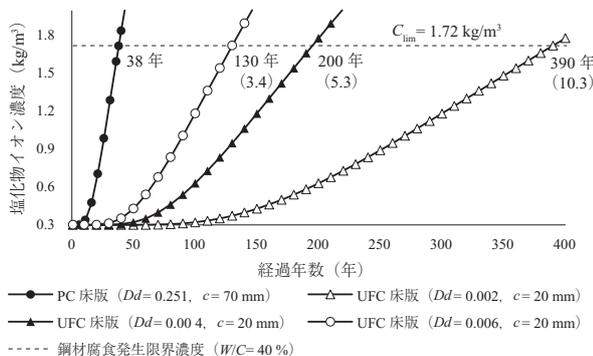


図-10 塩化物イオンの侵入に対する抵抗性の比較

といえる。

5. おわりに

本稿では、軽量かつ耐久性の高いUFC道路橋床版の開発を説明し、床版取替え後の新設床版へ平板型UFC床版を適用することのメリットを示した。解析および実験による平板型UFC床版の性能確認によって高い耐荷力、耐久性を有していることを示した。

UFC床版は実用化段階に到達しており、既設RC床版の取替え後の床版に使用することで、橋梁の耐震性を損なうことなく構造物を長寿化することができ、安全・安心にも寄与できるものと考えている。

謝 辞

本研究を行うにあたり大阪大学 松井繁之名誉教授、長岡技術科学大学 長井正嗣名誉教授、東京工業大学 二羽淳一郎教授、岐阜大学 内田裕市教授および神戸大学 三木朋広准教授にご指導をいただいている。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年9月
- 2) 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年11月
- 3) 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, プレストレストコンクリート工学会, 2013年10月
- 4) 一宮利通, 齋藤公生, 小坂 崇, 金治英貞: 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年10月
- 5) 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, プレストレストコンクリート工学会, Vol.56, 2014年1月
- 6) Takashi KOSAKA, Hidesada KANAJI, Toshimichi ICHINOMIYA, Kimio SAITO: Development of a Highway Bridge Deck Using Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, IABSE Conference Nara 2015, IABSE, 2015年5月
- 7) 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報告書, 技術推進ライブラリー No.17, 2015年7月
- 8) 樽谷早智子, 一宮利通, 齋藤公生, 小坂 崇, 金治英貞: UFC道路橋床版の接合構造に関する実験的検討, 第69回年次学術講演会, 土木学会, 2014年9月
- 9) 藤代 勝, 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇: ワッフル型UFC床版の振動およびたわみに関する検討, 第71回年次学術講演会, 土木学会, 2016年9月
- 10) 国土技術政策総合研究所: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国土技術政策総合研究所資料第28号, 2002年3月
- 11) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013年3月

[2016年12月27日受付]