

論文

超高強度繊維補強コンクリートを用いた平板型 UFC 床版による既設床版の取替え検討

小坂 崇*, 金治英貞**, 一宮利通***, 藤代 勝****

*工修, 阪神高速道路(株), 技術部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

**工博, 阪神高速道路(株), 技術部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

***工修, 鹿島建設(株), 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

****工博, 鹿島建設(株), 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

近年, 高速道路では橋梁の供用年数の経過とともに, 一部の鉄筋コンクリート床版において老朽化と重交通の繰返し載荷によって損傷が顕在化しており, 大規模更新・修繕事業において取替えが計画されている。著者らは, 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を用いた鋼床版と同等に軽量かつ耐久性の高いコンクリート系床版を開発しており, 床版取替えも適用対象と考えている。本稿では, 大規模更新・修繕事業における床版取替えと, UFC 道路橋床版の開発経緯, 床版の要求性能に対する解析や実験による確認, さらに開発効果と今後の床版取替えへの適用について述べる。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, UFC, 大規模修繕, 床版取替

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。この様な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。本事業は橋梁を対象としており, 鉄筋コンクリート(以下, RC という)床版や鋼床版の, 耐久性の高い床版への取替えを計画している。

床版の取替えについては, 既設 RC 床版の撤去など種々の技術的な課題がある。取替え対象の既設 RC 床版は, 旧基準で設計された薄い床版のため, 新設する床版は鋼桁, 下部構造および基礎構造への常時の荷重や地震時の慣性力を含め現状より重くなることを避けるために「軽量さ」が求められる。また, 床版取替え前後において舗装厚を確保した上で縦断線形への影響を避けるためには「薄さ」も求められる。

著者らはこの様な技術的な課題に対し「軽量かつ耐久性の高いコンクリート系床版の開発」として, 超高強度繊維補強コンクリート(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下, UFC という)を用いた図-1 に示す道路橋床版(以下, UFC 床版といふ)を提案し, 床版の要求性能を解析や実験によって確認することにより実用化段階に至った。

UFC 床版は, 鋼床版と同程度に超軽量な床版であり,

耐久性の高い床版である。このように UFC を用いることによって超軽量を目指した道路橋床版は他にみあたらず, 阪神高速グループビジョン 2030¹⁾に掲げる「世界をリードする都市高速道路技術の確立」に資する研究・技術開発と位置づけている。

2. 床版における損傷の顕在化と大規模修繕

2.1 構造物の老朽化と大規模更新・修繕事業

阪神高速道路の大坂, 兵庫地区は供用から 40 年以上経過した構造物が約 3 割(約 83km)を占め, 10 年後にはこれが約 5 割に達するなど高齢化が進行し, 補修が必要な箇所が年々累積される状況にある。

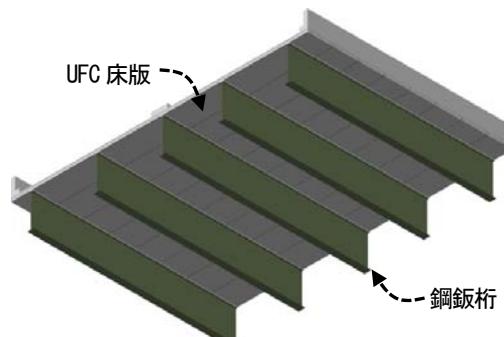


図-1 UFC 道路橋床版(平板型)

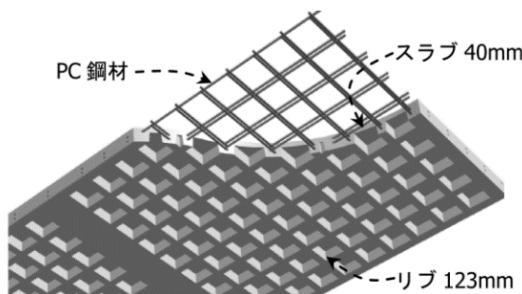


図-2 ワッフル型 UFC床版

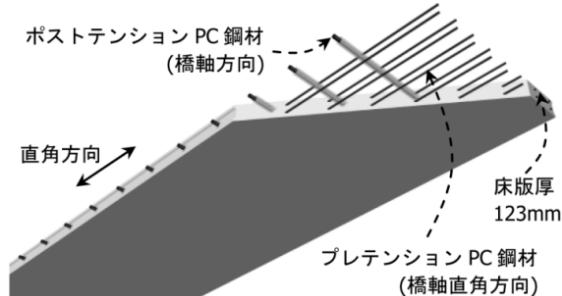


図-3 平板型 UFC床版

平成25年4月に「阪神高速道路の長期維持管理及び更新に関する技術検討委員会」により大規模更新・修繕の基本的な考え方について提言を受けた弊社は、平成26年1月に更新計画を公表、平成27年3月に事業許可、業務実施計画の認可を受けた。大規模更新・修繕事業には、鋼釘桁と組み合わせて合成桁等を構成する旧基準で設計されたRC床版より耐久性の高い床版への取替えが含まれている。

2.2 既設RC床版や鋼床版における損傷の顕在化

阪神高速12号守口線は、昭和43年から46年に開通したが、昭和48年以前の道路橋示方書（以下、道示という）により設計されたRC床版であることから、平成24年版の道示の規定に比べ床版厚が薄い。

この様な床版は、老朽化と重交通による繰返し載荷に伴う疲労損傷が発生したため、従来、床版下面に鋼板を接着することで補強してきた。しかし近年、写真-1に示すように、鋼板接着補強した床版についても、鋼板自体の腐食による損傷や、一部の床版コンクリートでひび割れが進行し、コンクリートが砂利化、路面が陥没に至る箇所も発生している。この様なRC床版の損傷の顕在化を踏まえ、大規模修繕事業の事前調査

として、平成26年度のフレッシュアップ工事（路線単位の8日間通行止め工事）において実橋からRC床版を切り出し、輪荷重走行試験によって、ひび割れの生じている床版の疲労耐久性の低下を確認している。

2.3 鋼床版における疲労き裂の顕在化

都市高速道路では、設計施工における制約上、軽量な鋼床版の使用頻度が他道路と比べ相対的に高いが、近年、既設橋において様々な要因により溶接部を起点とする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、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。

一方、大規模更新事業においても、阪神高速3号神戸線湊川付近の橋梁（桁及び鋼床版）の取替えが計画されている。この橋梁は立地条件の厳しい狭隘な場所に、支間長を長くして設置する必要があったため、基礎や上部構造を小型、軽量化した結果、鋼床版および鋼桁の各所で疲労き裂が発生している。

2.4 床版取替えに向け必要な技術開発

この様な大規模更新・修繕事業における床版取替えの実施にあたって必要な技術として、軽量な上部構造、狭隘な空間での施工技術、撤去及び架設期間を短縮できる構造・工法があげられる。この様な必要な技術を開発するために、公募型共同研究等で技術開発を積極的に推進しており本研究・開発もその一環である。

3. UFC道路橋床版の開発経緯と構造概要

3.1 開発経緯

UFCは纖維補強セメント複合材FRCC（Fiber Reinforced Cement Composites）の一種であり、超高強度、ひずみ軟化型の韌性を有する材料と区分されている²⁾。土木学会の設計施工指針案³⁾においては、圧縮強度が150N/mm²以上で鋼纖維を混入するセメント複合材と定義されている。本研究では、エトリンガイト生成系のUFC⁴⁾を使用材料として解析および実験を実施した。なお、他のUFCについても床版の要求性能を解析や実験で確認できれば使用可能である。

3.2 構造概要

UFC床版は2種類のタイプを開発している。ひとつが図-2に示す格子状のリブを有する鋼床版と同等、従来のPC床版の1/4程度の質量と超軽量な「ワッフル型UFC床版」である。本床版は格子状のリブ内にプレテンションPC鋼材を配置している。部材寸法は2.5mの鋼横橋で支持される床版として図に示す寸法が基本である。もう一方が図-3に示すリブの無い「平板型UFC床版」である。

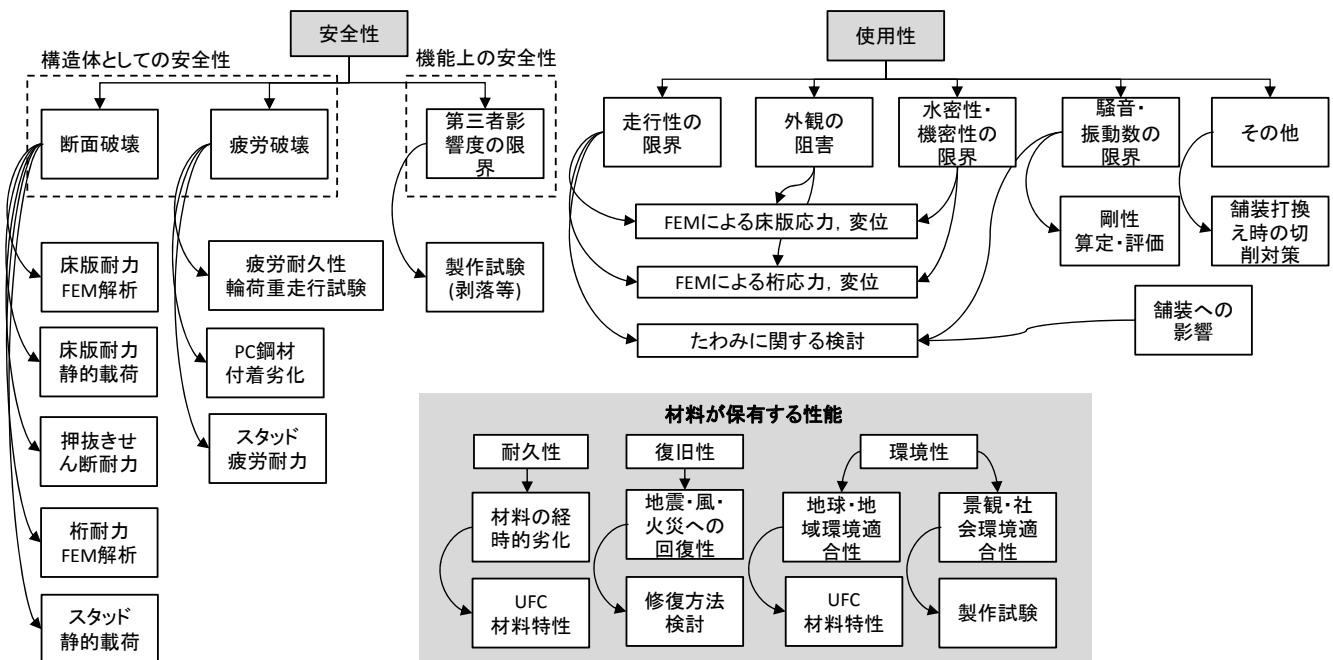


図-4 UFC 床版の要求性能と解析、実験による確認内容

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り、従来の PC 床版の 1/2 程度の質量である。橋軸直角方向はワッフル型と同様プレテンション 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。床版支間長が 2m 程度の場合は図-2 に示すように床版厚 123mm、床版支間長 4m 程度の場合は床版厚 150mm と試算している。

いずれの床版もひび割れを許容しない PC 床版として設計した工場で製作するフルプレキャスト床版である。ワッフル型 UFC 床版と平板型 UFC 床版は、対象橋梁の条件（鋼桁、下部構造および基礎構造の保有耐力）や施工時の制約等をふまえ、適材適所に使分ける計画である。

4. 解析および実験による性能確認

4.1 UFC 床版の要求性能

UFC 床版に要求される構造性能は、安全性と使用性である⁵⁾。UFC 床版の要求性能とこれまでの研究における確認内容を図-4 に示す。

安全性については断面破壊、疲労破壊、第三者影響度の限界の確認が必要である。使用性については走行限界、外観の阻害、水密性の限界、騒音・振動の限界についての確認が必要である。各項目について解析および実験による性能の確認を実施した。なお、耐久性、復旧性および環境性については、UFC が材料として確認されている性能であるため床版としての性能確認は省略した。ワッフル型 UFC 床版の性能確認については各学会等で既報である^{6)~11)}。本文では平板型 UFC 床版の安全性、施工性及び維持管理性に関する検討内容について述べる。

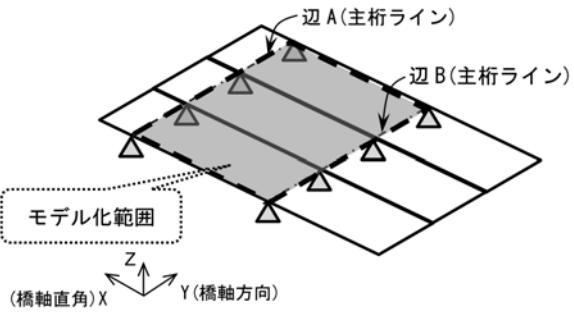


図-5 耐力解析のモデル化範囲

表-1 UFC の材料特性

弾性係数 $E_c(N/mm^2)$	ボアソン比 ν	圧縮強度 $f_{ck}(N/mm^2)$	引張強さ $f_t(N/mm^2)$
46,000	0.2	180	8.8

4.2 断面破壊に対する安全性

(1) 解析手法、解析モデル

UFC 床版の断面破壊に対する安全性を確認するために、耐力を算定して設計活荷重に対する安全率を算定した。床版厚 150mm の平板型 UFC 床版を対象に、材料非線形を考慮した非線形 3 次元 FEM 解析を実施した。解析モデルは図-5 に示す橋軸方向に床版 3 パネルである。橋軸直角方向は鋼桁間を対象に、床版同士の接合部は一体として挙動するものとした。

解析に用いた UFC の材料特性を表-1 に示す。なお、引張応力-ひずみ曲線における等価検長 L_{eq} (ひび割れ間隔に相当する) を算出する際の h は UFC 床版の床版厚である 150mm とした。PC 鋼材の応力-ひずみ曲線はコンクリート標準示方書のトリリニアモデルを使用した。

表-2 支持条件

	X	Y	Z	θ_x	θ_y	θ_z
辺 A	Free	Fix	Fix	Fix	Free	Fix
辺 B	Fix	Fix	Fix	Fix	Free	Fix

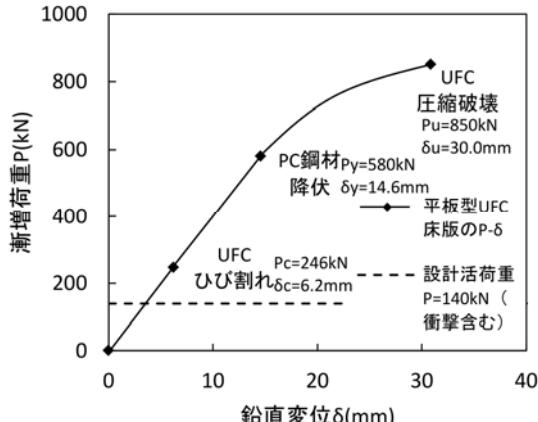


図-6 解析結果（荷重一変位）

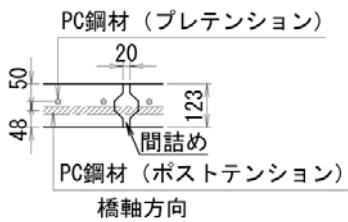


図-7 平板型 UFC 床版同士の接合部

載荷荷重は、死荷重及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（橋軸方向 200mm、橋軸直角方向 500mm）を載荷し漸増させるプッシュオーバー解析を実施した。自重及び漸増載荷時の支持条件を表-2に示す。

(2) 解析結果

解析結果として荷重一変位曲線を図-6に示す。通常の設計では、設計活荷重に対する発生応力度を、制限値である圧縮強度の60%またはひび割れ発生応力度以下になるように設計する。漸増解析結果によると、UFCひび割れ時の荷重は、設計活荷重140kN（道示のT荷重に衝撃係数0.4を考慮）の1.75倍、PC鋼材降伏時の荷重は4.14倍、UFC圧縮破壊時の荷重は6.07倍であった。

よって、UFCの耐力は設計荷重に対して十分に高い耐荷力を有するといえる。また、鋼纖維を有することから引張軟化曲線を有し、圧縮破壊ひずみに達した時点でも断面に引張抵抗は有しており、床版断面の破断には至っていない状態といえる。

4.3 床版同士の接合部の安全性

床版同士の接合構造を図-7に示す。床版間に無収縮モルタルを充填し、PC鋼材で緊張し橋軸方向に軸力を導入する接合構造である。実験によって十分な耐荷性能があることを確認した¹⁰⁾。



写真-2 UFC 打設状況



写真-3 試験製作状況

4.4 施工性

工場製作のプレキャスト部と現場施工の場所打ち部の接合構造として、伸縮装置部、壁高欄接合部、排水栓取り付け部の施工性を検討して、写真-2のように、工場製作部分の試験製作を実施した。

UFCは打込み後の蒸気養生終了までに800μ程度収縮する。UFC内部に鉄筋を配置すると、この収縮が拘束されるためUFCにひび割れが生じる可能性がある。土木学会指針³⁾では「部材間の接合部など特殊な場合を除いて異形鉄筋は使用しないことを原則とする」とされている。提案する詳細構造の製作性に問題が無いことを確認し、出来形確認時に地覆等の鉄筋埋め込み部について、鉄筋の拘束によるUFCのひび割れが生じていないことを確認した。

現場施工部分についても写真-3のように試験施工を実施し、床版接合部や鋼桁との接合部における施工に関する課題を抽出し施工手引きへ反映した。

4.5 維持管理性

平板型 UFC 床版の設計では、応力度の制限値をひび割れ発生限界以下としているため、ひび割れが生じない前提である。一方、ワッフル型 UFC 床版を対象に実施した輪荷重走行試験では、載荷途中でリブ側面に 0.01mm 未満の微細なひび割れが観察された。このひび割れは構造性能への影響は無いと判断した⁸⁾。このひび割れはマイクロスコープにより確認できたが、目視では確認できないレベルのひび割れであった。

よって、平板型 UFC 床版についても、輪荷重の走行により供用中に微細なひび割れが生じる可能性はあり、維持管理における点検時に目視ではひび割れが発見できない可能性があると考えた。



写真-4 工事用道路への設置中の状況

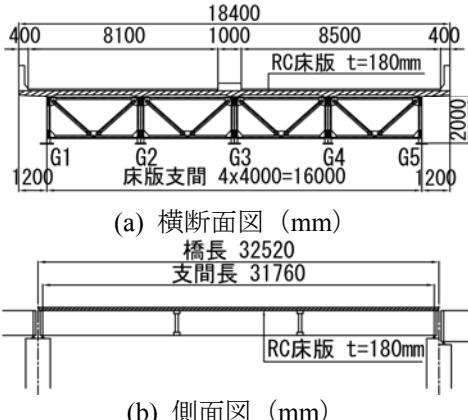


図-8 RC床版取替え検討対象の既設橋

そこで、維持管理手法に関する検討のひとつとして、ひずみ計測用の光ファイバを設置した UFC 床版を、写真-4 に示すように工事用道路に設置し、ひずみの計測が可能であることを確認した。

4.6 耐久性

UFC 床版は、輪荷重走行試験によって、床版に損傷がなく高い疲労耐久性を有することを確認している⁷⁾。載荷回数は阪神高速道路で実測された車両通行 100 年分を大きく超える年数と等価な荷重である。

また、UFC は組織が非常に緻密であるため、通常の高強度コンクリートの約 100 倍、塩化物が浸透しにくく、鋼材の位置まで塩化物が浸透するのに約 3 倍の年数がかかるほど長寿命である。UFC の塩化物イオン拡散係数を $0.002\text{cm}^2/\text{年}$ として、UFC 部材表面から 20mm の位置（鋼材位置）の塩化物イオン濃度が腐食限界 ($1.2\text{kg}/\text{m}^3$) に達するまでの年数を算定すると 300 年に相当し高い耐久性を有している。

4.7 経済性

UFC 床版は工場製作に対する設備が必要であることから、使用数量によって単価が変動するが、床版取り替え工事を想定した場合、従来のプレキャスト PC 床版より床版のコストは若干高価になる。

しかし、従来の RC 床版よりも薄いことから縦断線形の変更が不要であり、軽量であることによって鋼桁等の補強量の低減、施工日数の短縮も可

能であり、更新にかかる総コストの縮減には寄与するものといえる。

また、耐久性が高い事から床版の補修補強や取替えを考慮した維持管理にかかるライフサイクルコストについても他の床版と比較して優位といえる。

5. 床版取替えへの適用に関する検討

5.1 床版取替えの試設計

試設計の対象橋梁は、図-8 に示す昭和 40 年代に建設された鋼単純合成桁（桁高 2.0m、支間長 32m、5 主鉄桁）である。合成桁の建設時は、仮設ベント支柱を用いた施工であったと想定し、死荷重合成桁として復元設計を実施した。

主桁間隔 4.0m に対し RC 床版厚さが 180mm で上下線一体構造である。阪神高速道路では、既設橋におけるこのような RC 床版は、損傷状況を判定し床版下面を鋼板接着補強している場合が多い。なお、床版厚さ 180mm は建設当時の旧基準によるものであり現在の新設橋に対する基準より薄い床版である。

平板型 UFC 床版は、図-3 に示すように橋軸直角方向にプレテンション方式でプレストレスを与えたプレキャスト床版である。工場製作し現地に運搬して架設した後に、床版同士の間詰めに無収縮モルタルを打ち込み、軸方向をポストテンション方式で一体化するものである。床版接合部は PC 構造として接合するため、鉄筋による補強が無いことから急速施工に対応した構造である。

対象橋梁（床版支間 4.0m）を試設計した結果、UFC 床版の厚さを 150mm と算定した。この床版厚さは、床版支間 4m でプレテンション鋼材及びポストテンション鋼材の配置に対し、あき及びかぶりを考慮した設計上の必要な厚さである。

5.2 質量の比較

床版取替え工事に用いる 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 となり 60mm の縦断線形の変更が必要となる。一方、UFC 床版の場合は、床版厚が既設床版より薄くなるので縦断線形の変更は必要ない。床版断面ごとの床版質量と、合成桁質量の単位長さ当たりの比較を表-3 に示す。

表-3 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 UFC 床版	150	7.3	0.84	15.9	0.92
PC 床版	240	11.7	1.34	20.3	1.18

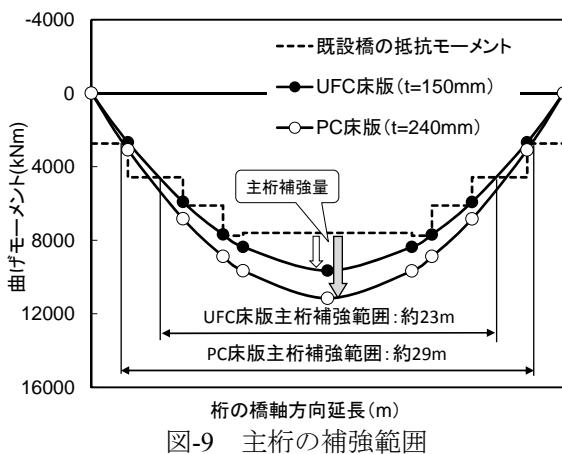


図-9 主桁の補強範囲

床版の質量は、既設 RC 床版の厚さ 180mm との比率で UFC 床版は 0.84, PC 床版は 1.34 となる。鋼桁及び橋面工を含めた上部構造の重量は既設 RC 床版との比率で、UFC 床版の場合は 0.92, PC 床版の場合は 1.18 となり、UFC 床版は断面が小さくできることから既設鋼桁、橋脚及び基礎構造への影響を小さくできる。

5.3 鋼桁への影響

床版を支持する既設鋼桁への影響を検討した。建設時は死荷重合成桁であるが、取替え時には桁下の条件によって仮設ベント支柱が設けられないため、試設計における想定は、床版荷重を鋼桁で受けた後に橋面工及び活荷重を負担する活荷重合成桁とした。この合成桁としての抵抗断面の変更と床版質量及び活荷重の変更を踏まえ、鋼桁下フランジの鋼あて板補強を想定し、必要補強量を算出した。図-9 に G1 桁（外側の主桁）の補強範囲を示す。

主桁断面構成ごとの抵抗曲げモーメントを算出し、死荷重と活荷重による作用曲げモーメントを比較した。主桁抵抗曲げモーメントに対し作用曲げモーメントが超過している範囲は補強が必要であることを示す。支間中央の下フランジの鋼あて板の板厚は、UFC 床版で 19mm, PC 床版で 28mm であった。

よって、死荷重のうち床版重量が軽量化できることによる差と考えられ、UFC 床版を用いることで上部構造への影響を小さくすることができるというメリットが具体的に確認できた。

6. おわりに

本稿では、UFC 床版の開発背景として高速道路の大規模修繕における床版取替えの概要と、UFC 床版の開発経緯、構造概要、解析および実験による性能確認、さらに床版取替えへの適用について述べた。

平板型 UFC 床版は研究・技術開発によって実用化段階に到達しており、UFC 床版を大規模修繕事業において既設 RC 床版の取替え後の新設床版に

使用することで、構造物の長寿命化、お客様の安全・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「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頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路(株)：阪神高速グループビジョン 2030, <http://www.hanshin-exp.co.jp/company/kigyou/vision>, 2016.4
- 2) 土木学会：纖維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書、コンクリート技術シリーズ 106, 2015.8
- 3) 土木学会：超高強度纖維補強コンクリートの設計・施工指針（案）、2004.9
- 4) 土木学会：超高強度纖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) 土木学会：超高強度纖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, 2015.7
- 6) 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 斎藤公生：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
- 7) 一宮利通, 斎藤公生, 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, 2013.10
- 8) 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇, 樽谷早智子：薄肉 UFC プレテンション部材の構造性能に関する検討, 第 23 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, 2014.10
- 9) 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, 2015.5
- 10) 樽谷早智子, 一宮利通, 斎藤公生, 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, 2014/9
- 11) 小坂 崇, 佐藤彰紀, 一宮利通, 藤代 勝：UFC 道路橋床版の開発と大規模更新への適用性検討, コンクリート工学, Vol.54, No.1, 2016.1

(2016 年 7 月 18 日受付)