

報告

UFC 床版の構造計画における設計手法に関する検討

小坂 崇*, 河野晴彦**, 渡邊裕規***

*博(工), 阪神高速道路株式会社, 技術部 (〒530-0005 大阪市北区中之島 3-2-4)

** 修(工), 阪神高速道路株式会社, 建設事業本部神戸建設部 (〒650-0023 神戸市中央区栄町通 1-2-10)

*** 株式会社総合技術コンサルタント, 大阪支社 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 3-5-9)

近年, 超高強度繊維補強コンクリートを用いた UFC 床版が開発され, 都市高速における新設橋や床版取替え時の新設床版として適用されている. UFC 床版は, 鋼部材によって 4 辺支持され, 複雑な形状であることから, 全橋をモデル化した FEM 解析によって応答値を算出し設計することとしている. 一方, 構造計画における構造詳細の検討においては, 断面寸法や PC 鋼材本数を変数として多くのケース数を検討する必要があるため, FEM 解析ではない簡易的な設計手法が求められていた. 本文では, 構造計画に資する簡易的な設計手法を提案するとともに, 構造計画における使用性に対する床版の変位, 変形に対する照査方針を示した.

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, UFC 床版, 構造計画, 設計手法

1. はじめに

近年, 従来のコンクリートよりも高い強度および耐久性を有する超高強度繊維補強コンクリート¹⁾(以下, UFC)が, 国内外の橋梁等の構造物に適用されている²⁾⁴⁾. 道路橋床版についても種々の UFC を適用した床版が開発されている⁶⁾⁸⁾. 著者らは Aft 系 UFC を用いた軽量かつ耐久性の高い UFC 床版を開発しており, 2010 年より解析や実験によって性能検証をおこなってきた⁹⁾. 2018 年に平板型 UFC 床版を床版取替えに適用した. その後, 2019 年に阪神高速・信濃橋入路において写真-1 に示すワッフル型 UFC 床版を新設橋に適用した¹⁰⁾.

本文では, UFC 床版の構造計画における構造詳細の検討に用いる設計手法の提案および変位, 変形に対する照査方針の検討について報告する.

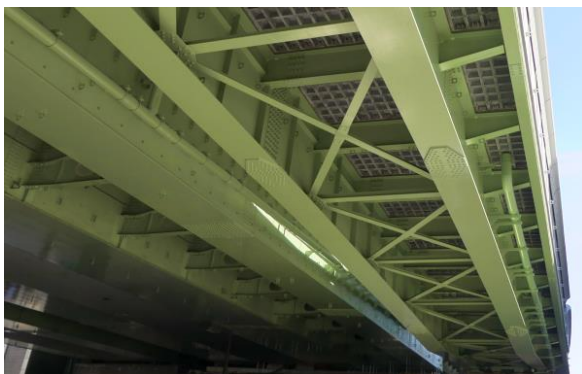


写真-1 ワッフル型 UFC 床版 (信濃橋入路)

2. ワッフル型 UFC 床版の性能照査型設計法

2.1 構造概要

ワッフル型 UFC 床版を図-1 に示す. 部材厚の薄いスラブ部は 40mm でリブと合わせた床版厚は 130~160mm 程度である. リブにはプレテンション PC 鋼材を 2 方向に配置している. 床版同士は, 鋼横リブ上で PC 鋼棒によって端部のリブ同士を接合する PC 構造である.

UFC 床版を有する鋼合成桁を図-2 に示す. 床版は鋼主桁および鋼横リブ (または鋼横桁) に 4 辺支持される構造である. 鋼横リブの間隔は 2.5m であり, 橋軸方向の床版支間長 2.5m が直角方向の支間長に比べ短支間となるため, 主たる曲げに対する床版支間は橋軸方向である.

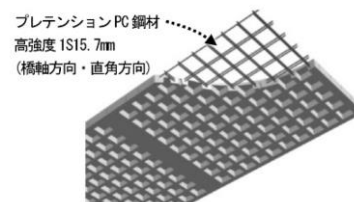


図-1 ワッフル型 UFC 床版

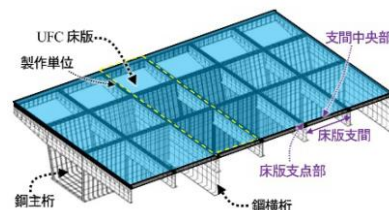


図-2 UFC 床版を有する鋼合成桁

2.2 性能照査型設計法

既往研究においてワッフル型 UFC 床版の性能照査型設計法を提案している¹¹⁾。性能照査型設計法は、「構造物に必要なとされる性能のみ規定し、その性能を実現するプロセス、手法は原則的に自由にした設計体系」と定義される¹²⁾。UFC 床版の性能照査型設計を図-3に示す。構造計画における構造詳細の設定において、仮定する床版構造について、使用性や安全性を照査することとしている。

2.3 構造計画における課題

(1) 構造詳細の設定に関する課題

構造計画における構造詳細の設定後に実施する性能照査において、応力度の照査は、床版および鋼桁を含む構造をモデル化した FEM 解析によって応力度を算出することとしている¹³⁾。

従来の床版の設計では、道路橋示方書（以下、道示）¹⁴⁾に規定される床版支間長を変数とした「床版の設計曲げモーメント」を用いて設計される。ただし、この設計曲げモーメントは、床版支間と橋軸方向の辺長比が 1:2 以上の 1 方向版を対象としている。一方、UFC 床版は 2.1 節で述べたように鋼部材で 4 辺支持されるため、辺長比によっては 2 方向版の挙動に近くなり、道示の設計曲げモーメント式から乖離する可能性があるため、鋼部材を含む FEM 解析によって応力度を算出している。

UFC 床版の構造詳細の設定においては、床版の断面形状（スラブやリブの部材厚、床版厚など）や、床版内に配置する PC 鋼材の種別や本数、配置などを検討する必要がある。これらの検討は、それぞれの諸元を変数とするパラメトリックな検討が必要となる。よって、この検討を FEM 解析によって実施する場合に、断面形状や PC 鋼材の設定を都度解析モデルに反映することが煩雑であり、簡易な検討手法を確立することが実務上の課題であった。

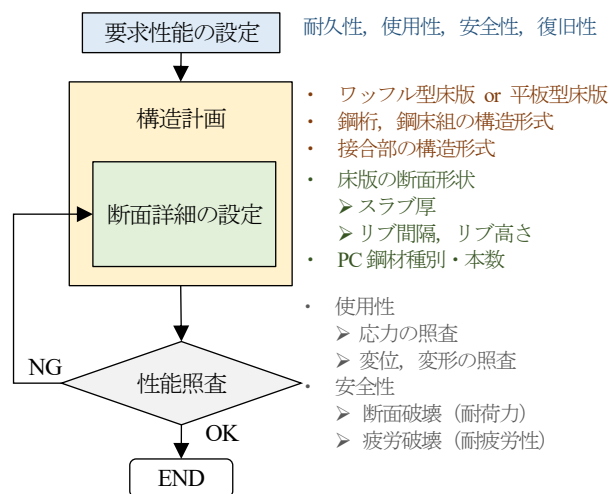


図-3 ワッフル型 UFC 床版の設計の流れ

(2) 構造計画における使用性照査に関する課題

UFC 床版の使用性の照査として、応力と変位を指標とした照査を行っている。応力の制限値は、土木学会の UFC 指針¹⁾に準拠し、圧縮応力は、永続作用に対するクリープ係数を担保する観点から強度の特性値 f_{ck} の 60% ($f_{ck}=180\text{N/mm}^2$ の場合、制限値は 108N/mm^2) としている。引張応力は、使用状態においてひび割れを許容しない観点から、ひび割れ発生強度の特性値 f_{rk} ($f_{ck}=180\text{N/mm}^2$ の場合、 8.0N/mm^2) 以下となるよう設計している。

一方、変位については、UFC を用いた構造物は材料強度が高いことから、部材厚が薄くなるため、従来のコンクリート構造物に比べて大きくなる傾向がある。しかし、道示ではコンクリート系床版は、変位、変形に対する照査は規定されていない。よって、構造計画における変位、変形に関する UFC 床版の使用性の照査方針を検討する必要があった。

3. 構造詳細の設定に用いる設計曲げモーメントの検討

3.1 検討概要

構造計画における構造詳細の設定において、簡易な手法によって検討することを目的として、辺長比に応じた設計曲げモーメントを検討することとした。

ワッフル型 UFC 床版の辺長比と床版の支持条件を変数とした FEM 解析を実施し、道示の設計曲げモーメントと比較することによって、同等の曲げモーメントとなる係数を算出することとした。

3.2 解析条件

FEM 解析については 2 辺支持と 4 辺支持について実施した。4 辺支持の解析モデルにおける床版の支持条件を表-1に示す。床版の形状は、モデル A~C それぞれにおいて、橋軸方向（鋼横リブ間隔）を 2.5m（輸送条件から設定）、直角方向（主桁間隔）を 2.5m, 5.0m, 7.5m の 3 ケースとした。辺長比はそれぞれ 1:1, 1:2, 1:3 となる。床版は 5 パネルをモデル化した（橋軸方向に 12.5m）

FEM 解析は NASTRAN を使用した。床版はシェル要素、弾性支持における梁部材は梁要素によってモデル化した。弾性支持における梁部材は主桁間隔 2.5m, 5.0m, 7.5m に応じて、高さ 250~1000mm の I 桁とした。

荷重は道示の T 荷重とし、衝撃係数 $i=20/(50+l)=0.381$ を考慮した 138.1kN を載荷した。また、輪荷重は連続版の端部から中央まで 6.25m を 0.125m 間隔で移動載荷して（51 ケース）その最大値を求めた。

表-1 解析モデルごとの支持条件

	鋼主桁の支持条件	鋼横リブの支持条件
A	単純支持	単純支持
B	単純支持+回転拘束	単純支持
C	単純支持+回転拘束	弾性支持（梁部材）

3.3 解析結果（橋軸方向の曲げモーメント）

橋軸方向の曲げモーメントに対する FEM 解析の結果の一例としてモデル B の橋軸方向曲げモーメント (N/m) を図-4 に示す。表-2 に解析結果の一覧を示す。正負の最大位置を抽出している。表中の比率は、2 辺支持版(無限連続版)による解析結果との比を示している。

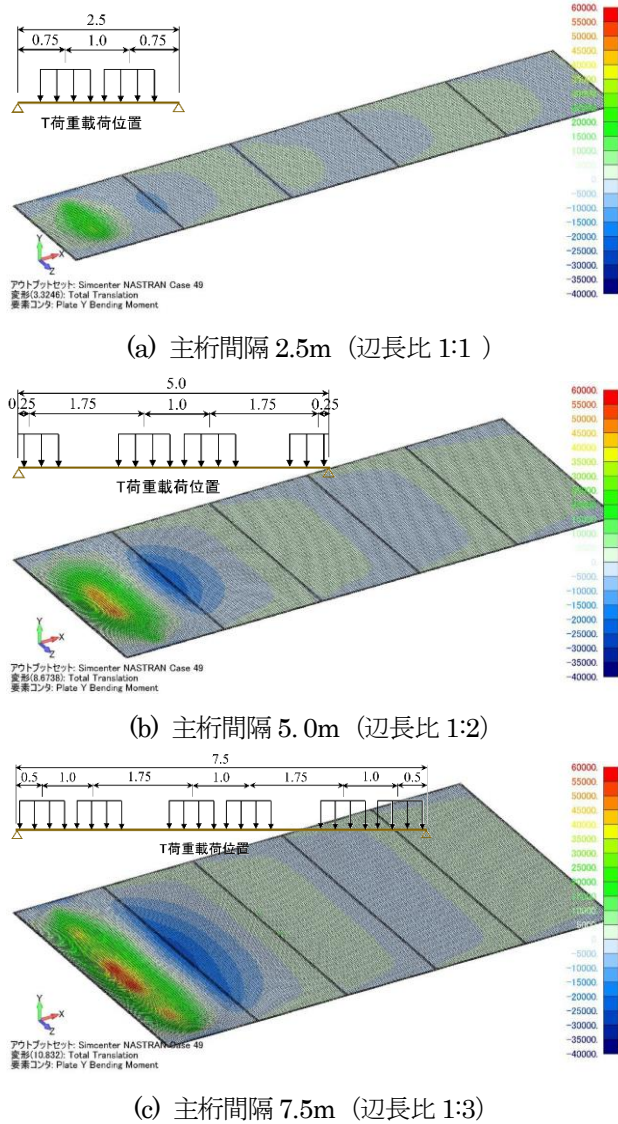


図-4 FEM 解析結果の一例 (モデル B)

表-2 橋軸方向曲げモーメント (単位: kNm/m)

着目位置	2辺支持 解析	4辺支持版(横リブ間隔2.5m)						
		支持条件	2.5m (1:1)		5.0m(1:2)		7.5m(1:3)	
			解析	比率	解析	比率	解析	比率
中間支間	42.5	A	30.2	71%	38.9	92%	41.8	98%
		B	21.6	51%	36.5	86%	41.1	97%
		C	21.4	50%	36.6	86%	41.5	98%
端支間	50.2	A	32.1	64%	44.6	89%	49.2	98%
		B	21.9	44%	41.1	82%	48.1	96%
		C	21.6	43%	40.8	81%	48.1	96%
中間支点	-26.4	A	-21.1	80%	-25.1	95%	-26.3	100%
		B	-15.7	59%	-24.0	91%	-26.0	98%
		C	-13.1	50%	-22.2	84%	-24.3	92%

4 辺支持版の支間および支点曲げモーメントは、主桁間隔が小さい場合には2 辺支持版より小さくなるが、主桁間隔が大きくなるに従って2 辺支持版の値に近づき、主桁間隔 7.5m (辺長比 1:3) ではモデル C の支点部を除けば 4%以下の差である。よって、辺長比 1:3 程度になると 4 辺支持の影響はほとんどなく、2 辺支持の 1 方向版とみなしてよいといえる。

3.4 解析結果（橋軸直角方向の曲げモーメント）

表-3 に橋軸直角方向の曲げモーメントに関する解析結果の一覧を示す。着目位置は、中間支間は床版中央、支点は主桁で支持される位置である。表中の比率は 2 辺支持版による解析結果との比率を示している。支点部についても支間部 (20.1 kN・m/m) との比率を示している。

4 辺支持の橋軸直角方向の曲げモーメントは、2 辺支持より大きくなる傾向にある。主桁間隔との一定の傾向は確認できないが、辺長比 1:3 になると支間部については差が 4%程度となり橋軸方向と同様に 4 辺支持の影響が小さくなるといえる。一方、主桁支点部には支間部の 2 倍から 3 倍の曲げモーメントが作用している。

3.5 設計曲げモーメントの提案

FEM 解析による 2 辺支持と 4 辺支持の解析結果に基づき、道示の設計曲げモーメントを補正する形で提案することとした。辺長比 1:3 以上は 2 辺支持と 4 辺支持の比率を安全側に数字を丸めて、表-4 に示すように、道示の設計曲げモーメントに係数を乗じることとした。ここに、L: 床版の支間長 (m), P: T 荷重 (100kN)。

一方、2 方向版の挙動が認められた辺長比 1:3 未満については、表-4 に補正係数を乗じることとした。補正係数の設定については、鋼道路橋設計示方書 (昭和 31 年) ¹⁵⁾における 20 条「2 方向版の曲げモーメント」を参考に式(1)によることとした。ここに、 α : 辺長比 (=長辺長/短辺長), n_1, n_2 : FEM 解析によって算定した補正係数 (表-5)。

$$\frac{\alpha^{n_1}}{1+\alpha^{n_1}} \left(1 + n_2 \frac{1}{\alpha^{n_1}} \right) \quad (1)$$

表-3 橋軸直角方向曲げモーメント (単位: kNm/m)

着目位置	2辺支持 解析	4辺支持版(横リブ間隔2.5m)						
		支持条件	2.5m (1:1)		5.0m(1:2)		7.5m(1:3)	
			解析	比率	解析	比率	解析	比率
中間支間	20.1	A	26.5	132%	22.8	113%	20.4	101%
支点		B	20.7	103%	23.8	118%	21.0	104%
支点	—	B	-43.4	216%	61.8	-307%	-63.7	317%

表-4 設計曲げモーメント (赤字: 道示から変更)

	着目位置	橋軸方向(主鉄筋)	直角方向(配力鉄筋)
単純版(道示)	支間	+(0.22L+0.08) P	+(0.06L+0.06) P
連続版(提案)	支間	中間支間	+(単純版の80%)
		端支間	+(単純版の90%)
	支点部	-(単純版の60%)	-(単純版の350%)

表-5 辺長比が1:3未満の場合の補正係数

着目位置		橋軸方向		直角方向	
		n_1	n_2	n_1	n_2
支間	中間支間	3	0.05	$-0.13\alpha + 1.40$	
	端支間	3	-0.1	$-0.13\alpha + 1.40$	
支点部		3	0.2	4	0.45

4. 床版の変位、変形に関する照査方針の検討

4.1 変位、変形に関する照査方針

道示では床版の変位、変形を直接照査する項目は無いが、コンクリート系床版の最小全厚や鋼床版のデッキ厚や縦リブ支間長によって、変位、変形が間接的に抑制されており、使用性に対する性能が確保されるように配慮されている。

UFC床版については、応力に対する照査のみに着目すると床版厚さ(スラブ厚+リブ高)が120mm程度でも照査を満足する。また、この床版厚に対して輪荷重走行試験を実施し、十分な疲労耐久性を有することを確認している¹⁶⁾。一方、変位、変形に着目すると、製作時のプレストレス導入による上反り変形が大きくなることや、活荷重による変形が同程度の床版支間の鋼床版よりも若干大きくなる傾向があるということを確認した。

よって、UFC床版の変位、変形をどのように照査し、構造詳細を設定していくのかということが課題であった。床版の変位に対して有意な制限値を設定するのは困難であることから、変位、変形が床版の使用性および安全性、舗装の耐久性に与える影響を照査することとした。

4.2 振動に関する照査

床版の変位、変形は振動特性に影響を与え、車両の走行性の点で使用性に影響を与える。よって、照査方針としては、設定する床版が走行性に影響のある振動特性となっていないことを確認することとした。

UFC床版の既往研究において、床版厚123mmのワッフル型UFC床版の振動特性を評価している¹⁷⁾。実物大の供試体を設置し、定点の加振(写真-2)および車両走行による加振(写真-3)によって、固有振動数を確認した。計測した振動スペクトルを図-5に示す。橋軸方向に加速度計を設置して計測した床版中央(X3)の卓越振動数は51.6Hz、橋軸直角方向に加速度計を設置して計測した同位置(Y3)の卓越振動数51.5Hzであった。

土木研究所において大型車が伸縮継ぎ手の段差部を走行した場合に生じる変動荷重および衝撃力についての実験・研究が行われており¹⁸⁾、タンデム式ダンプトラックのバネ下振動数は、中軸で13Hz、後軸で18Hzとなっている。よって、UFC床版は鋼床版と比較して橋軸方向の曲げ剛性が小さいが、計測結果から算出されたUFC床版の固有振動数は、ダンプトラックのバネ下振動数に対して2.9~4.0倍と乖離していることから、車両との共振の可能性は小さいと推測した。

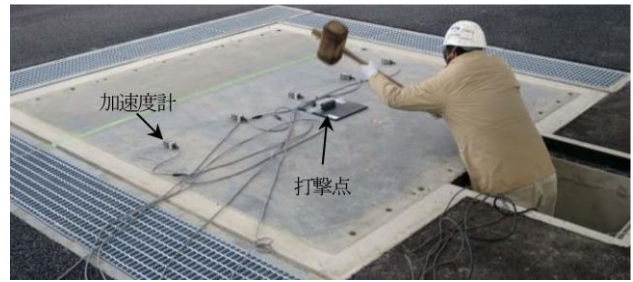


写真-2 定点加振による振動計測



写真-3 車両走行による振動計測

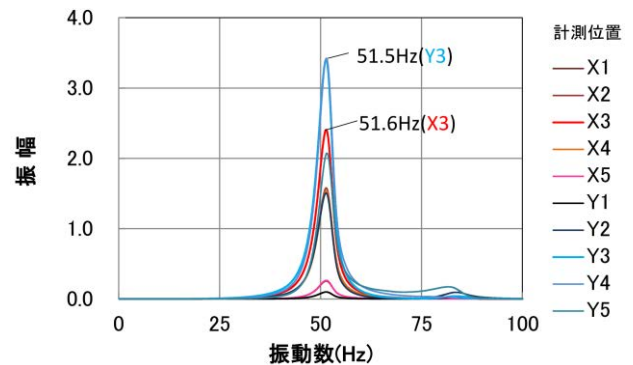


図-5 自由振動による振動数スペクトル

床版の変位、変形に関する振動の照査については、既往の実績よりも変位、変形が大きくなると予測される床版構造とする場合には、解析や振動計測によって固有振動数を算定し、車両のバネ下振動数に対して共振しないことを照査する方針とした。

4.3 二次応力による鋼構造の疲労に関する照査

床版は輪荷重の载荷によりたわみ、鋼主桁の上フランジ上で回転しようと首振り変形が生じる。垂直補剛材が無い部分では、鋼主桁ウェブの面外変形等により、床版のたわみによる回転を逃すが、垂直補剛材がある場合は変形が拘束され、局所的な応力が生じる。

横桁が接合されている場合は、桁自体の回転も拘束され、さらにその影響が大きくなる。これが輪荷重による床版のたわみに伴う二次応力の鋼桁への影響である。

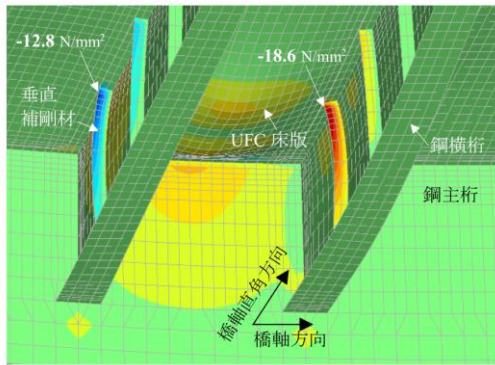


図-6 FEM 解析による二次応力の算出例

鋼道路橋疲労設計便覧¹⁹⁾では、二次応力による疲労損傷事例が挙げられており、このような構造部位の疲労耐久性の確保に十分配慮し、適切な構造詳細を設定することが必要とされている。

UFC 床版は、従来のコンクリート系床版よりも床版厚を小さく設定することが多く、たわみが大きくなる傾向があるため、個々の設計において、鋼部材に生じる応力度を確認するとともに、床版を支持する鋼部材の 2 次応力に対する疲労耐久性に十分に配慮した設計を行うことが必要といえる。

よって、床版の変位、変形に伴う二次応力による鋼構造の疲労に関する照査は、床版と鋼桁をモデル化した FEM 解析等によって鋼部材に生じる二次応力を算出し、疲労の照査または疲労に配慮した構造とすることとした。床版と鋼桁をモデル化した FEM 解析による二次応力の算出例を図-6 に示す。

4.4 舗装の耐久性に関する照査

道示では、鋼床版のデッキプレート厚を、輪荷重によって舗装に悪影響を及ぼさないたわみ値となるように最小板厚を規定している。また、車道部分に主桁や縦桁が配置される場合には、ウェブ直上の橋軸方向の舗装のひび割れの抑制に配慮するために、縦リブ間隔と支間長および剛性を規定している。また、デッキプレートの曲率半径を 20m 以上とするのが望ましいとされている。

既往研究において、UFC 床版の変位、変形が舗装へ与える影響を検討するために、舗装を線形粘弾性要素とした FEM 解析を実施し、床版形式ごとに、舗装に生じるひずみを比較している²⁰⁾。解析は DIANA を使用した。UFC 床版、鋼床版、RC 床版のひずみを比較した。UFC 床版の解析モデルを図-7 に示す。

図-8 に輪荷重が床版中央を通過するステップの変形図を示す。UFC 床版は版全体がたわむような変形を示している。一方、鋼床版モデルは輪荷重周辺の局所的な変形が卓越しており、RC 床版モデルは全体的に変形が小さい。これらの変形特性の違いが、舗装のひずみ応答特性に及ぼす影響を比較するために、それぞれの床版におけるひずみの時刻歴応答の例を図-9 に示す。

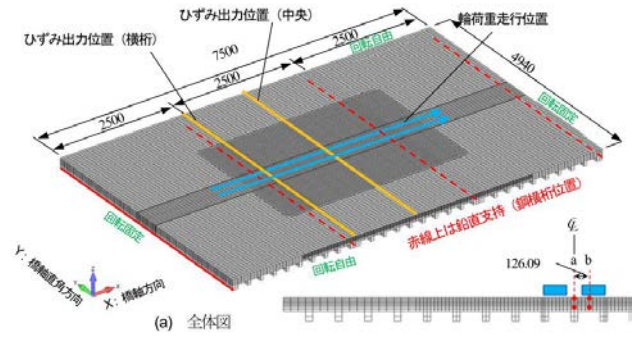


図-7 解析モデル (UFC 床版)

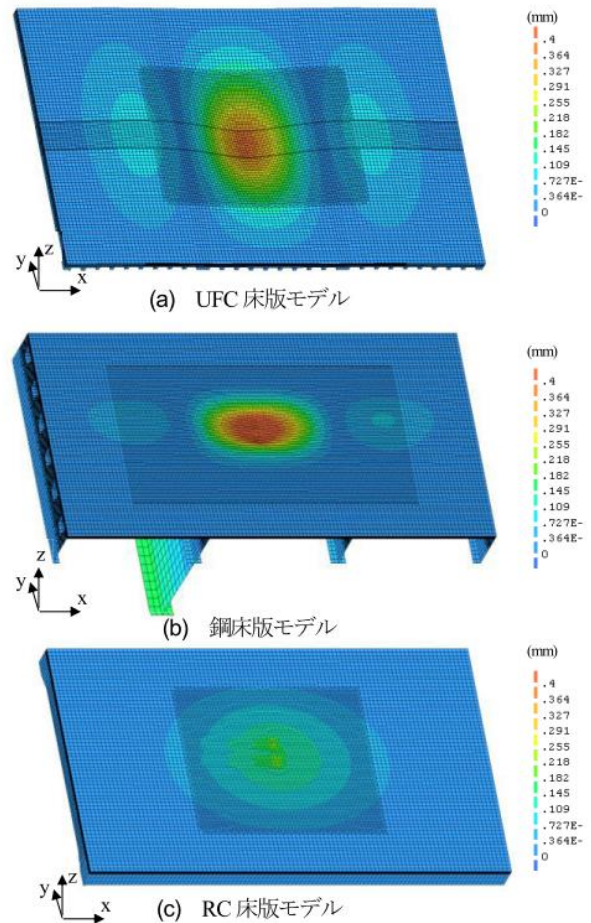


図-8 床版形式ごとの変形図 (倍率 300 倍)

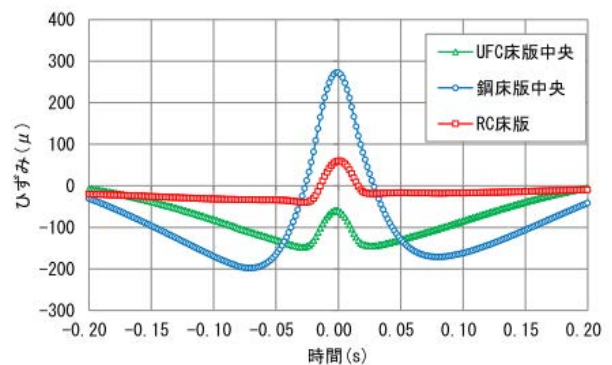


図-9 舗装表面の橋軸方向ひずみ (タイヤ間)

解析の結果、UFC床版モデルの舗装のひずみの応答形状は、RC床版モデルに近く、鋼床版モデルに比べると穏やかなひずみ応答を示した。これは、UFC床版モデルでは版全体の曲げ変形が支配的となり、鋼床版モデルに比べて局所的な変形の影響が小さいためと推測された。このひずみ応答によって直接的に舗装の耐久性を定量的に照査することは難しいが、定性的には問題が生じることはないかと推測した。

よって、UFC床版の変位、変形に関する舗装の耐久性の照査については、既往の実績よりも変位、変形が大きくなると予測される床版構造とする場合には、粘弾性解析によって舗装の応答を算定し、同じ舗装構成を採用する従来形式の床版と比較し、舗装のひずみや応答形状に大きな差が無いことを照査する方針とした。

5. おわりに

本検討では、ワッフル型UFC床版の構造計画における構造詳細の検討に用いる設計手法について検討し、設計曲げモーメントの提案、変位、変形に対する照査方針を示した。本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) UFC床版の構造計画における構造詳細の検討に用いる設計曲げモーメントとして、道示の規定に対する補正係数を明らかにした。
- (2) 変位、変形に対する使用性の照査は、振動、二次応力に対する鋼構造の疲労および舗装の耐久性に関する照査を行うこととして、それぞれの照査方針を明らかにした。

構造計画における設計手法および照査方針を示したが、性能照査型設計法によって高精度かつ合理的に設計するために、今後も性能照査手法の検討を実施していく必要があるといえる。

謝辞

本検討の実施や考察において、長岡技術科学大学 長井正嗣名誉教授、神戸大学 三木朋広准教授にご指導を頂きました。ここに深く感謝いたします。

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)、コンクリートライブラリー、113、2004.9.
- 2) 武者浩透、大竹明朝、関文夫、大熊光、児玉明彦、小林忠司：無機系複合材料(RPC)を用いた酒田みらい橋の設計と施工、橋梁と基礎、Vol. 36, No. 11, 2002.
- 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～超高強度繊維補強コンクリートおよび制震橋脚構造を用いた歩道橋～、橋梁と基礎、Vol. 41, No. 12, 2007.
- 4) Benjamin A. Graybeal, Eugen Brühwiler, Byung-Suk Kim, François Toutlemonde, Yen Lei Voo, Arash Zoghi,

International Perspective on UHPC in Bridge Engineering, ASCE Journal of Bridge Engineering Volume 25 Issue 11, 2020

- 5) 藤代 勝, 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇: 超高強度繊維補強コンクリートを用いたワッフル型 UFC 床版の開発, 道路橋床版シンポジウム論文報告集, Vol. 9, 181-186, 2016.10.
- 6) 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝: 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, 道路橋床版シンポジウム論文報告集, Vol. 9, 2016.10.
- 7) 北村 建, 岩崎郁夫, 趙唯堅, 岸田政彦, 石原陽介, 岩城一郎: 道路橋 UFC プレキャスト床版の耐荷性および耐疲労性に関する検証, 構造工学論文集, Vol. 63A, 2017.
- 8) 横山貴士, 宇山友理, 笠原 怜, 大賀 猛, 古賀裕史, 大場誠道: UFC 複合床版による床版取替え工事の設計・施工, 橋梁と基礎, Vol. 55, No. 12, 2021.
- 9) 土木学会技術推進機構: 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, 技術推進ライブラリー17, 2015.7.
- 10) 小坂 崇, 福岡純一, 杉山貴教, 藤原理絵, 一宮利通, 齋藤公生: 都市高速道路の UFC 床版による長寿命化, 橋梁と基礎, Vol. 54, No.8, 2020.
- 11) 小坂 崇: ワッフル型 UFC 床版の性能照査型設計法の提案, 神戸大学博士論文, 2021.3.
- 12) 二羽淳一郎: 構造性能—土木構造物—, コンクリート工学, Vol. 39, No. 1, 2001.
- 13) 阪神高速道路株式会社: UFC 床版の設計・施工・維持管理の手引き(案), 2017.6.
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書(Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編)・同解説, 2017.11.
- 15) 日本道路協会: 鋼道路橋設計示方書, 1956.5.
- 16) 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝, 三木朋広: ワッフル型 UFC 床版の輪荷重載荷による静的特性および耐疲労性, 土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 3, 491-503, 2018.12.
- 17) 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝, 三木朋広: ワッフル型 UFC 床版の構造設計および使用性検討, 土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 3, 473-490, 2018.12.
- 18) 建設省土木研究所構造研究室: 橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書, 土木研究所資料, No. 2508, 1987.
- 19) 日本道路協会: 鋼道路橋疲労設計便覧, 2020.9.
- 20) 戸田圭彦, 小坂 崇, 一宮利通, 鎌田 修: 線形粘弾性解析による UFC 道路橋床版上のアスファルト舗装の変形特性に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 73, No.3 (舗装工学論文集第22巻), I_9-I_17, 2017.

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)