

## 報告

## UFC 床版とアスファルト舗装との付着特性を考慮した 解析的評価に関する検討

横田慎也\*, 田口翔大\*\*, 戸田圭彦\*\*\*, 田中克弘\*\*\*\*, 一宮利通\*\*\*\*\*, 小坂崇\*\*\*\*\*

\*博 (工), 鹿島道路株式会社技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

\*\* 鹿島道路株式会社技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

\*\*\*修 (工), JIP テクノサイエンス株式会社システム技術研究所 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 2-12-11)

\*\*\*\*博 (工), JIP テクノサイエンス株式会社システム技術研究所 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 2-12-11)

\*\*\*\*\*修 (工), 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)

\*\*\*\*\*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)

UFC 床版は薄肉構造のため活荷重によるたわみが従来の RC 床版や PC 床版より大きい特徴を有している。本研究では、UFC 床版上の舗装の要求性能を立案するにあたり、舗装に発生し得るひずみの特性を解析的に把握し、それを従来型床版と比較検討を行った。その結果、本研究の範囲においては、UFC 床版上舗装のひずみは PC 床版とほぼ同等であることを明らかにした。また、基層に改良グースを用いることにより舗装のひずみをさらに抑制できる可能性を示した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，UFC 床版，アスファルト舗装，線形粘弾性解析

### 1. はじめに

限られた公共投資余力や環境負荷低減の観点などから、建設インフラの長寿命化が叫ばれて久しい。橋梁床版についても例外ではなく、高度経済成長期に建設された多くの橋梁が供用 50 年以上経過し、大規模な更新時期を迎えようとしている近年、長寿命化に寄与する様々な材料、工法が開発されている。このような背景の中、軽量かつ耐久性の高い超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下 UFC) を用いた道路橋床版の適用に向けた検討が行われている<sup>1)</sup>。UFC は、圧縮強度が  $150\text{N/mm}^2$  以上と一般的なコンクリートの 4-5 倍程度と大きいことに加え、UFC に含まれる鋼繊維により高いじん性を有することから、部材の薄肉化と軽量化が可能である。図-1 に UFC 床版の一例として、ワッフル型床版<sup>2)</sup>を示す。ワッフル型 UFC 床版は、PC 床版等に比べ薄くて軽い構造とすることができるため、床版取り替え工事の際に橋脚および基礎の補強が不要であるといった利点がある。一方で、薄肉構造のため活荷重によるたわみが従来の RC 床版や PC 床版より大きい特徴を有している。このため、筆者らは、UFC 床版、鋼床版、および RC 床版の輪荷重走行による線形粘弾性解析を行い舗装に及ぼす影響について検討を実施した。その結果、

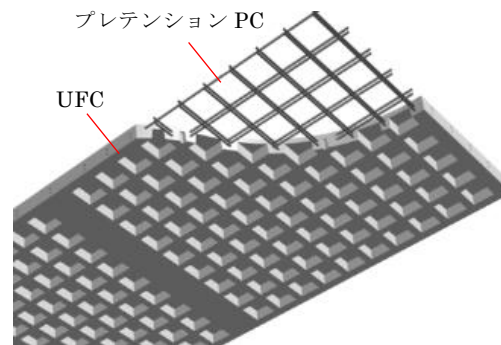


図-1 ワッフル型 UFC 床版

ある一定の設計条件の下で、UFC 床版上舗装の挙動は RC 床版に比較的近いことを明らかにした<sup>3)</sup>。ただし、あくまでも限られた条件に基づいた結果であり、床版の形状や境界条件、舗装の温度など各種条件の違いが舗装挙動に与える影響については十分に明らかになっているとは言えない。

本研究では、UFC 床版上の舗装の要求性能を立案することを目的に、特に UFC 床版とアスファルト (以下、As) 舗装との付着特性に着目するため、UFC と As 混合物との複合供試体による曲げ試験から As 舗装の挙動を明らかにし、さらにその室内試験結果を FEM でモデル化した線形粘弾性解析を実施することで、UFC と As 舗装との付着特性を同定した。そして、得られた付着特性から

UFC 床版をモデル化した線形粘弾性解析を実施し、付着特性の違いが舗装に発生するひずみ特性の違いを解析的に把握した。また、それらを従来型の鋼床版や PC 床版と比較検討を行った。最後に、UFC 床版上舗装に用いる材料の違いがひずみ特性に与える影響を把握するため、コンクリート床版上に適用可能な新たなグース As 混合物（以下、改良グース）<sup>4)</sup>を用いた場合のひずみ抑制効果に関する検討を実施した。

## 2. 複合構造の曲げ試験による舗装挙動の検討

線形粘弾性解析を実施するためには、UFC や As 混合物の材料定数に加え、UFC と As 舗装との付着条件（バネ定数）が極めて重要となる。しかし、これまで UFC と As 混合物とのバネ定数を実験的に求めた研究はなく、本研究では UFC と As 混合物の複合供試体を用いた曲げ試験から線形粘弾性解析に用いるバネ定数を同定することとした。

### 2.1 試験用供試体

試験用供試体は、予め作製した UFC 平板（幅 100mm × 長さ 400mm × 厚さ 40mm）上に、表-1 に示す付着材を塗布し、As 混合物を厚さ 35mm で舗装し作製した。舗装構成は、As 混合物は基層用混合物を想定し、ポリマー改質 As II 型を用いた密粒度 As 混合物(13)（以下、改質密粒）を適用した 3 水準と、グース As 混合物（以下、グース）を適用した 2 水準とした。このうち、No.1 および No.2 は既存のコンクリート床版上舗装に適用実績がある舗装構成であり、No.3 は、UFC 床版そのものが高い水密性を有していることから防水層を省略した舗装構成、No.4 はコンクリート床版上に適用実績のある改良グースを、No.5 は鋼床版上舗装に適用実績の多い硬質 As を使用したグース（以下、通常グース）を基層に適用した計 5 種類の舗装構成とした。

### 2.2 複合供試体の曲げ試験方法

試験は図-2 に示すように、供試体を 3 点曲げ载荷した際の各箇所のひずみをひずみゲージ（ゲージ長 30mm）で測定することで、各構成の舗装挙動を確認した。試験条件を表-2 に示す。供試体への载荷は、図-3 に示すように载荷時間を表-2 に示す 3 水準、休止時間を 6 秒としたハーバーサイン波を 10 サイクル载荷し、得られたひずみ挙動にばらつきがないことを確認した上で 10 サイクル目の結果を採用した。試験温度は 20℃ および 40℃ とし、設定応力は既往の知見<sup>9)</sup>をもとに、供試体が破損しない線形粘弾性領域内となるよう設定した。

### 2.3 複合供試体の曲げ試験結果

载荷時に発生した As 混合物下部ひずみ、UFC 上部ひずみ、および UFC 底面ひずみのピーク値を整理した結果

表-1 舗装構成

No.	As 混合物	付着材
1	改質密粒	As 系塗膜防水
2	改質密粒	シート系防水
3	改質密粒	As 系プライマー
4	改良グース	As 系プライマー
5	通常グース	As 系プライマー

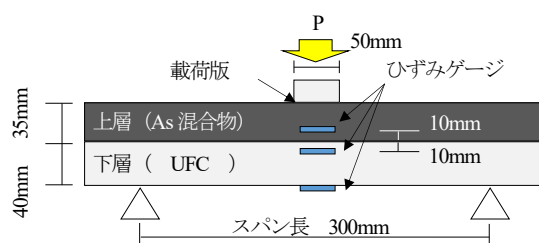


図-2 試験概要図

表-2 試験条件

载荷時間 (秒)	サイクル数 (回)	試験温度 (°C)	設定応力 (MPa)
0.1, 0.05, 0.025	10	20	0.54
		40	0.27

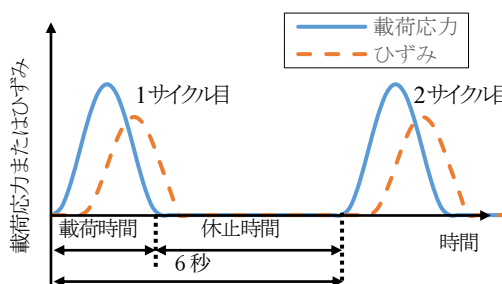
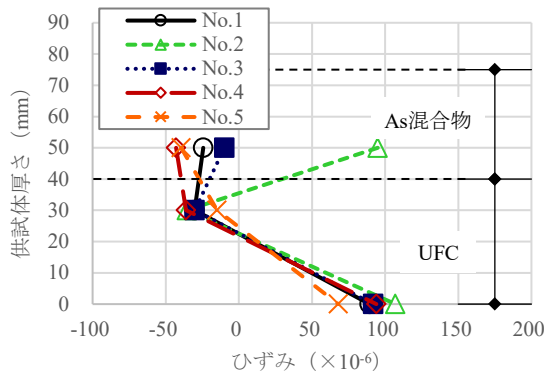
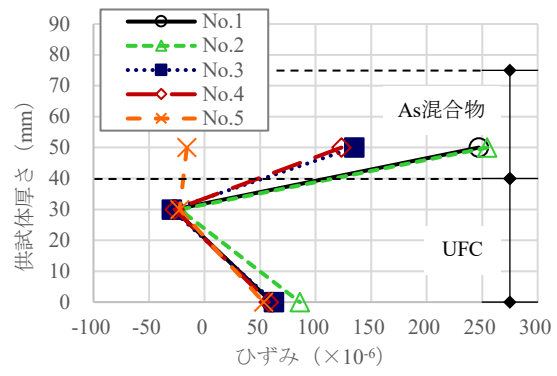


図-3 载荷応力の設定条件

を図-4 に示す。図-4 は、载荷時間 0.1 秒の結果である。縦軸は供試体下面からの距離（0mm が UFC 底面、30mm が UFC 上部、50mm が As 下部）、横軸はひずみのピーク値を示している。20℃では、シート系防水を使用した供試体（No.2）のみ、As 下部に引張りひずみが発生していることが確認された。40℃では、通常グース（No.5）以外の供試体構成で As 下部に引張りひずみが発生していた。これは、20℃と比較し、40℃では As 混合物の剛性が低下し、すべりが発生しやすくなったためと考えられる。大きな引張りひずみを確認された No.1 では、As 混合物と As 系塗膜防水材の双方の剛性の低下により、シート系防水（No.2）と同程度の引張りひずみが発生したものと推察される。一方、As 下部に圧縮が発生していた通常グース（No.5）は、硬質 As を使用している混合物であり、40℃においても比較的高い剛性を有しているためと考えられる。当該試験より、舗装構成や舗装体温度によって、付着特性が異なることを確認した。なお、本研究の範囲においては、载荷時間 0.05 秒、0.025 秒の結果も 0.1 秒と同様の結果が得られており、载荷時間によるひずみ挙動に大きな差異は認められなかった。



【試験温度：20°C】



【試験温度：40°C】

図4 複合供試体曲げ試験結果 (载荷時間：0.1 秒)

### 2.4 境界面のバネ定数の同定

各舗装構成における界面のバネ定数は、複合供試体の曲げ試験を FEM でモデル化した線形粘弾性解析を実施し、室内試験結果と解析とのひずみが合うように同定した。複合供試体の曲げ試験モデルを図-5 に示す。モデルは 1/4 対称モデルとした。As 混合物、UFC、および载荷版は 8 節点ソリッド要素で作成し、As 混合物-UFC 間ならびに载荷版-As 混合物間は 8 節点インターフェース要素を介して結合した。境界条件は図-6 に示す通り、支点上の節点を鉛直支持し、対称面上には対称条件を与えた。荷重は、载荷版表面に等分布荷重を与えた。粘弾性解析には DIANA10.4 (DIANA FEA 製) <sup>6)</sup> を用いた。As 混合物は、図-7 に示す Burger's モデル粘弾性体とし、各粘弾性定数は一軸圧縮試験法 <sup>5)</sup> で求めた。As 混合物の粘弾性定数を表-3 に示す。表中には表層に適用する改質 AsH 型を使用したポーラスアスファルト混合物 (以下、ポーラス) も併記しているが、複合構造の曲げ試験は基層用混合物を対象として実験を行っていることから、解析においても基層用混合物として適用可能な改質密粒、改良グース、通常グースの粘弾性定数を用いた。ポアソン比は 0.4 とした。UFC は弾性体とし、弾性係数は 45,100N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比は 0.2 とした。同定した界面のバネ定数を表-4 に示す。舗装構成や温度によってバネ定数に違いが認められた。さらに、図-8 に室内試験結果と、同定したバネ定数を用いて解析した舗装挙動とを比較した一例として、供試体 No.1 における試験温度 20°C、载荷時間 0.1 秒の結果を示す。舗装構成や温度によって多少の違いは認められるものの、得られたバネ定数を用いることで、室内試験で得られた舗装の挙動を概ね再現できることを確認した。

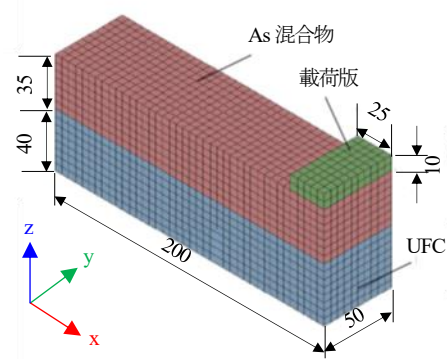


図-5 粘弾性解析モデル (1/4 モデル)

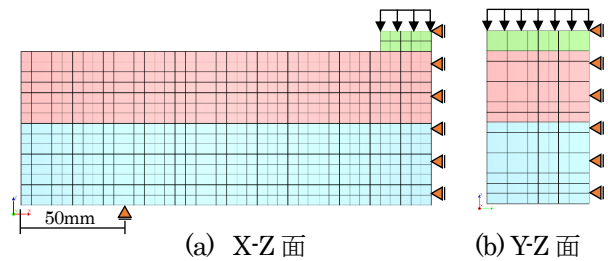


図-6 境界条件

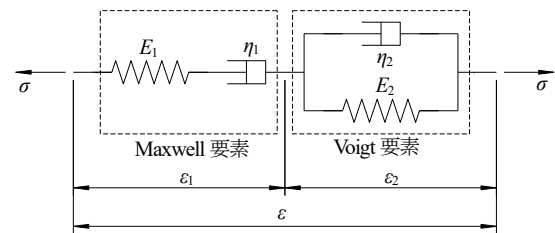


図-7 Burger's モデル粘弾性体の力学模型

表-3 As 混合物の粘弾性定数

定数	ポーラス		改質密粒		改良グース		通常グース	
	20°C	40°C	20°C	40°C	20°C	40°C	20°C	40°C
$\eta_1$ (N/mm <sup>2</sup> ・s)	70,510	14,502	65,239	15,751	54,776	25,104	119,724	9,349
$\eta_2$ (N/mm <sup>2</sup> ・s)	306	35	816	50	606	92	6,660	413
$E_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	2,544	1,224	8,422	1,129	6,838	1,395	13,131	2,975
$E_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	584	320	1,026	272	820	185	5,196	501

### 3. UFC 床版上 As 舗装の線形粘弾性解析

複合供試体の曲げ試験結果を用いて同定した UFC と As 混合物との境界のバネ定数を用いて、実際の橋梁を参考にモデル化した UFC 床版、鋼床版、PC 床版を対象と

表-4 同定した界面のバネ定数

No.	As混合物	付着材	バネ定数 (N/mm <sup>3</sup> )	
			20°C	40°C
1	改良密粒	As系塗膜防水	50	0.1
2	改良密粒	シート系防水	0.1	0.1
3	改良密粒	As系プライマー	30	2
4	改良グース	As系プライマー	100	1
5	通常グース	As系プライマー	1000	50

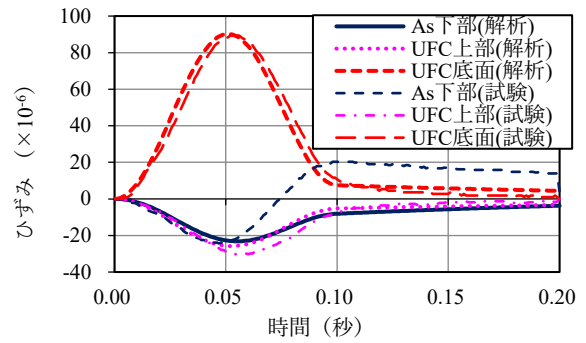


図-8 室内試験と粘弾性解析との比較  
(No.1, 20°C, 0.1秒载荷)

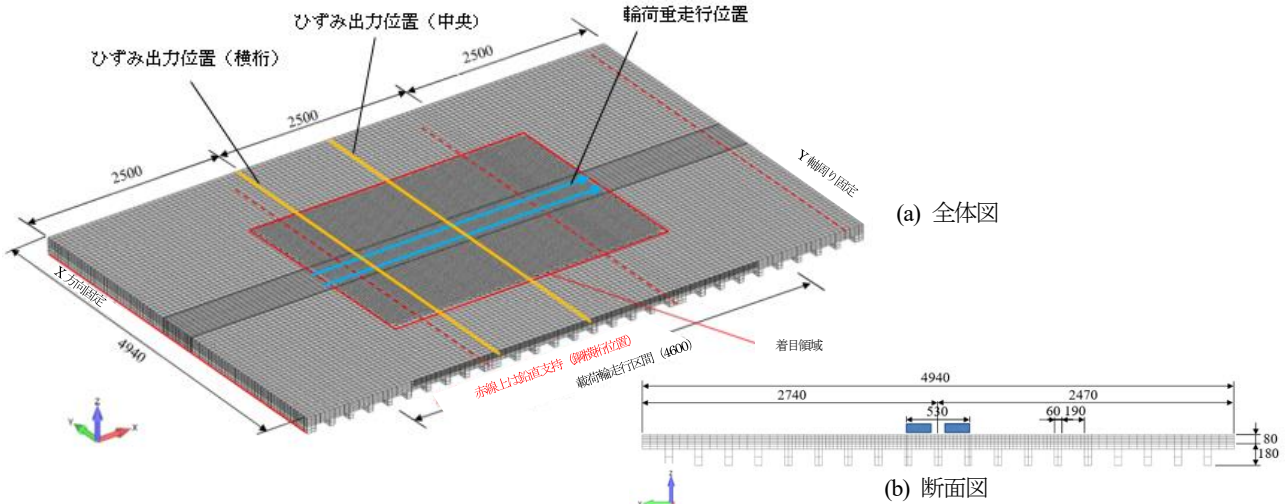


図-9 UFC床版モデル

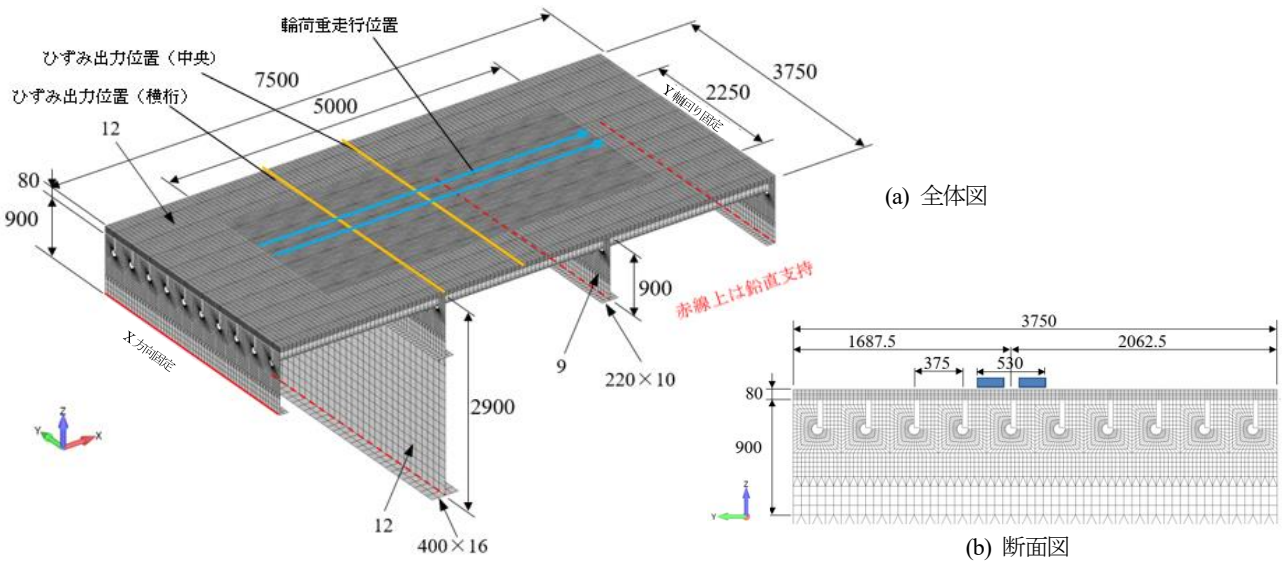


図-10 鋼床版モデル

した輪荷重走行による線形粘弾性解析を実施した。

### 3.1 解析方法

本研究では、既往の検討である文献2)と同様に3種類の床版形式(UFC床版, 鋼床版, PC床版)を対象とした。ただし、本検討ではUFC床版高さを180mmとした。また、鋼床版はバルブリップに、RC床版ではなくPC床版を比較対象としている。

### 3.2 解析モデル

各床版の主桁間中央載荷モデルの解析モデルを図-9~図-11にそれぞれ示す。また、表-5に各種床版形式の形状を示す。舗装は舗装厚80mmとし、表層を40mm、基層を40mmとした。舗装と床版表面の間は、並進3方向のばね要素で結合した。

各床版の材料は線形弾性とし、それぞれUFCの弾性係

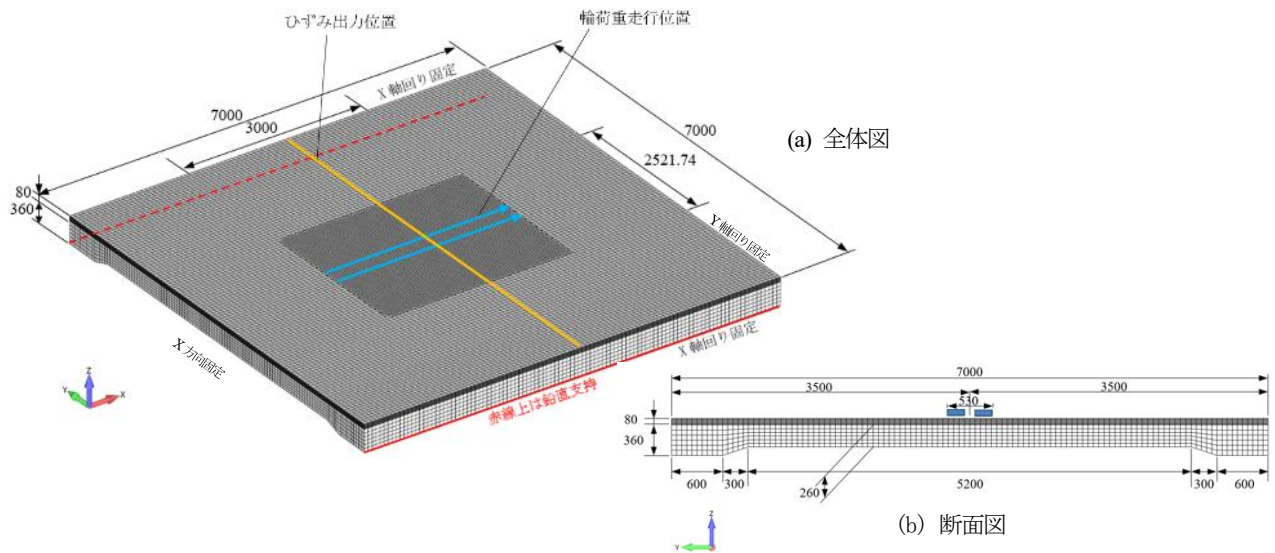


図-11 PC床版モデル

表-5 各種床版形式の形状

床版形式	UFC 床版	鋼床版	PC 床版
長さ	7.5m	7.5m	7.5m
幅	4.94m	3.75m(リブ 10 本分)	7.0m
床版支間 方向・長さ	橋軸方向	橋軸方向	橋軸直角方向
	2.5m(横リブ間隔)	2.5m(横リブ間隔)	5.8m
床版厚	ワッフル型 40mm	12mm	260mm
備考	床版高さ 180mm	バルブリブ 230×11mm	

表-6 解析ケース

No.	床版形式	As 混合物		付着材	界面のバネ定数(N/mm <sup>3</sup> )	
		表層	基層		20℃	40℃
1	UFC 床版	ポーラス	改質密粒	As 系塗膜防水	50	0.1
2	鋼床版	ポーラス	通常グース	As 系プライマ	剛結	剛結
3	PC 床版	ポーラス	改質密粒	As 系塗膜防水	50	0.1
4	UFC 床版	ポーラス	改良グース	As 系プライマ	100	1

数を 46,000N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比を 0.2、鋼板の弾性係数を 200,000N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比を 0.3、コンクリートの弾性係数を 31,000N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比を 0.2 とした。舗装の材料は粘弾性体とし、表層用混合物、基層用混合物の材料定数はそれぞれ表-3 に示す値を用いた。輪荷重は 25ton トラックを想定し、後輪 2 軸のうち片側 1 軸のダブルタイヤ相当分を載荷した<sup>2)</sup>。解析ケースは表-6 に示す 4 水準とし、各床版と As 舗装との界面のバネ定数は、UFC は表-4 に示す値を、鋼床版では剛結、PC 床版は UFC と同じセメント系材料であることから、本研究では UFC と同様の値、すなわち表-4 に示す値を用いることとした。

### 3.3 解析結果

#### (1) 橋軸方向および橋軸直角方向のひずみ

舗装に発生するひび割れは、輪荷重走行時に舗装の表面および底面に発生する引張ひずみが主な要因となる。そこで、UFC 床版に引張ひずみが生じる位置についてひずみ分布を比較した。

橋軸方向ひずみについて、40℃における横桁上の舗装表面ひずみ分布、および床版中央の舗装底面ひずみ分布を図-12 および図-13 にそれぞれ示す。なお、PC 床版においては、横桁が存在しないため、床版中央の結果を、便宜上示している。図より UFC 床版に発生する引張ひずみは PC 床版と同程度であることがわかる。なお、鋼床版の舗装底面のひずみが小さいが、これは鋼床版と基層の界面を剛結としているためである。

橋軸直角方向ひずみについて、40℃における床版中央の舗装表面および舗装底面のひずみ分布を図-14 および図-15 にそれぞれ示す。UFC 床版に発生する引張ひずみは、いずれも PC 床版と同様の傾向を示している。一方、鋼床版は舗装表面で輪荷重の外側に局部変形により大きな引張ひずみが生じた。

#### (2) 舗装厚方向ひずみ、基層-床版間の相対変位

舗装に発生するわだち掘れは、輪荷重走行時に発生する舗装の鉛直方向の圧縮ひずみと、基層と床版との界面のずれによって複合的に発生するものと考えられる。40℃における床版中央の舗装厚方向（鉛直方向）の平均ひずみ分布を図-16 に、橋軸直角方向の基層と床版とのずれ（相対変位）を図-17 にそれぞれ示す。UFC 床版の値はいずれも PC 床版とほぼ同程度である。鋼床版の舗装厚方向ひずみが他の床版より小さいのは、基層に通常グースを用いていることから付着が剛であり、界面のずれが発生しないことでひずみが抑制されたためと考えられる。

#### (3) 改良グースの適用

最後に、UFC 床版舗装の基層に改質密粒の代わりに改良グースを用いた結果を示す。40℃における床版中央の舗装底面の橋軸方向ひずみ分布、および橋軸直角方向ひずみ分布を図-18 および図-19 にそれぞれ示す。改良グー

スの引張ひずみは、改質密粒に比べて小さい。これは改良グースの界面のばね定数が改質密粒よりも大きいことが主たる要因であると考えられる。ただし、舗装の永久変形はひずみの大小のみでは評価が難しく、材質の塑性流動の起こりやすさ、変形回復能力も合わせて評価する点に留意する必要がある。

なお、本報では紙面の都合上 40℃の結果について示したが 20℃の解析結果でも同様の傾向であった。

## 6. まとめ

本研究では、UFC 床版上舗装の要求性能を立案することを目的に、特に床版と舗装との付着特性に着目した解析的検討を実施した。先ず、室内試験によって複合構造供試体の载荷時の舗装挙動を確認し、それに基づいて粘弾性解析に資する界面のバネ定数の同定を行った。その結果、舗装構成、温度により付着特性が異なり、線形粘弾性解析に入力するバネ定数も異なる結果が得られた。

また、得られたバネ定数を活用し実際の床版を模擬したモデルにおける線形粘弾性解析を実施し、UFC 床版上舗装のひずみ挙動を確認した。その結果、UFC 床版上舗装における表面および底面ひずみ、基層と床版との相対変位などは PC 床版とほぼ同様な挙動や大きさであることがわかった。本研究の範囲において、UFC 床版上の舗装については、PC 床版上の舗装に求められる要求性能を満足していれば、舗装に大きな不具合が発生する可能性は低いと考えられる。つまり、これまでのコンクリート床版上舗装に適用されている舗装材料、舗装構成を適用することが可能であると言える。さらに、改良グースが UFC 床版上舗装のひずみを抑制できる効果が確認され、改良グースを適用することにより UFC 床版上舗装のさらなる長寿命化に貢献できる可能性を示した。

本研究により、UFC 床版上舗装の挙動は一般的なコンクリート床版上の舗装に近いことがわかった。今後は実際に舗装された UFC 床版上舗装の供用状況を考慮しながら、UFC 床版上舗装に必要な要求性能を検討していく必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) 土木学会：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。
- 2) 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、PP21-27、2016.1。
- 3) 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)、

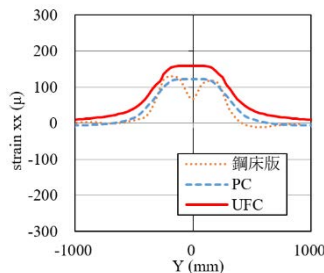


図-12 舗装表面橋軸方向ひずみ分布 (横桁上)

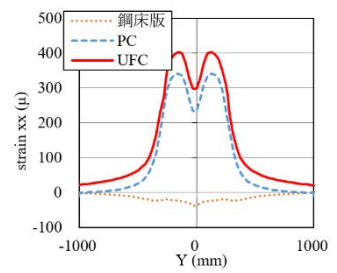


図-13 舗装底面橋軸方向ひずみ分布 (床版中央)

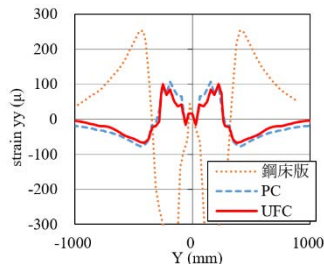


図-14 舗装表面橋軸直角方向ひずみ分布 (床版中央)

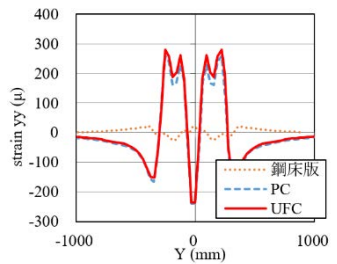


図-15 舗装底面橋軸直角方向ひずみ分布 (床版中央)

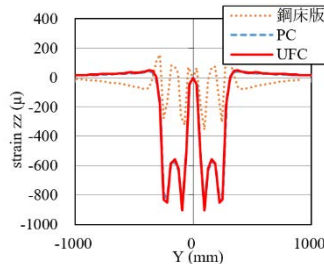


図-16 鉛直方向平均ひずみ分布 (床版中央)

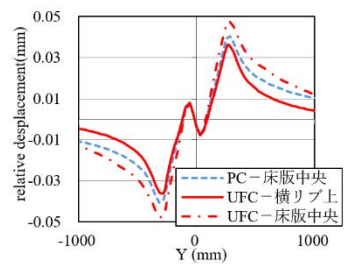


図-17 橋軸直角方向相対変位

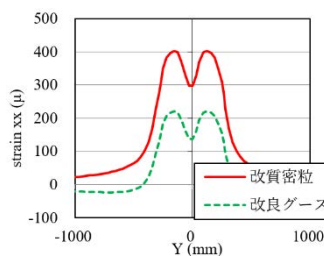


図-18 舗装底面の橋軸方向ひずみ分布 (床版中央)

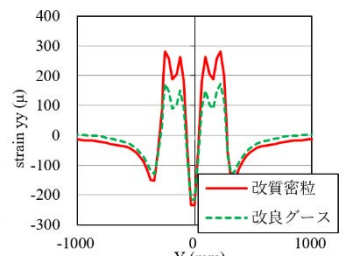


図-19 舗装底面の橋軸直角方向ひずみ分布 (床版中央)

Vol.73, No.3 (舗装工学論文集第 22 巻), I\_9-I\_17, 2017.

- 4) 田中敏弘、鎌田修、丸山陽：床版防水性能を有する橋面舗装の開発、土木学会論文集 E1(舗装工学)、Vol.72、No.3 (舗装工学論文集第 21 巻)、I\_69-I\_75, 2016。
- 5) 久利良夫、佐藤彰紀、鎌田修、芳賀潤一、児玉孝喜：高温域を考慮したアスファルト混合物のスティフネス測定に関する研究、土木学会舗装工学論文集第 13 巻、pp.39-46、2008.12
- 6) DIANA 10.4 User's Manual, DIANA FEA BV., 2020

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)