

報告

UFC 床版の先進的な維持管理に関する検討

齋藤佑太*, 森重和*, 佐藤知明**, 小坂崇***, 松井章能****

*一般財団法人阪神高速先進技術研究所, 調査研究部 (〒541-0054 大阪市中央区南本町4丁目)

** 博(工), 一般財団法人阪神高速先進技術研究所, 調査研究部 (〒541-0054 大阪市中央区南本町4丁目)

*** 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丁目)

**** 神戸市, 都市局都市計画課 (〒651-0083 神戸市中央区浜辺通2丁目)

超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)を用いた UFC 床版は、常時の作用に対してひび割れが生じないように設計している。一方、維持管理においては、設計基準で設定していない作用によりひび割れや欠損等の損傷が生じることが想定される。本検討は、UFC 床版の確実かつ先進的な維持管理手法の確立を目的として、UFC 床版に生じる作用と損傷、その損傷の調査・点検・診断、補修・補強などを、一連の「維持管理シナリオ」として検討した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、UFC 床版、非破壊検査、維持管理

1. はじめに

1.1 UFC 道路橋床版の概要と実橋への適用

阪神高速道路(以下、阪神高速)では2010年にUFC道路橋床版の開発に着手し、解析や実験による性能検証を経て¹⁾、2014年に土木学会の技術評価を取得した²⁾。

ワッフル型 UFC 床版および平板型 UFC 床版の概要を図-1に示す。

実橋への適用は、2018年に玉出入路の床版取替えに平板型 UFC 床版³⁾、2019年に信濃橋入路の新設橋にワッフル型 UFC 床版⁴⁾、2020年に守口線本線の床版取替えに平板型 UFC 床版を適用している⁵⁾。

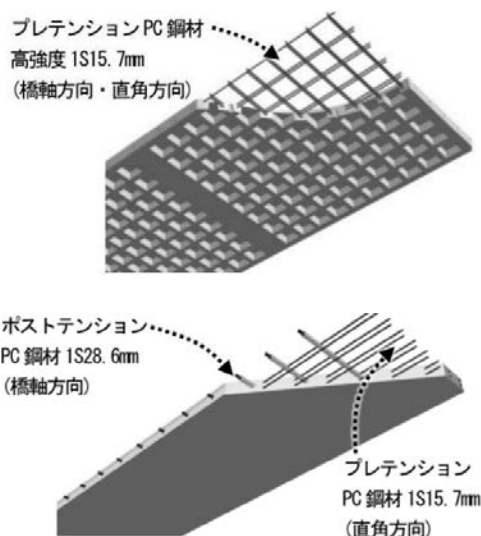


図-1 UFC 床版の概要 (上：ワッフル型，下：平板型)

1.2 先進的なメンテナンスに関する検討

UFC 床版は、UFC 指針⁶⁾に準拠して設計しており、使用性能の照査においては、UFC 床版の引張応力度がひび割れ発生強度を越えないように設計することとしている。

一方、供用後の実構造物においては、積載物の落下や車両の衝突など設計基準に設定していない作用により UFC 床版が損傷する可能性がある。よって、今後、UFC 床版を確実に維持管理していくために、UFC 床版の先進的なメンテナンスの検討に着手した。本文では検討内容を報告する。

2. 検討の流れ

UFC 床版の先進的なメンテナンスの検討の流れと本論文の章構成との関係を図-2に示す。まず、UFC 床版について、作用、損傷のケースに対する、調査点検、補修補強など対策の組み合わせのケースを設定する。本論文では、これらの組み合わせのケースを「維持管理シナリオ」と呼ぶ。維持管理シナリオの設定を3章に示す。

次に、この維持管理シナリオの設定内容について、未解明な項目を明らかにするための検討として、損傷過程、調査・点検方法、補修・補強方法および材料の選定、供用再開判断についてそれぞれ検討した⁷⁾。

これらの検討結果を踏まえ、維持管理シナリオを更新し、維持管理計画とする。実構造物の維持管理においても、このような検討を実務として実行することで、先進的なメンテナンス検討のPDCAサイクルとなり、維持管理の効率化や品質向上につながるものといえる。

3. 維持管理シナリオの検討

$$\alpha = R_1 \times R_2 \times R_3 \quad (1)$$

3.1 UFC 床版の損傷と維持管理の想定

UFC 床版の設計において基準に設定されてない作用とそれに対する損傷，調査点検方法，対策・処置について検討した維持管理シナリオを表-1に示す。

3.2 検討の優先順位の検討

維持管理シナリオは，過去に発生した事例等を参考に，UFC 床版に想定される 20 ケースを抽出したものである。

ここで，20 ケースを全て同時に検討するのは困難であることから，各ケースをリスク評価することで検討の優先順位を設定することとした。

リスク評価では，各ケースの「頻度」「重大度」「偶発性」の3項目を設定しリスク評価値 α を式(1)によって算出した。算出した α の大きい順に優先順位が高いものとした。表-1は優先順位の高い順に並び変えた結果である。特にNo.1~4についてリスク評価値が高く保全部門からも検討のニーズの高い項目であった。

ここに， R_1 ：頻度（設計供用期間中に事象が起こると想定される回数を3段階評価）

R_2 ：重大度（事象の使用性，安全性への影響度を3段階評価）

R_3 ：偶発性（不測の事故や災害など，事象の発生の予測の難しさを3段階評価）

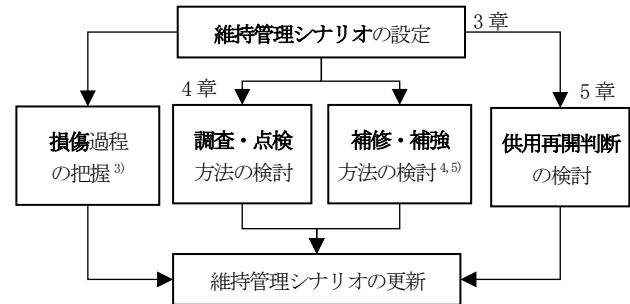


図-2 先進的なメンテナンスの検討の流れ

表-1 UFC 床版の維持管理シナリオ

No	作用 (状況)	損傷	調査・点検方法	補修・補強 (対策・処置)	評価値 α
1	走行車両から積荷 (小) が落下	ひび割れ 0.1mm 未満	近接目視	0.2mm 未満：含浸樹脂接着 0.2~0.5mm：ひび割れ注入 0.5mm 以上：炭素繊維シート補強 欠損：断面修復工法	9
2	走行車両から積荷 (大) が落下	ひび割れ 0.5mm 以上	近接目視		9
3	床版側面あるいは下面に車両等が衝突	ひび割れ 0.1~0.5mm, 剥離	近接目視		6
4	壁高欄に走行車両が衝突	ひび割れ 0.1mm 未満	近接目視		6
5	床版下側で火災が発生	0.1~0.5mm, 剥離, 爆裂	近接目視	ひび割れ補修, 床版取替	6
6	舗装ボットホール補修時に過切削	切削 (剥離), 鋼繊維の毛羽立ち, PC 鋼材の損傷	近接目視	鋼繊維の毛羽立ち研磨, 断面修復工法	6
7	レベル 1 地震が床版に作用	ひび割れ 0.1mm 未満	近接目視	含浸樹脂接着工法	6
8	レベル 2 地震が床版に作用	ひび割れ 0.1~0.5mm, PC 降伏	近接目視 非破壊検査	含浸樹脂接着工法, ひび割れ注入工法, 性能照査	6
9	支承の劣化等で鋼桁が沈下	ひび割れ 0.1mm 未満, 目開き	近接目視 光ファイバ	性能照査 (PC 鋼材損傷時), 床版取替え	4
10	床版上面ひび割れに浸水	PC 鋼材の腐食, 漏水による鋼桁や支承の腐食	近接目視, 非破壊検査	含浸樹脂接着工法	4
11	舗装・防水層撤去時に過切削	切削, 鋼繊維の毛羽立ち	近接目視	含浸樹脂接着工法, ひび割れ注入工法	4
12	鋼桁スタッドの疲労破断等が発生	ひび割れ 0.1~0.5mm, 剥離	近接目視	性能照査, スタッド補修	3
13	製作・運搬時のひび割れが残存	ひび割れ 0.1mm 未満	近接目視, 非破壊検査, 光ファイバ	含浸樹脂接着工法, ひび割れ注入工法	3
14	床版上で車両事故等による火災が発生	ひび割れ 0.1mm 未満	近接目視	含浸樹脂接着工法, ひび割れ注入工法, 断面修復工法	2
15	伸縮装置取替え時に過切削	切削, 鋼繊維の毛羽立ち	近接目視	含浸樹脂接着工法	2
16	通行台数や大型車混入率が増大	ひび割れ 0.1mm 未満	近接目視, 非破壊検査, 光ファイバ	含浸樹脂接着工法 ひび割れ注入工法	2
17	飛来塩分や凍結防止剤の散布	表面の鋼繊維の腐食 (発錆)	近接目視	鋼繊維の毛羽立ち研磨, 断面修復工法	2
18	付属物・仮設材設置のためのアンカー削孔に伴う床版のひび割れ	ひび割れ 0.1mm 未満, PC 損傷	近接目視 非破壊検査	含浸樹脂接着工法	2
19	舗装, 防水層が破損して床版上に滞水	鋼繊維の発錆, 接合部目地からの浸水	近接目視	経過観察	2
20	ひび割れからの塩化物イオンの流入	ひび割れ 0.1~0.5mm	近接目視, 塩分含有量調査	含浸樹脂接着工法, 性能照査 (PC 鋼材損傷時)	1

4. 調査・点検方法の検討

維持管理シナリオで設定した損傷の発見を目的として、調査・点検方法に関する検討を実施した。具体的には、3種類の損傷を模擬したテスト床版（ひび割れ、浮き、PC 鋼材破断）を製作し（写真-1）、点検・非破壊検査の適用性検証を行った。

4.1 損傷を模擬したテスト床版の製作

(1) ひび割れ模擬テスト床版

テスト床版は、厚さ 150mm、長さ 1500mm、幅 800mm の平板型とし、PC 鋼材は配置しない構造とした。ひび割れ導入は、アムスラー（最大容量 4900kN）を用いた三等分点荷重により、表-2 に示す荷重変動パターンで載荷と除荷を繰り返し、目視確認により残留ひびわれ幅が 0.2mm 程度、周囲のひび割れ幅 0.1mm 程度が分散するテスト床版となるまで、最大 470kN で載荷した。

(2) 浮き模擬テスト床版

テスト床版は、厚さ 150mm、長さ 1500mm、幅 1000mm の平板型とし、内部に発生した浮きを模擬するため、高さが異なる 3 箇所を発泡スチロール（厚さ 5mm、長さ 500mm、幅 50mm）を配置し、高さはそれぞれ床版下面から 20mm 付近、100mm 付近、130mm 付近とした。

また、浮き部分には鉛直方向に架橋した鋼繊維の存在が想定されるため、既往研究⁸⁾による鋼繊維の鉛直方向の配向性を参考に、発泡スチロールには写真-2 に示すように鋼繊維を配置した（5cm×5cm の範囲に 80 本）。

(3) PC 鋼材破断テスト床版

テスト床版は、厚さ 150mm、長さ 1500mm、幅 1000mm とし、テスト床版内部には、図-3 のように破断を模擬したプレテンション鋼材、およびポストテンション鋼材を配置した。プレテンション鋼材は 2 段配置となっているが、破断を模擬した鋼材は、テスト床版の底面側に配置した。なお、PC 鋼材には UFC およびグラウトが入り込まないように、ビニールテープを巻いた。

4.2 調査・点検の試行

テスト床版を用いた点検・非破壊調査手法の検討に先立ち、コンクリート標準示方書⁹⁾〔維持管理編〕⁹⁾、および道路橋床版の維持管理マニュアル¹⁰⁾を参考に、コンクリート構造物の点検・非破壊調査手法から、本検討において

試行する手法を抽出した。抽出結果および調査・点検方法の試行結果を表-3 に示す。

(1) ひび割れの近接目視による調査

目視により模擬したひび割れを観察した結果、0.06mm 未満の微細なひび割れに対してもアセトンを用いることで調査が可能であることがわかった。また、0.06mm 以上のひび割れについては、目視で確認することができた。

表-2 ひび割れ導入結果（テスト床版側面）

載荷荷重 (kN)	ひび割れ幅 (mm)	載荷荷重 (kN)	ひび割れ幅 (mm)
50	0	0 (除荷)	0.06, 0.04
100	0	450	0.20
110	0	0 (除荷)	0.08, 0.10
...	0	460	0.25, 0.30
430	0.10	0 (除荷)	0.10, 0.15
0 (除荷)	0.04	470	0.25, 0.45
440	0.15	0 (除荷)	0.20, 0.40

※着色箇所は除荷時 (0kN) の残留ひび割れ幅を示す。

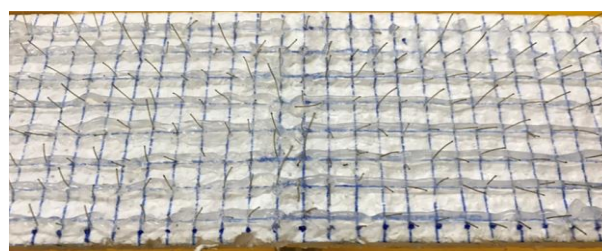


写真-2 発泡スチロールへの鋼繊維の差し込み

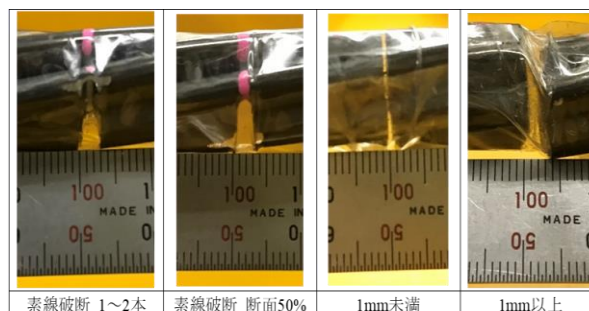


図-3 PC 鋼材の破断状況（プレテンション PC）



写真-1 テスト床版作製状況（左：ひび割れ床版，中：浮き床版，右：PC 鋼材破断床版）

表-3 点検・調査手法の抽出および試行結果

調査対象	得られる情報	点検調査方法	試行結果による適用可否	
			○：適用できる，△：追加検討必要， ×：適用が難しい，－：未実施	鋼繊維の影響
外観の変状変形	初期欠陥の有無 変色，汚れの有無 ひび割れの有無，ひび割れの状態 スケーリング，ポップアウト	近接目視	○（微細ひび割れはアセトン等の液体による ふき取りなどが必要）	—
		叩き（打音法）	△（音声解析による適用は検討の余地あり）	あり
	浮き，剥離，はく落の有無	赤外線サーモグラフィ	△（気象条件の影響を検討する必要がある）	あり
コンクリートの状態	内部のひび割れ，空隙	蛍光剤含浸法	—	不明
		弾性波トモグラフィ	—	不明
		X線透過法	—	あり
		電磁誘導法	×（検知できなかった）	あり
鋼材等の状態	鋼材量 鋼材の位置，径，かぶり	電磁波レーダ法	×（検知できなかった）	あり
		超音波法	—	不明
	PCグラウトの充填状況	衝撃弾性波法	—	不明
		鋼材の破断	漏洩磁束法	△（PC鋼材の破断が検知できた．計測方法 や事後かいせきによる精度向上の余地あり）
PC鋼材の状態	PC鋼材の配置，かぶり，種別	電磁誘導法	×（検知できなかった）	あり
		電磁波レーダ法	×（検知できなかった）	あり
	PC鋼材の破断状況	漏洩磁束法	△（PC鋼材の破断が検知できた．計測方法 や事後かいせきによる精度向上の余地あり）	あり
		磁気ストリーム法	—	不明
		X線透過法	—	あり

(2) 浮きの赤外線サーモグラフィによる調査

床版下面から測定した3箇所（浮きのかぶり：20mm, 100mm, 130mm）のうち，かぶりが最も浅い（20mm）箇所のみ周囲（健全部）との温度差を確認することができた（図-4）．また，測定は床版上面からも実施したが，いずれのかぶり（20mm, 50mm, 130mm）においても健全部との温度差は確認できなかった．本結果は，冬季における特定の時間帯において試行的に実施した結果であり，気象条件や計測時間帯の影響により健全部との温度差の確認が困難であったと推測される．

(3) 打音法による浮きの調査

ハンマーによる打音法においては，UFCが高強度であることや，浮きの範囲が狭かった等の理由から，人の聴覚による浮きの判断は困難であった．今後は，打音時の録音データを用いた音声解析等により，浮きを検知できる方法について検討する．

(4) PC鋼材切断の漏洩磁束法による調査

漏洩磁束法は，コンクリート表面から永久磁石で鉄筋を着磁した後，破断箇所での磁束の乱れを磁気センサで検出して破断の有無を診断するものである．

PC鋼材破断床版を用いて，通常のコンクリート構造物と同様に着磁作業を行い，センサにより測定を実施したところ，ノイズと思われる波形（小波）の発生が顕著に見られ，PC鋼材の破断判定が困難な結果となった（図-5）．これは，UFC床版に内在する鋼繊維にも強力に着磁されたことが要因と推察される．

そこで，着磁後の表面において，脱磁作業を行うことで，鋼繊維に着磁された磁力の低減を試みた．その結果，ノイズ波形が減少し滑らかな曲線となることで，プレテンションPC鋼材（かぶり厚さ：35mm程度）の破断を検出することができた（図-6）．ただし，ポストテンシ

ョンPC鋼材（かぶり厚さ：60mm程度）については，かぶりが厚いことやシースの影響等により，破断を確認することができなかった．

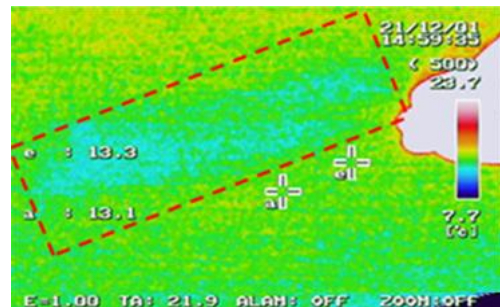


図-4 赤外線サーモグラフィ計測結果

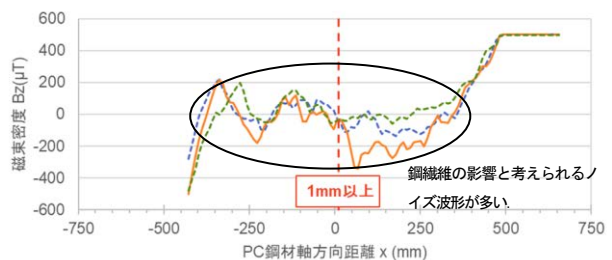


図-5 脱磁前の計測結果（プレテン PC 鋼材）

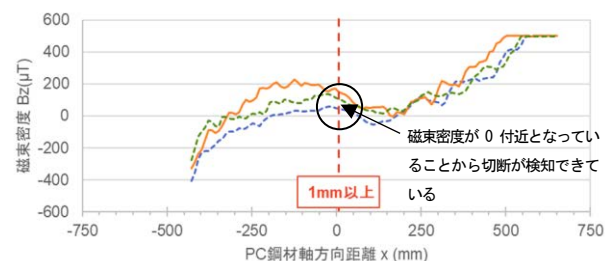


図-6 脱磁後の計測結果（プレテン PC 鋼材）

(5) 電磁波レーダによる鋼材位置の確認

鉄筋位置や鋼材位置の確認手法として一般的に用いられる電磁波レーダ法を用いて、鋼繊維が内在する UFC 床版中の鋼材位置の特定を試みた。UFC 床版上と RC 床版上を連続して測定した結果を図-7 に示す。

RC 床版においては、ダブルに配置された鉄筋位置が確認できたのに対し、UFC 床版では PC 鋼材位置が確認できなかった。これは、UFC 床版内に放出された電磁波が、内在する鋼繊維（磁性体）で反射することによって散乱したためであると推測される。

5. デジタルツインを活用した供用再開判断の検討

デジタルツインは、デジタルデータをもとに物理的な製品をサイバー空間上で仮想的に複製し、シミュレーションすることで、現実世界の研究開発、設計、製造、施工および管理などに役立てるものである¹¹⁾。

阪神高速においても「阪神高速サイバーインフラマネジメント」として、サイバー空間上に阪神高速ネットワーク全線を構築し、地震時のシミュレーションによる被害予測や、精緻に構築した長大橋モデルを用いて、地震後の通行可否の判断などに役立てるための検討を進めている¹²⁾。

本検討は、維持管理シナリオ No.1~4 のような積荷の落下や車両の衝突など、突発事象が生じた場合の UFC 床版など、現実空間の計測結果を踏まえて供用再開判断をするために、事前に、サイバー空間に精緻な橋梁を構築し、解析によって計測結果から供用再開が判断できる閾値を検討することとした。

(1) デジタルツインに用いる FEM モデルの構築

玉出入路に設置された平板型 UFC 床版を有する橋梁を対象に、デジタルツインに活用する FEM モデルを作成した。FEM モデルの概要は表-4 に示すとおりであり、部材寸法や材料条件等は、竣工図書をベースに可能な限り忠実かつ詳細に再現した (図-8)。また、舗装および遮音壁は質量のみを考慮した。さらに、本橋では、加速度の計測を実施しており、実測による固有振動数とデジタルツインによる解析結果を比較することで、解析モデルの妥当性を確認した (表-5)。

(2) 供用再開判断の検討

本検討では、デジタルツインを活用することで、UFC 床版が損傷を受けた際の影響をシミュレーションすることができ、また、突発事象等が生じた際にも比較的簡易に計測が可能な加速度に着目し、供用再開判断に用いる閾値を、計測された加速度の固有振動数で定義することとした。

- ①作成した FEM モデルに対し床版厚を変更し固有振動数の変化を算定
- ②断面減少量と引張応力の増分量を事前に整理して

おくことで、突発事象発生後、実橋において固有振動数を計測し、①②の関係より供用再開判断を行うものである。

また、上記のほかにも、プレストレスが減少した場合の解析や、解析結果を踏まえた実橋梁での最適な計測箇所を検討なども併せて実施したい。



図-7 電磁波レーダ法による測定結果

表-4 FEM モデルの概要

対象部材	モデル
床版、壁高欄 主桁、横桁、垂直補剛材	シェル要素 (床版は厚板シェル要素)
対傾構	はり要素
PC 鋼材	埋め込み鉄筋要素

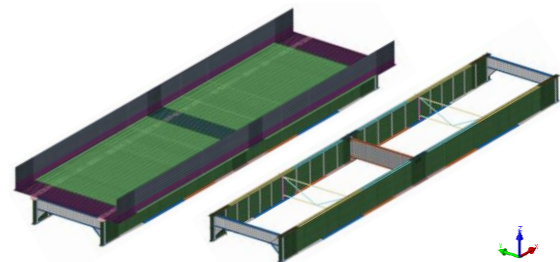


図-8 構築した FEM モデル図

表-5 実橋梁の固有振動数との比較

本検討		実橋梁の計測結果	
1次	5.83Hz	合成桁としての1次	4.9Hz
2次	20.84Hz	合成桁としての2次	約19Hz

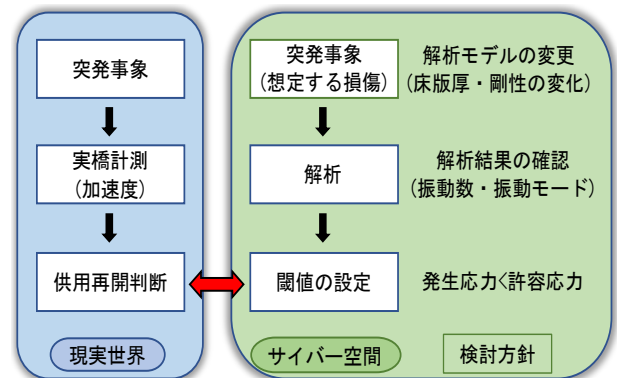


図-9 供用再開判断の検討方針

6. おわりに

本検討では、UFC床版の設計基準に設定されていない作用に対する損傷を想定し、20ケースの維持管理シナリオを設定した。また、UFC床版の損傷過程、調査・点検方法、補修・補強方法、供用再開判断のためのデジタルツインなどを検討することで、維持管理シナリオの確実性向上を目指した。

本検討で得られた知見や課題を以下に示す。

(1) 維持管理シナリオの検討

- a) 過去の事例等を参考に、UFC床版に想定される作用、損傷、調査点検、補修補強を維持管理シナリオとして整理し、リスク評価を行うことで、検討の優先順位を明確にした。
- b) UFC床版の損傷や調査・点検、供用再開判断の手法や閾値を全て明らかにしたとはいえ、今後も継続して検討に取り組む必要がある。

(2) 調査・点検手法の検討

- a) UFC床版に想定される微細ひび割れについて、ひび割れ模擬テスト床版を製作して確認した結果、目視によりひび割れ幅 0.06mm 程度まで確認することができた。
- b) 浮きを模擬したテスト床版を用いてハンマーによる打音法を試行した結果、人の聴覚による浮きの判定は困難であることが分かった。
- c) 赤外線サーモグラフィにより健全部と浮き部分の温度差を確認した結果、底面から 20mm の位置に存在する浮きのみ健全部との温度差を確認できた。今後は、健全部と劣化部の温度差を測定できる時間帯や気象条件を整理する必要がある。
- d) 漏洩磁束法や電磁波レーダなど、磁力を用いた非破壊検査手法による PC 鋼材の破断判定、および鋼材位置の確認においては、UFCに内在する鋼繊維によって検知が難しくなることがわかった。ただし、漏洩磁束法においては、鋼繊維の影響を取り除くことで判定が可能となる結果を示した。今後、鋼繊維の影響を除去できる計測技術や解析方法を検討することで、調査・点検手法の確実性を向上させることができると考える。

(3) デジタルツインを活用した供用再開判断の検討

- a) デジタルツインを活用した「供用再開判断基準の策定」を目指し、玉出入路を対象とした精緻なモデルを作成し、実橋梁の振動計測結果と比較することで、固有振動数、および振動モードによる閾値が設定できる可能性を示した。

- b) 想定される損傷状態と固有振動数の把握や、供用再開判断基準の策定、および解析結果の妥当性確認など、より実務を想定した運用方法の検討が課題である。

今後も、このような課題に対して継続的に検討していくことで、UFC床版の維持管理の確実性を高めることができるといえる。

謝辞

本研究の実施や考察について、UHPFRC 構造の先進的なメンテナンス検討会において、委員長の神戸大学大学院三木朋広准教授、委員の京都大学大学院 山本貴士教授、北海道大学大学院 橋本勝文准教授にご指導を頂きました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 小坂ら：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, pp.473-490, 2018
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート (UFC) 道路橋床版の技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No. 17, 2014
- 3) 橋爪ら：平板型 UFC の設計・製作・架設 一阪神高速道路 15 号堺線 玉出入路橋の床版取替え，橋梁と基礎，pp23-28, 2019
- 4) 小坂ら：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, 93-97, 2020
- 5) 川崎ら：都市高速道路本線での床版更新への平板型 UFC 床版の適用，土木学会第 76 回年次学術講演会概要集, 2021
- 6) 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
- 7) 齋藤ら：UFC 床版における補修材料の有効性に関する検討，土木学会第 76 回年次学術講演会概要集, 2021
- 8) 浅野浩平：高性能繊維補強セメント複合材料における繊維配向性と架橋則に関する研究，筑波大学，2014
- 9) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2018.10
- 10) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル 2020，鋼構造シリーズ 35, 2020.10
- 11) 国研 科学技術振興機構；革新的デジタルツイン，<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2017-SP-01.html>, 2018.3
- 12) 伊佐ら：阪神高速サイバーインフラマネジメントの取り組みと価値創造の可能性，AI・データサイエンス論文集, 1 巻 J1 号, 2020

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)