

UFC 床版の先進的な維持管理手法の構築

前 (一財) 阪神高速先進技術研究所調査研究部	齋藤 佑太
(一財) 阪神高速先進技術研究所調査研究部	森 重和
(一財) 阪神高速先進技術研究所調査研究部	佐藤 知明
阪神高速道路(株)技術部	小坂 崇
前 阪神高速道路(株)建設事業本部神戸建設部	松井 章能

要 旨

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 UFC 床版に変状が生じる可能性がある。そこで、本検討では、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変状、その変状の調査・点検・診断、補修・補強等を、一連の「維持管理シナリオ」として検討した。調査・点検方法の検討では、変状を模擬したテスト床版を製作し、点検・非破壊検査の適用性検証を実施し、補修・補強方法の検討では、ひび割れの補修に対する補修材料の性能検証について、各種実験を行い検討した。また、供用再開判断の検討では、デジタルツインの活用を試行し、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、精緻な FEM モデルを作成した。本稿は、これら UFC 床版の先進的な維持管理について検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード: UFC 床版, 維持管理, 非破壊調査, 補修, 補強, デジタルツイン

はじめに

阪神高速道路（以下、阪神高速）では、新設橋や床版取替えに対応できる軽量かつ耐久性の高いコンクリート系床版として、2010 年より超高強度繊維補強コンクリートを用いた UFC 床版を開発し、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 年以降 3 橋に適用している。UFC 床版は、土木学会 UFC 指針³⁾に準拠して設計しており、使用性の照査においては、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、車両からの積載物の落下や衝突等、設計条件として設定していない作用により変状が生じる可能性がある。しかし、UFC 床版を実構造物で維持管理している事例は極めて少ない。よって、UFC 床版を確実に維持管理していくために、UFC 床版の先進的な維持管理の検討を実施した。

検討の流れを図-2 に示す。まず、UFC 床版について、作用、変状のケースに対する、調査点検、補修補強等、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。次に、この維持管理シナリオの設定において、未解明な項目を明ら

かにするために、変状過程，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。

1. 維持管理シナリオの設定

維持管理シナリオは，過去にコンクリート構造物に生じた変状事例等を参考に，UFC 床版に想定される 20 シナリオを抽出したものである。

ここで，20 シナリオ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 が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（上位 10 シナリオ）である。

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

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（使用性，安全性への影響度を 3 段階評価）

R_3 ：偶発性（不測の事故や災害等，事象発生予測の難しさを 3 段階評価）

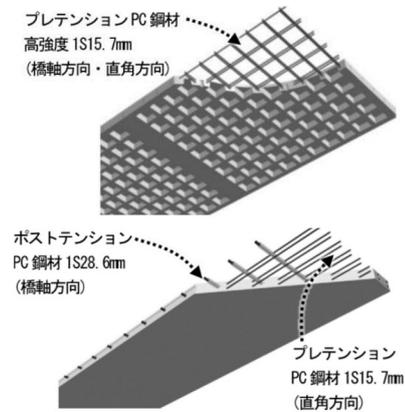


図-1 UFC床版の概要（上：ワッフル型/下：平板型）

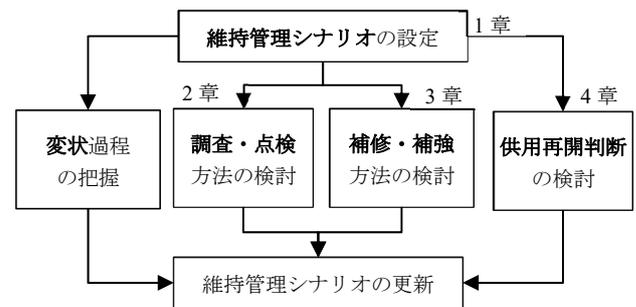


図-2 維持管理の検討の流れ

表-1 維持管理シナリオ（上位 10 シナリオ）

No	作用（状況）	変状	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 0.1 mm 未満	近接目視	0.2 mm 未満：含浸樹脂接着 0.2～0.5 mm：ひび割れ注入 0.5 mm 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 0.5 mm 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 0.1～0.5 mm，剥離	近接目視		6
4	壁高欄に走行車両が衝突	ひび割れ 0.1 mm 未満	近接目視		6
5	床版下側で火災が発生	0.1～0.5 mm，剥離，爆裂	近接目視	ひび割れ補修，床版取替	6
6	舗装ポ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 0.1 mm 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 0.1～0.5 mm，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 0.1 mm 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	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

2. 調査・点検方法の検討

維持管理シナリオで設定した変状のうち、目視での発見が困難と想定される“微細ひび割れ”，“床版内部の浮き”，“PC 鋼材破断”について、調査・点検方法に関する検討を実施した。

具体的には、上記3種類の変状を模擬したテスト床版を製作し、点検・非破壊検査手法の適用性を検証した。なお、製作したテスト床版は阪神高速の震災資料保管庫敷地内に設置した（写真-1）。



写真-1 製作・設置したテスト床版

2-1 変状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

厚さ 150 mm，長さ 1,500 mm，幅 800 mm の平板型とした。ひび割れ導入は、アムスラー（最大容量 4,900 kN）を用いた 3 等分点載荷により、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 0.2 mm 程度，周囲のひび割れ幅 0.1 mm 程度が分散するテスト床版となるまで，最大 470 kN で載荷した。

(2) 浮き模擬テスト床版

厚さ 150 mm，長さ 1,500 mm，幅 1,000 mm 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 5 mm，長さ 500 mm，幅 50 mm）を配置し，高さはそれぞれ床版下面から 20 mm 付近，100 mm 付近，130 mm 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⁴⁾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（5 cm × 5 cm の範囲に 80 本）。

(3) PC 鋼材破断模擬テスト床版

厚さ 150 mm，長さ 1,500 mm，幅 1,000 mm の平板型とし，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 鋼材の破断箇所には 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。

表-2 ひび割れ導入荷重とひび割れ状況

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

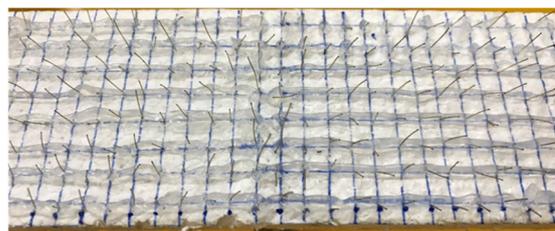


写真-2 発泡スチロールへの鋼繊維の差し込み

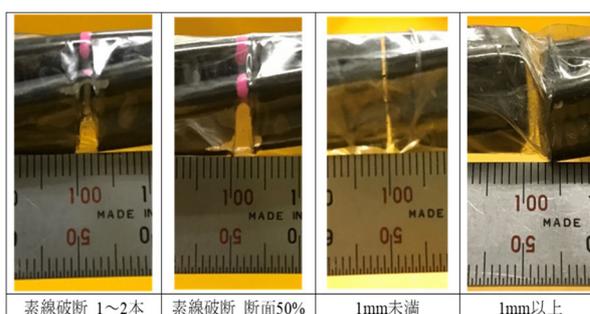


図-3 PC 鋼材の破断状況（プレテンション PC）

2-2 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〔維持管理編〕⁵⁾，および道路橋床版の維持管理マニュアル⁶⁾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，本検討で試行する手法を抽出した。

抽出結果および試行結果を表-3に示す。

(1) 近接目視によるひび割れ調査

目視により模擬したひび割れを観察した結果、0.06 mm 未満の微細なひび割れに対してもアセトンの併用により調査が可能であることがわかった。

(2) 打音法による浮きの調査

打音法では、UFC が高強度であること、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、音声解析により鋼繊維の影響や浮きの判断可否を検討する。

(3) 赤外線サーモグラフィによる浮きの調査

床版下面から測定した3箇所（浮きのかぶり：20 mm, 100 mm, 130 mm）のうち、かぶりが最も浅い（20 mm）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（20 mm, 50 mm, 130 mm）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試行した結果であるため、気象条件等に応じて温度差が生じる時間帯で計測することで、鋼繊維の影響の有無や、かぶりが深い位置における浮きの検出可否を明らかにできる可能性があると考えられる。

(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：35 mm 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：60 mm

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、破断の検出が困難であった。

表-3 点検・調査手法の抽出および試行結果

変状	調査方法	試行結果による適用可否※	鋼繊維の影響
ひび割れ	目視	○ 微細ひび割れはアセトンが必要	なし
浮き	打音	△ 音声解析による検討の余地あり	不明
	赤外線サーモグラフィ	△ 環境条件による影響把握が必要	不明
PC 鋼材破断	漏洩磁束法	△ 追加検討による精度向上の検討	あり

※：○適用可 △要追加検討

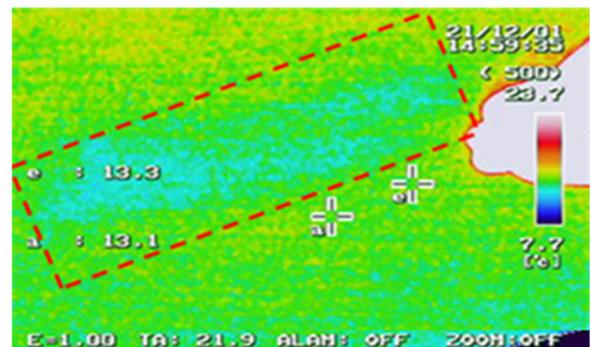


図-4 赤外線サーモグラフィ計測結果

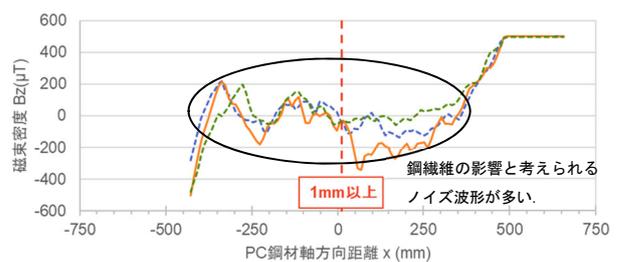


図-5 通常の計測結果（プレテン PC 鋼材）

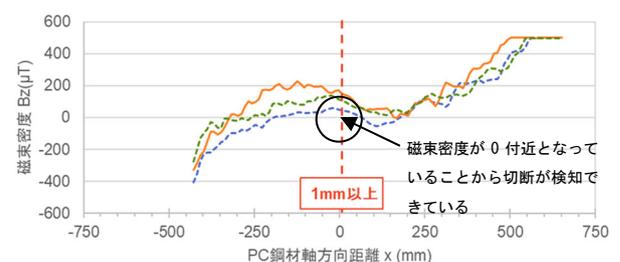


図-6 脱磁後の計測結果（プレテン PC 鋼材）

3. 補修・補強方法の検討

UFC は密実な材料であることから塩害等の環境作用に対する耐久性が高く、鋼繊維腐食による構造物の性能は失われないとされている。一方、UFC にひび割れが生じた場合は、ひび割れに沿って塩化物イオンが浸透することや、ひび割れ幅と腐食条件により静的曲げ強度や疲労耐久性が低下することが報告されている⁷⁾。

本検討では、維持管理シナリオで想定した変状の内、ひび割れ補修に対する補修材料の効果および施工の確実性について、表-4 に示す試験を実施した。

3-1 供試体の製作

材料は、エトリンサイト生成系 UFC⁸⁾ (以下、AFt系 UFC) を用いて所定のコンシステンシーおよび強度が得られる配合(表-5)とし、供試体寸法は 100 mm × 100 mm × 400 mm とした。ひび割れについては、3 等分点载荷によって支間中央付近の残留ひび割れ幅が 0.1 mm, 0.3 mm 程度となるように、目視で確認しながら導入した(写真-3)。

3-2 ひび割れ補修の実施

(1) ひび割れ含浸樹脂接着工法

ひび割れ含浸樹脂接着は、0.1 mm 程度のひび割れに含浸可能で、施工が容易(ローラー、刷毛等で施工が可能)な樹脂の中から、市販されている 5 種類の材料を選定した(表-6)。樹脂の塗布は、実際の現場を想定し、刷毛を用いた上向き施工とした。また、硬化後の浸透状況を確認するため、樹脂にはあらかじめ蛍光塗料を添加した。塗布後は樹脂が硬化するまで塗布面が下向きになるよう静置し、作業時の室温は約 20°C に設定した。

(2) ひび割れ注入工法

ここでは、進行性のないひび割れを想定していることから、阪神高速のエポキシ樹脂品質管理基準を満たす材料の中から、温度変化やたわみに追従可能なエポキシ系樹脂注入材料を選定した。

ひび割れへの注入は、シール材の塗布および注入口を設置後、自動式低圧注入工法(図-7)により実施した。作業時の室温は約 20°C に設定した。

表-4 ひび割れ補修に関する実験内容

変状	ひび割れ幅	補修方法	試験内容
ひび割れ	0.1 mm 程度	含浸樹脂接着工法	浸透性観察
	0.3 mm 程度	ひび割れ注入工法	曲げ強度試験 浸透性観察

表-5 試験供試体に用いた AFt 系 UFC の配合

W/B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					鋼繊維 (kg)
		水	結合材	細骨材	高性能減水剤	消泡剤	
15	2	195	1287	905	25.7	6.4	137.4 (1.75Vol%)



写真-3 ひび割れ導入状況

表-6 ひび割れ含浸樹脂接着に用いた樹脂

No.	樹脂の種類	規定塗布量 (g/m ²)
①	アクリル系 (低粘度型)	200
②	エポキシ系 (低粘度型)	225
③	エポキシ系 (超低粘度型)	200
④	アクリルシリコン系 (無溶剤型)	250
⑤	エポキシ系 (溶剤型)	100



図-7 ひび割れ注入状況

3-3 試験結果

(1) ひび割れ含浸樹脂接着工法

樹脂の浸透状況は、試験体を長手方向に切断後、断面に可視光および紫外光を照射し、ノギスを用いて浸透深さを確認した。

試験結果を表-7 に示す。供試体ごとにひび割れ幅やひび割れ深さが若干異なるが、各材料ともに 0.1 mm 程度のひび割れ幅に対して一定の浸透状況を確認した。材料③の超低粘度型エポキシ樹脂接着剤は、ひび割れ深さに対し9割程度まで浸透することを確認した(図-8)。これは、他の材料と比較して粘度が低い(150 mPa・s程度)ことで、毛細管現象による浸透効果が高くなったと推測される。ただし、粘性が低く、液垂れにより塗布回数が増えたため、規定塗布量を満たすための塗布回数は、他の材料よりも多い結果となった。

(2) ひび割れ注入工法

3等分点载荷による曲げ強度試験により曲げ強度および曲げ剛性への影響を確認した。試験は、ひび割れなし供試体とひび割れ注入後の供試体について各3体実施した。

曲げ強度試験結果を図-9 に示す。いずれのケースも最大曲げ応力が同程度の値であったのは、ひび割れを跨ぐ鋼繊維の架橋効果にひび割れ注入材料は影響していないことを意味している。

また、ひび割れ注入後の曲げ強度試験では、事前に導入したひび割れとは別の箇所(ひび割れがなかった部位)にもひび割れが入ったことや、事前に導入したひび割れの再目開きがなかったことを確認した。さらに、ひび割れ注入供試体の载荷初期の剛性がひび割れなしと比べて小さかった。これは、注入材料のヤング係数が小さいことや、注入したひび割れ以外にも微細なひび割れが発生していたことが要因と推察される。よって、ひび割れ注入工法による剛性の回復効果は見込めないものと考えられる。

さらに、曲げ強度試験後の供試体を長手方向に切断し、紫外光により断面を観察した結果、いずれの供試体も目視により確認したひび割れ深さのほぼ全体まで注入材料の浸透が確認された(図-

10)。ひび割れ注入による劣化因子の遮断効果は既往の研究でも報告されており⁹⁾、今回使用した注入材料にも同等の遮断効果が期待できる。

表-7 含浸樹脂の浸透観察結果

材料No.	①	②	③	④	⑤
可使時間	15分	45分	3時間以上	45分	1時間以上
塗布回数	5回	3回	7回	4回	5回
ひび割れ幅	0.1mm	0.1mm	0.1mm	0.08mm	0.15mm
最大ひび割れ深さ	81mm	78mm	80mm	83mm	85mm
浸透深さ	10mm	19mm	73mm	7mm	12mm

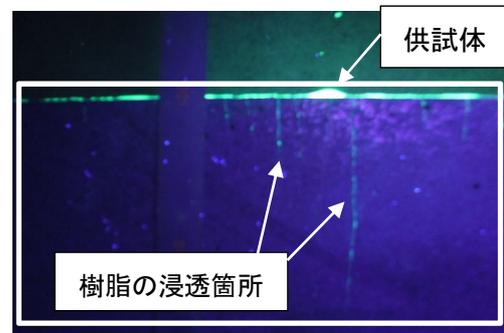


図-8 含浸樹脂の浸透状況(材料③)

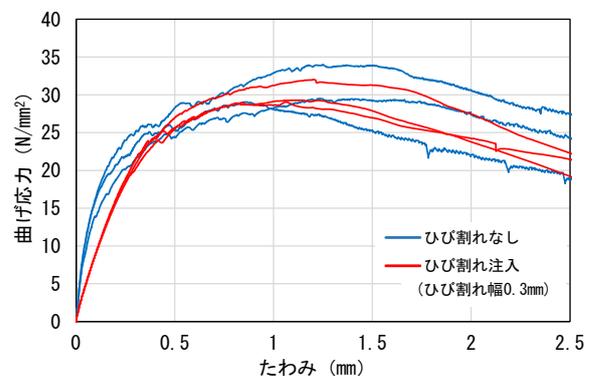


図-9 曲げ強度試験結果

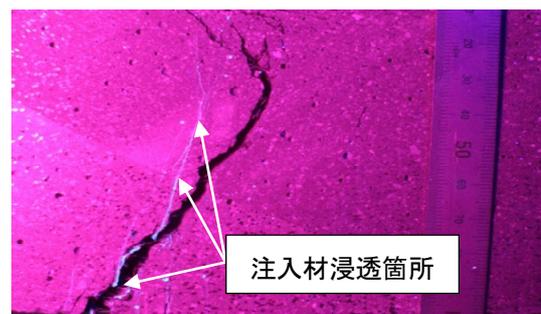


図-10 注入材料の浸透状況

4. 突発事象に対する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、施工および管理等に役立てるものである。阪神高速においては、地震時のシミュレーションによる被害予測や、通行可否の判断等に役立てるための検討を進めている¹⁰⁾。

UFC 床版は、引張強度が非常に高いという特徴がある。そのため、RC 床版に比べて突発事象発生時の損傷が小さくなり、外観からの判断が困難になる可能性がある。本検討では、維持管理シナリオに示す積荷落下や車両衝突、地震等、突発事象が生じた場合の通行止めに対して、デジタルツインを用い UFC 床版の安全性を診断し、迅速に供用再開判断することを目的としている。

4-1 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 モデルの適用要素は表-8 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-11)。また、舗装および遮音壁は質量のみを考慮した。なお、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-9)。

4-2 供用再開判断の検討

デジタルツインを活用することで、UFC 床版に変状が生じた際の影響をシミュレーションすることができる。そこで、本検討では、突発事象等が生じた際にも比較的簡易に計測が可能である加速度に着目し、供用再開判断に用いる閾値を計測された加速度に基づく固有振動数で定義することとした。検討イメージは図-12 に示すとおりであり、具体的には、以下に示す (A)、(B) の関係

より供用再開判断を行うものである。

- (A) 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
- (B) 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

表-8 FEM モデルの適用要素

対象部材	適用要素
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

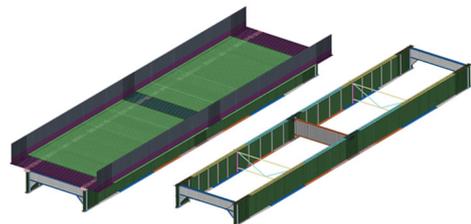


図-11 構築した FEM モデル

表-9 解析モデルの妥当性

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

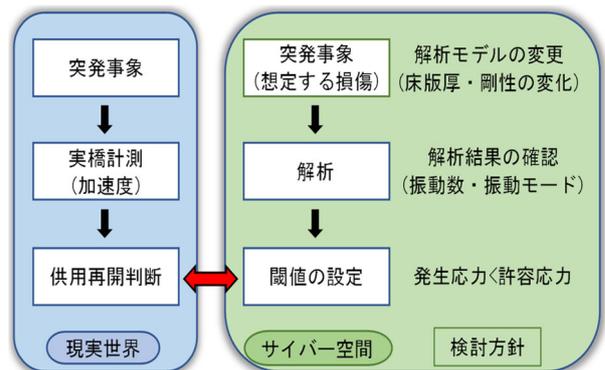


図-12 供用再開判断の検討方針

5. まとめ

UFC 床版の先進的な維持管理手法の構築に関するまとめを下記に示す。

- ・ 損傷を模擬したテスト床版を用い検査手法を試行し、UFC 床版への適用可能性を見出した。

- ・微細なひび割れに対する補修の効果と施工の確実性を確認し、適用可能な材料を見出した。
 - ・供用再開判断の検討において、解析と実測値を比較することで、解析の妥当性を確認した。
- 今後は、UFC 床版に想定される変状を明確化しこれらの検討を継続することで、維持管理の確実性を更に高めることができると考えている。

謝辞：本検討では、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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 渡邊ら：超高強度繊維補強コンクリートの海洋環境暴露後の疲労特性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol39, No.1, pp.217-222, 2017.
- 8) 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, 2006.11.
- 9) 佐藤ら：UFC に施したひび割れ補修の鋼繊維腐食抵抗性に関する実験的検討，土木学会第 61 回年次学術講演会，V-357, 2006.9.
- 10) 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.

STUDY FOR ADVANCED MAINTENANCE AND MANAGEMENT OF UFC DECK SLABS

Yuta SAITO, Shigekazu MORI, Tomoaki SATO, Takashi KOSAKA and Akiyoshi MATSUI

UFC deck slabs using ultra-high-strength fiber-reinforced concrete are designed to prevent cracks from occurring under normal actions during service. However, in terms of maintenance and management, any actions not considered in the design standards can cause damage to UFC deck slabs. This study was aimed to establish a reliable and advanced maintenance and management method for UFC deck slabs, by investigating a maintenance and management scenario which consisted of the impacts and damage occurring to UFC deck slabs, the examination, inspection and diagnosis of the damage, and the repairs and strengthening to be made. In the study of examination and inspection methods, test deck slabs with artificial damage were prepared to verify the applicability of the inspection and non-destructive testing. In the study of repair and strengthening methods, various experiments were conducted to verify the performance of crack repair materials. In addition, in the study of decision making for resumption of road service, we tried the use of digital twins and created a sophisticated FEM model for the bridges with flat UFC deck slabs located at the Tamade Entrance/Exit.

齋藤 佑太



前 (一財)阪神高速
先進技術研究所
調査研究部

Yuta SAITO

森 重和



(一財)阪神高速先進
技術研究所
調査研究部

Shigekazu MORI

佐藤 知明



(一財)阪神高速先進
技術研究所
調査研究部

Tomoaki SATO

小坂 崇



阪神高速道路株式会社
技術部

Takashi KOSAKA

松井 章能



前 阪神高速道路株式
会社
建設事業本部
神戸建設部

Akiyoshi MATSUI