

報告

鋼橋 RC 床版の内部変状と健全性把握手法の検証

河田直樹\*, 松井俊吾\*\*, 松井隆行\*\*\*, 梨本竜太郎\*\*\*\*

\*博(工), 西日本高速道路エンジニアリング関西(株), 構造技術部 (〒567-0032 大阪府茨木市駅前町 5-26)

\*\*西日本高速道路エンジニアリング関西(株), 構造技術部 (〒567-0032 大阪府茨木市駅前町 5-26)

\*\*\*西日本高速道路(株), 関西支社, 保全サービス事業部 (〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町 1-13)

\*\*\*\*(株)フジエンジニアリング, 調査設計部 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 5-5-28)

西日本高速道路では、特定更新事業の一環として鋼橋の床版取替えを進めているが、外観からは把握できない上面増厚部のはく離や内部鉄筋の腐食、また、それに伴う水平ひび割れが発生していることがわかってきている。今後の特定更新事業を計画的に進めるため、撤去床版に対して行った衝撃弾性波や FWD 測定などの計測、また床版内部の塩分調査の結果について報告するとともに、そこから得られた知見について報告する。

キーワード：床版、上面増厚、衝撃弾性波探査、FWD、赤外線サーモグラフィ

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたわが国の社会インフラは今後の老朽化が急速に進み、適切な時期に、適切な方法で維持管理・更新を行うことが求められている。特に道路橋のRC床版は、高度経済成長期の設計基準は床版厚が薄く、鉄筋量も少ない理由に加え、雨水や凍結防止剤の影響を受ける過酷な条件下にされされていることから、疲労や鉄筋腐食等に伴うひび割れなどの変状が多く確認されている。そのような変状は耐力不足により走行安全性が確保できなくなることから、高速道路では従来から鋼繊維補強コンクリートを用いた床版上面増厚補強を実施してきた。しかしながら、そのような補強を実施しても再劣化が発生する事象もあることから、近年では床版リニューアルプロジェクトとして、従来のRC床版から、より高耐久なPCプレキャスト床版に取り替える大規模更新事業に着手している。今後このプロジェクトを効率的・計画的に進める上で、取替え対象橋梁を判断するため、RC床版の健全度を定量的に把握すること、また取替え時期を計画する上で、変状要因を推定し余寿命を推定することが急務となっている。

以上の背景から、実際に床版取替えを実施した中国自動車道の市川橋および菅野川橋の既設RC床版に対して、床版内部の塩分調査や内部ひび割れ詳細調査を行うとともに、非破壊による健全性評価手法として、衝撃弾性波探査やFWD測定、また、床版上面評価として赤外線調査を行い、劣化の定量的評価に向けた分析を行った。本論文では、それら得られた結果や知見について報告するものである。

2. 市川橋の床版調査結果と変状要因

2.1 橋梁概要

対象橋梁は昭和50年に架設された非合成鈹桁橋であり、建設時の床版厚210mmに対して、平成15年に鋼繊維補強コンクリートにより60mmの上面増厚補強が実施されている。しかしながら、特に走行車線部は舗装のポットホールが繰り返し発生し、写真-1に示すように舗装および床版上面の修繕を繰り返し実施しなければならない状況

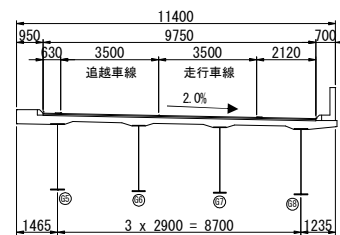


図-1 上部工断面図

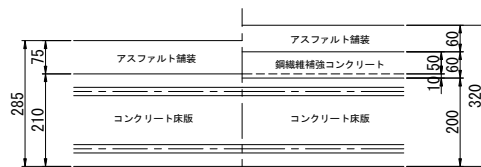


図-2 床版断面図



写真-1 床版取替え前の橋面状況

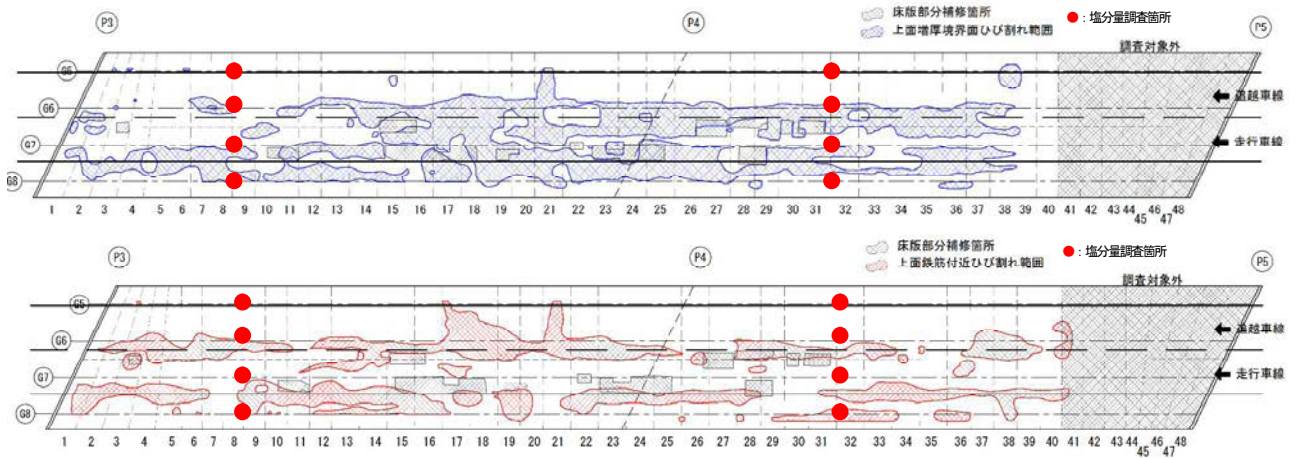


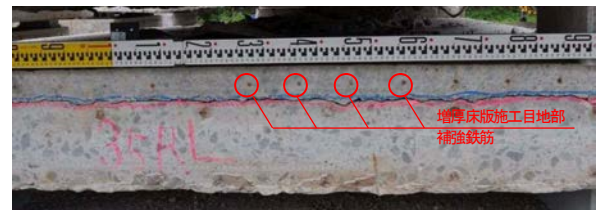
図-3 水平ひび割れ範囲図 (切断面ひび割れから想定)

であった。なお、当該地点の凍結防止剤の散布量は年間18t/kmと比較的多く、また、既往の研究では、床版の疲労の観点から、車両の10ton換算軸数の累積が3,000万軸を超過すると床版の損傷の顕在化につながるとされているが、当該路線の累積等価軸数は5,500万軸と比較的多い路線であり、対象橋梁は耐久性の観点から厳しい環境におかれているといえる。このような床版の環境やポットホールが発生頻度から、今後床版の耐荷力低下が懸念される状況であったことから、プレキャストPC床版への取替えが実施された。

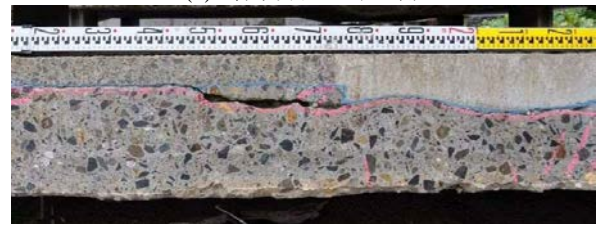
## 2.2 床版内部ひび割れ状況

床版取替えは、既設床版を約2mごとに切断・撤去し順次PC版に取替えられることから、その切出し床版の切断面から、内部鉄筋の腐食やひび割れ状況の確認することができる。切断面の状況を写真-2に示す。(1)は増厚床版が既設床版からはく離れたケースであり、特に走行車線側の床版にこの変状が多く確認された。写真-2(2)は増厚床版断面修復部の、新旧コンクリート界面部にみられるはく離であり、鉛直方向には剥離やひび割れは発生していないが、既設床版側にも水平ひび割れが発生している。断面修復は約1年前に実施されたものであるが、床版の曲げ変形や交通振動の影響から再度ひび割れが発生したものと推定される。既設床版内のひび割れについて、断面修復時から存置していたのか、断面修復後発生したのかは不明であるが、断面補修側のはく離と既設床版側のひび割れは相互に影響していることは想像できる。写真-2(3)は上面鉄筋に沿った水平ひび割れであり、内部の鉄筋は部分的に膨張し、近傍の鉄筋に沿ってはく離が発生している。なお、当該橋梁については、上面側鉄筋の腐食による変状が多く、下面側鉄筋の腐食は軽微であった。

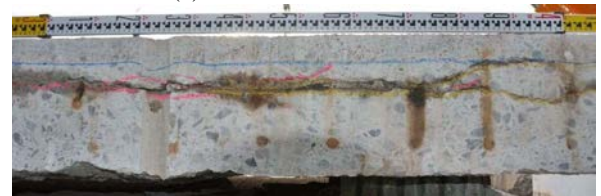
以上の切断面調査から推定できる水平ひび割れが発生している範囲を図-3に示す。増厚界面でのはく離、また、上側鉄筋に沿った水平ひび割れは、走行・追越車線間と、走行車線外側線部に広く発生していることがわ



(1) 増厚界面水平剥離

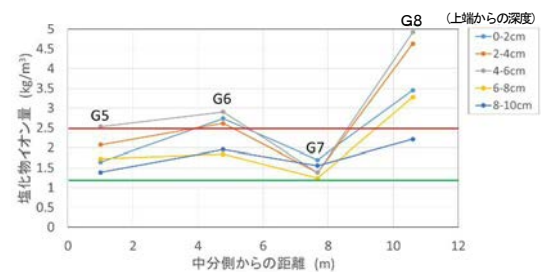


(2) 断面修復部水平剥離

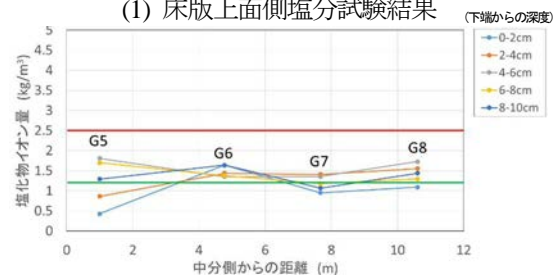


(3) 上側鉄筋近傍水平剥離

写真-2 床版切断面状況



(1) 床版上面側塩分試験結果



(2) 床版下面側塩分試験結果

図-4 床版内部の塩化物イオン量

かる。上面増厚は車線規制内で行うため、走行・追越車線間は施工目地があり、塩分等劣化因子が進入しやすいこと、また、走行車線外側線部は主桁間（床版支間中央）に位置し、床版変形の影響を受けやすいことからはく離が発生し、内部への塩分供給に伴い鉄筋腐食が助長されたものと推測される。

### 2.3 床版内部塩分量調査

床版撤去時の貫通削孔時のコアを利用して、各深度の塩化物イオン量を調査した。調査結果を図-4に示す。採取位置は図-3に示す各桁位置であり、図示以外の径間も含めて4横断面合計16本採取した。横断方向の塩分量分布を把握するため、各深度の塩分量について、桁ごとに平均した数値を示している。同図から、塩化物イオン量は上面側で $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ を超える範囲があり、下面側では概ね $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度であることが確認された。また、塩化物イオン量の分布は上面ほど高いことが確認でき、既設床版上面付近の増厚後深度 $40\sim 60\text{mm}$ 近傍の値が高い傾向がみられる。上面側の塩化物イオン量は、横断勾配が低いG8側の値が高くなっており、床版切断面調査より水平ひび割れが確認された増厚床版施工目地部のG6の値も比較的高い数値を示している。なお、下面側の塩化物イオン量は、全体的に低く、路面からの凍結防止材の影響は上面側と比較し低いことが分かる。

### 2.4 市川橋の変状要因

今回行った市川橋の調査において推定される変状要因は以下のとおりである。

- ① 上面増厚施工後も施工目地から雨水や凍結防止剤が浸入し、長期的に滞水しやすい状況となることから、走行・追越間の界面剥離の助長、および鉄筋腐食が進行した。
- ② 鉄筋腐食とともに、走行車両の通過に伴う振動や床版変形が要因となり、主に走行車線部での水平ひび割れが発生・進展した。
- ③ 部分的な床版補修は実施されてきたが、上面鉄筋付近の塩分量が高い傾向にあり、鉄筋腐食による膨張が進行し、また車両振動の影響から補修材料の剛性差などの影響によって水平ひび割れが発生・拡大した。
- ④ 床版の疲労に伴うせん断損傷はみられず、貫通ひび割れはほとんどないことから、床版下面にかけて塩分が供給されにくく、下面損傷は顕著に発生しなかった。

## 3. 菅野川橋の床版調査結果と変状要因

### 3.1 橋梁概要

同位置路線でありながら、変状形態の異なる菅野川橋についても調査を行い、両橋の違いを確認することとした。菅野川橋は、市川橋と同時期の昭和49年に建設された鉸桁橋であり、図-5および図-6に示すように、

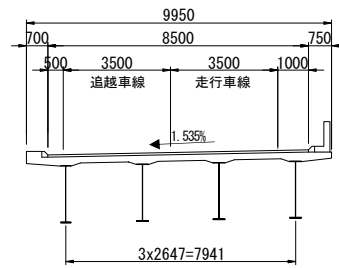


図-5 橋梁断面図

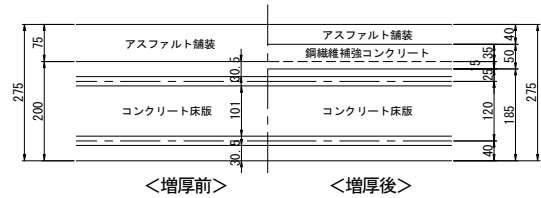
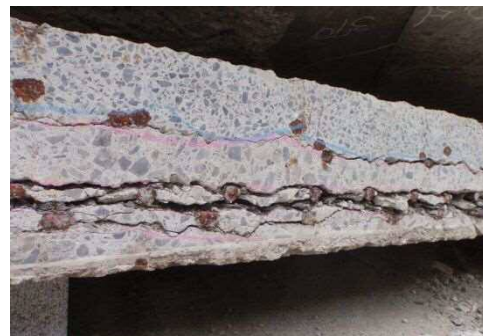


図-6 床版増厚図



(1)床版下面かぶりコンクリートはく落状況



(2) 切断面水平ひび割れ発生状況

写真-3 床版内部劣化状況（切断面）

床版支間は $2.65\text{m}$ 、建設当初の床版厚は $200\text{mm}$ である。平成2年に、鋼繊維補強コンクリートによって上面増厚( $50\text{mm}$ )が施されたが、現況床版下面は写真-3(1)に示すように鉄筋腐食が進行し、かぶりコンクリートが部分的に剥落している状態で、市川橋に比較し下面側の劣化が進行している状況であった。本橋においても耐力不足が懸念されたことから床版取替えが実施された。

### 3.2 床版内部ひび割れ状況

市川橋と同様に、撤去床版の切断面から床版内部ひび割れを把握した。写真-3(2)に切断面のひび割れ状況を示す。床版増厚界面での水平ひび割れも確認できるが、

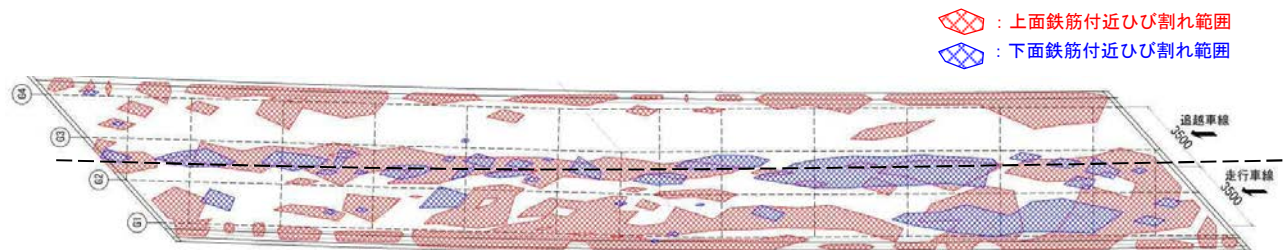


図-7 床版内部ひび割れ図 (床版切断面ひび割れから推定)

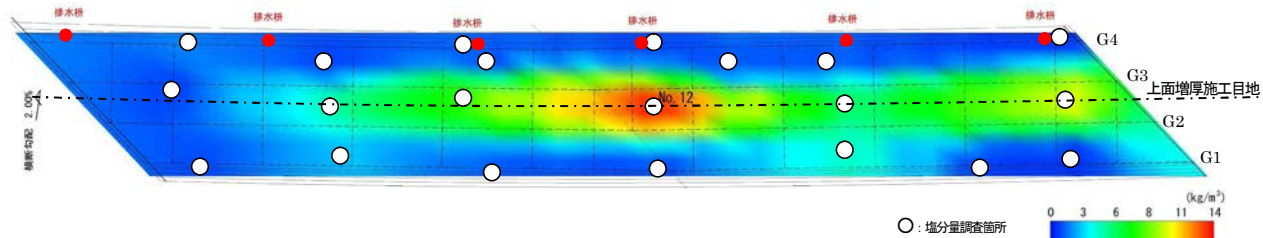


図-8 床版内部塩分量分布図 (下面鉄筋近傍)

下面鉄筋位置に沿った水平ひび割れが顕著に見られた。このような切断面から推定できる内部の剥離範囲を図-7に示す。上側鉄筋と増厚界面のひび割れが混在していることから、上側鉄筋近傍ひび割れとして図化している。同図から、特に上側鉄筋ひび割れは走行車線部で広くみられ、特に主桁間での剥離が多いことがわかる。また、追越・走行間に位置する桁間において下面鉄筋付近の剥離が広くみられ、車両進入直後に位置するG1-G2桁間下面において剥離が発生している。

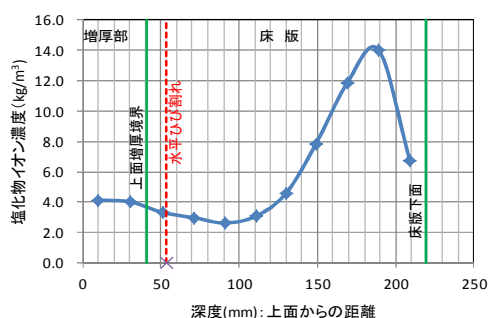


図-9 床版内部塩分量分布 (測点 No.12)

### 3.3 床版内部塩分量調査

床版取替に至った要因を把握するために、図-8に○印で示す21箇所貫通コアを採取し、床版上面から下面まで塩分量を計測した。計測結果のうち、下面鉄筋付近の塩分量分布を図-8に示す。G2-G3主桁間の塩分量が多い傾向にあることが分かり、特にNo.12の箇所では $14\text{kg/m}^3$ に達している。この箇所の深度毎の塩分量は図-9に示すように下面ほど高くなっているが、このような傾向は他の点でも同様の傾向が見られる。今回G2-G3間で塩分量が高くなった要因として、走行・追越車線の施工目地から凍結防止剤を含む塩分が供給されたことによって、G2-G3内部の塩分量が高くなったものと推測される。なお、No.12の採取コアや付近の床版切断面状況から、貫通ひび割れは確認できなかったが、施工目地付近で上面増厚と既設床版間の剥離(水平ひび割れ)が確認できている。既設床版上面の水平ひび割れ部に滞水しやすい状況であり、切断面から把握できなかった貫通ひび割れの影響で、下面付近に塩分が集積したことが要因として推定される。

### 3.4 市川橋との劣化要因の相違

菅野川橋は、上面増厚施工目地からの塩分供給の影響により走行・追越車線間の塩分量が全体に高い傾向を示す一方、市川橋は横断勾配の低い側が高い傾向を示した。

これは、上面増厚施工目地からの塩分供給の程度が異なることによると推定できる。上面増厚施工から市川橋は15年、菅野川橋は28年と経過年数が異なるため、既設床版からの剥離状態や施工目地部の劣化状態に違いがあることが考えられ、上面増厚施工目地からの塩分供給の程度の相違は、上面増厚施工目地部の構造条件による違いも考えられる。切断面調査から、写真-2(1)に示すように目地部には溶接金網が配置されていることが確認できた。施工目地部は主桁間(床版支間中央)に位置しており、曲げ変形の影響や車両振動の影響を受ける箇所であるが、溶接金網の効果により目地に一体性が確保され、塩分が供給されにくい状況になったことが考えられる。

### 4. 非破壊による床版健全度把握方法検討

市川橋や菅野川橋のように、疲労による変状ではなく、内在塩分や凍結防止剤供給による鉄筋腐食や、増厚床版の剥離による変状は、その変状が進行し、コンクリート表面で概観上確認できるまでには時間を要する。特定更新の効率的な実施に向け、床版内部の変状を非破壊で調査する方法について、市川橋および菅野川橋を対象に検証を行うこととした。実施内容は、床版内部ひび割れを検知する方法として、床版下面から衝撃弾性波探査によ

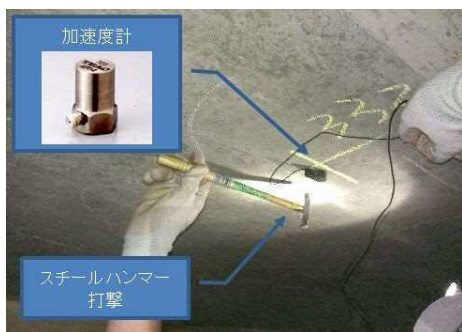


写真-4 衝撃弾性波探査調査状況

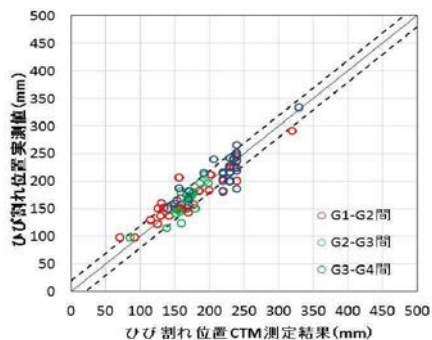


図-10 衝撃弾性波探査結果 (実測値との相関)

る調査<sup>2)</sup>を実施し、前述の床版ひび割れ結果との比較を行った。また、変状による剛性低下を非破壊で検証する方法として、FWD (Falling Weight Deflectometer) 測定について検証を行った。このFWD測定は、路面に錘を落下させた際の舗装表面のたわみ量を、複数点で同時に測定する装置であり、橋梁床版に対して試験を行うことで、床版の健全度評価を試みた研究事例<sup>3)4)</sup>がある。最後に、床版上面の増厚床版の剥離や上側鉄筋近傍の水平ひび割れを把握するために、赤外線サーモグラフィを用いた検知精度の検証を行った。

#### 4.1 衝撃弾性波探査による劣化状況の把握

撤去床版の切断面からひび割れの詳細が確認できることから、菅野川橋の撤去前の床版に対して、切断箇所を対象に約100点の衝撃弾性波探査を行い、ひび割れ検出の検証を行った。衝撃弾性波探査は、写真-4に示すように、小型ハンマもしくは鋼球ハンマを打撃し、ひび割れからの多重反射波を周波数分析することによって、ひび割れの有無・位置を推定するものである。床版下面から探査し、ひび割れ位置を推定した深さを、切断面から把握できる深度と比較して図-10にまとめる。同図には±20mmの範囲を破線で示しているが、概ねその範囲内で推定できており、一定の誤差の範囲内で精度は確保できていると考えられる。なお、水平ひび割れが上側鉄筋と下側鉄筋など2層存在する場合はその検知は難しく、打撃側に近いひび割れを検知しているので注意が必要である。また、舗装上面からも同様の探査を行ったが、アスファルト舗装内部での反射や上面増厚の影響によりばらつきが大きくなる傾向となった。

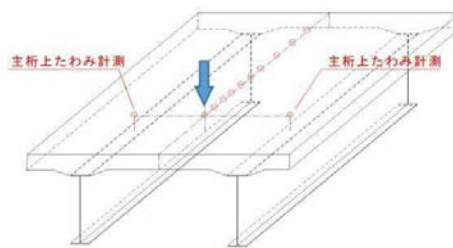


図-11 測点配置概要図

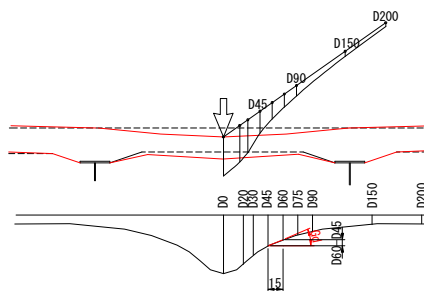


図-12 床版たわみ勾配図

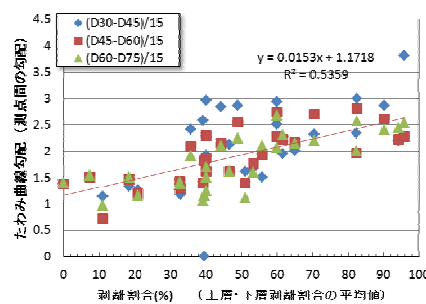
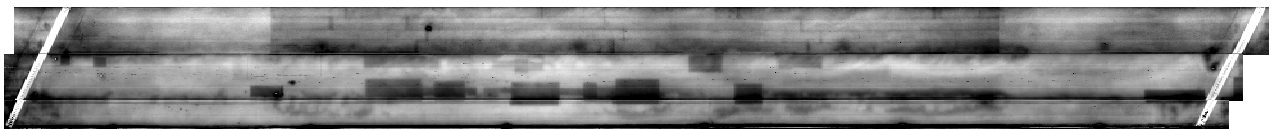


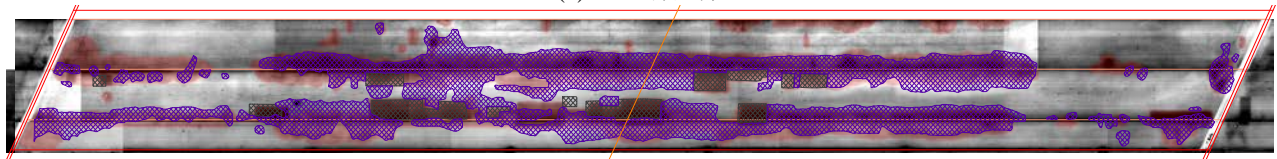
図-13 床版剥離割合と測定結果の相関

#### 4.2 FWD測定による劣化状況把握

床版内部のひび割れ位置が把握できていることから、菅野川橋を対象に、この層状剥離とFWD測定結果の相関について検証した。載荷点は主桁と横桁に囲まれた床版パネルの中央とし、主桁に対する床版の相対たわみを評価するため、図-11に示すように隣接する主桁上にも測点を配置し、床版の相対たわみ値を算定した。なお、衝撃荷重はコンクリート舗装に準拠し98kNとした。結果の評価方法として、板の純曲げを検討する際に着目する曲率を適用する研究もされている<sup>4)</sup>が、ここでは簡便のため、この測定によって得られた結果のうち、D30～D75の各測点間のたわみ勾配<sup>3)</sup>に着目するものとした。載荷点ごとに算定した結果を図-13に示す。比較対象とした横軸の床版剥離割合は、FWD荷重載荷点の1m×1mの範囲における剥離の割合とした。図-13から、剥離割合が増加に伴いたわみ勾配も大きくなる傾向となるが、今回の評価手法では、床版の健全性を定量的に評価する目的に対してはばらつきが大きい結果となった。この要因として、今回の橋梁は上面増厚が施されており、内部損傷の違いが剛性低下となって現れにくいことが考えられる。



(1) 赤外線画像



(2) 打音調査との比較結果  
図-14 赤外線調査結果

XXXX : 打音変状部  
 : 赤外線変状判定部

#### 4.3 赤外線サーモグラフィーによる劣化状況把握

舗装上面から床版の変状を把握する手法として、変状部での温度変化を検出する赤外線サーモグラフィーを利用する方法がある。今回写真-5 に示す車載式赤外線サーモグラフィーによる調査を行い、変状部の検出精度検証を行った。対象橋梁は主に上面側の変状が顕著に現れた市川橋とし、雨水の影響のない日に、気温が低下し始める深夜に調査を行った。舗装上面から撮影した赤外線画像を図-14(1)に示す。パーシャルスキャン技術やスタッキング処理などの技術を用いて、赤外線画像や高精度化処理を行ったものである。車載式赤外線調査の精度検証は、舗装切削後に床版上面たたき点検を実施し、たたき点検により浮き音が確認された箇所と、赤外線調査から周囲との温度相違が見られ異常と推定される箇所とその結果との比較することとした。両調査から異常判定された範囲を比較して図-14(2)に示す。なお、打音調査結果はほぼ図-3 の水平ひび割れ範囲図とほぼ一致している。たたき調査による変状範囲と赤外線調査結果の比較の結果、変状の位置は概ね一致しており、床版部変状を捉えることができていると思われる。また、表-1 に示すように変状の割合についても10%の誤差で納まっており、精度良く床版の変状を抽出できることが確認できた。なお、赤外線調査は調査対象が乾燥し、また、気温日較差が7℃以上の気温条件が望ましいなど、周囲の環境条件の影響を受けることから注意が必要である。



写真-5 車載式赤外線調査装置  
表-1 赤外線調査精度検証結果

		変状 (打音調査)		赤外線 調査
P3-P4	調査面積	m <sup>2</sup>	412.8	416.6
	変状面積	m <sup>2</sup>	134.5	173.2
	変状割合	%	33	42
P4-P5	調査面積	m <sup>2</sup>	417.7	418.3
	変状面積	m <sup>2</sup>	149.3	155.8
	変状割合	%	36	37

- ・FWD による床版劣化評価を試みたが、上面増厚効果により剛性低下が顕著に現れず、健全度評価指標としての適用は難しいことがわかった。
- ・赤外線調査の結果、概ねたたき調査結果による変状範囲を推定することができた。

今回得られた変状要因や非破壊調査に関する知見を活用することで床版変状を効率的に把握し、計画的に特定更新事業を進める所存である。

#### 参考文献

- 1) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書，2014.1.26
- 2) 例えば 一色智彦，鈴木真，藤原理絵，鎌田敏郎：供用中の鋼板接着補強 RC 床版における弾性波による内部損傷の非破壊調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.2, pp.1309-1314, 2018.7
- 3) 例えば 山口恭平，早坂洋平，曾田信雄，大西弘志：FWD を用いた既設 RC 床版の健全度評価手法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.61A, pp.1062-1072, 2015.3
- 4) 横山広，牧祐之，角間恒，深田幸史，榎谷浩：道路橋床版の曲率を用いた劣化度評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.64A, pp.551-559, 2018.3

(2018年7月20日受付)

#### 5. まとめ

中国自動車道の上面増厚補強された鋼板桁橋の2橋について、RC床版の詳細調査を行うとともに、非破壊調査の検証を行った結果、以下の事項が確認できた。

- ・大型車交通量の多い走行車線においては、桁間部での床版変形や振動の影響を受け、増厚界面や上側鉄筋に沿った水平ひび割れが発生しやすい。
- ・車線毎に分割施工して上面増厚補強された場合、凍結防止剤を散布する橋梁においては打ち継ぎ部から塩分が供給され、車線間の鋼材腐食が進行する。
- ・衝撃弾性波による内部ひび割れ推定の結果、深度方向に±20mm程度のばらつきの範囲内で水平ひび割れは検知できる。