

論文

鋼板接着補強した RC 床版の調査点検手法に関する実験的研究

強瀬義輝*, 宮原史**, 水口知樹*, 石尾真理***, 玉越隆史****

*修士, 交流研究員, 国土技術政策総合研究所, 橋梁研究室 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1 番地)

**修士, 研究官, 国土技術政策総合研究所, 橋梁研究室 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1 番地)

***学士, 国土技術政策総合研究所, 企画部企画課 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1 番地)

****修士, 室長, 国土技術政策総合研究所, 橋梁研究室 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1 番地)

鋼板接着補強した RC 床版の内部変状を舗装や鋼板を撤去することなく非破壊で調査できる手法の提案を目的として, 非破壊検査技術のうち, 汎用性の高い打音法と電磁波レーダー法を対象に検出性能の実証実験を行った. その結果, 舗装上からの適用条件においても, 内部変状によって非破壊検査結果に特徴が現れることが確認された. また, 検出性能結果を踏まえ, 内部変状検知のための実務手法を提案した.

キーワード: RC 床版, 鋼板接着補強, 非破壊検査, 点検手法

1. はじめに

近年, 鋼板接着工法で補強された床版 (以下「鋼板補強床版」という.) において, 鋼板ごと床版が抜け落ちる事故が報告された¹⁾ (図-1). 鋼板接着工法は, 死荷重増を少なく抑えつつ高い補強効果が見込めること^{2,3)}, 交通を規制せず橋梁下面のみから施工できることなどの利点から実績も多い. 一方で, 舗装のある上面のみならず, 床版下面も補強鋼板に覆われ, RC 床版の状態を直接視認できなくなる. よって, 近接目視点検を基本とする定期点検⁴⁾時には舗装や補強鋼板の状態から間接的に RC 床版の状態を推測せざるを得ず, 十分な状態評価が出来ていない可能性があることが課題となっている.

筆者らは鋼板補強床版を対象に, 汎用的な非破壊検査技術による内部変状検知の適用性検証を行った. 本稿では, 非破壊検査技術のうち打音法と電磁波レーダー法を適用した調査結果について報告するとともに, その結果を踏まえ, 内部変状検知のための実務手法を提案する.

2. 検討対象とする鋼板補強床版の内部変状

鋼板補強床版でみられる代表的な内部変状として, 床版コンクリートの水平ひびわれや貫通ひびわれ, 舗装直下の床版コンクリートの土砂化, 鋼板のうきがある¹⁾ (図-2).

ひびわれや土砂化は床版の有効断面が減少していくため, 床版の耐力が急速に失われていき, 最終的には通行車両の荷重によって床版の抜け落ちに至る危険性がある現象であるが, 検知手法は確立されていない. 鋼板の

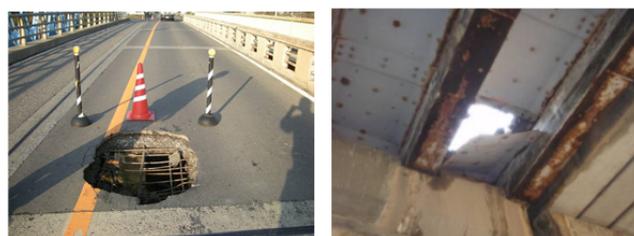


図-1 鋼板接着床版の抜け落ち事例



水平ひびわれ

土砂化



貫通ひびわれ

鋼板のうき

図-2 鋼板補強床版にみられる内部変状の例

うきは, その範囲をハンマー等によるたたき検査で比較的容易に検知できることが確認されている³⁾. そこで, 本検討では内部変状として, 床版上面で生じる土砂化と床版コンクリート内部に生じた水平ひびわれによるうきを検知対象とした.

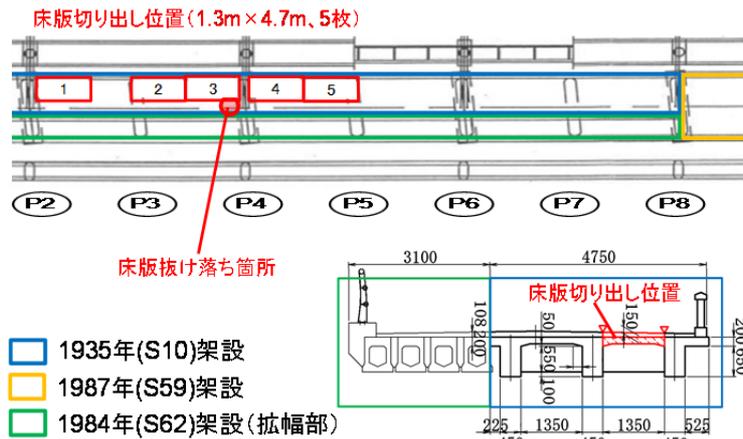


図-3 床版切り出し位置

3 調査内容

床版の外観には現れない異常を把握する方法として、重錘を落下させ、そのときのたわみ量を測定する手法⁵⁾がある。この方法では、測定されたたわみ量を理論上のたわみ量や他のパネルと比較することで、異常の有無や程度が評価されるが、床版にどのような内部変状が生じているのかを特定することは困難である。

一方、RC床版の内部変状を特定するための各種非破壊検査技術に関しては、模擬損傷供試体を用いた研究^{例え ば 6),7)}、特殊な装置を用いた研究⁸⁾等の報告がある。しかし、RC床版の下面に鋼板がある合成床版や鋼板補強床版を対象として、汎用性のある非破壊検査技術を用いて内部変状検出を試みた研究は限られ、床版下面(鋼板面)からの適用を想定した研究^{例え ば 9)}や舗装を撤去した条件で床版上面から適用した研究^{例え ば 10),11)}はあるものの、実際の調査で想定される舗装上からの適用に関する研究は少ない。

これらを踏まえて、筆者らは実際の供用条件下で損傷を受けた鋼板補強床版を対象として、汎用性のある非破壊検査技術を用いた舗装上からの内部変状検知の適用性の検証を行った。

3.1 調査対象

調査に用いた供試体は、供用中に床版が抜け落ちた橋梁から切り出した。切り出し位置および橋梁の諸元を図-3、表-1に示す。本橋は供用後約45年で鋼板接着補強が行われ、補強後約30年で鋼板ごと床版に抜け落ちが発生した。抜け落ちた箇所の床版コンクリートは著しく劣化して土砂化しており、補強鋼板の内面が腐食していたことから床版内部への雨水の浸入もあったと考えられる。なお、床版上面に防水工は施工されていなかった。調査対象とした供試体は、抜け落ち箇所と荷重履歴などの条件が類似していると考えられる抜け落ち箇所近傍から選定し、舗装の損傷程度が異なる5パネルを鋼板ごと切り出した。

表-1 切り出しを行った橋梁諸元

供用年	昭和10年(1935年)
適用示方書	大正15年
形式	RC単純T桁橋(3主桁)×8連
支間長	10.0m
床版補強	鋼板接着(昭和56年~58年)
床版厚	t=150mm(鋼板接着t=4.5mm)
舗装	アスファルト舗装厚 t=100mm

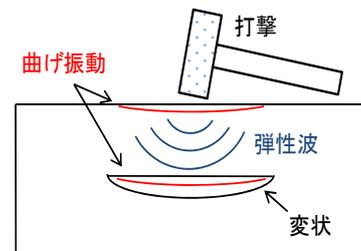


図-4 打撃音の発生概念

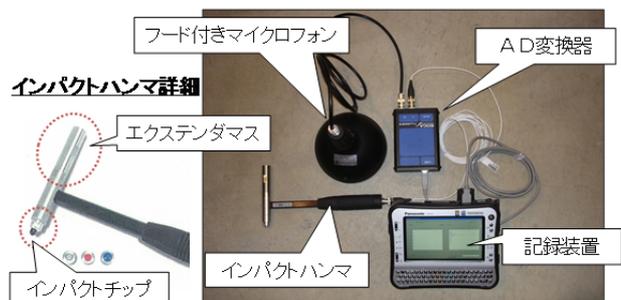


図-5 使用した打音機器

表-2 使用した打音機器の仕様

項目	名称	仕様		備考
		周波数範囲	8kHz	
打撃	インパクトハンマ	感度	2.2mV/N	
		質量	0.16kg	
	エクステンダマス	質量	75g	
打撃音測定	コンデンサマイク	周波数範囲	20Hz~10kHz	特殊フード付
		音圧感度	-36dBV/Pa	
		ダイナミックレンジ	21~135dB	

3.2 適用した非破壊検査技術の概要と調査方法

本検討では、汎用性が高く原理的にも土砂化やうき等の検出が有力と考えられた打音法と電磁波レーダー法の2手法を適用した。

(1) 打音法

打音法¹²⁾は、構造物の表面を打撃したときに生じる音を音響機器によって測定する方法である。部材等の内部に空隙や水平ひびわれなどの変状があると、打撃に対して部材の一部に曲げ振動が生じる(図-4)。同じ条件での打撃を行った場合、振動する範囲の大きさ等に応じて振動振幅に違いが生じる。

本検討では、コンクリート表面を直接打撃する方法で内部変状の検知に実績のある機器¹³⁾を用いた(図-5、表-2)。打撃に用いるインパクトハンマには、舗装上か

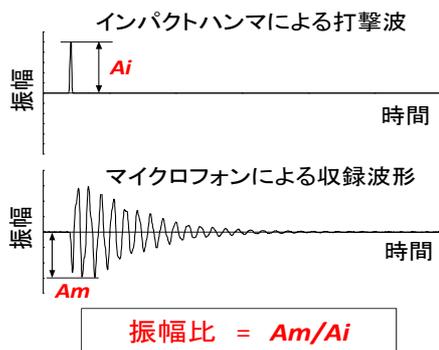


図-6 振幅比の算定

らの打撃であることを考慮し、付属のエクステンダマス（付加重錘）を装着して、より大きな打撃を与えられるようにした。入力する周波数成分が測定結果に与える影響を確認するため、打撃先端部にあるインパクトチップは、周波数範囲が 8kHz 程度であるメタルチップと、それよりも狭い周波数範囲となるゴムチップの 2 種類を使用した。測点は幅員方向、橋軸方向ともに 20cm 間隔の 1 パネル 110 点とし、フード付きマイクロフォンは、インパクトハンマによる打撃点から 1cm 程度離れた位置にセットした。

調査結果は、打撃音の大きさ(振幅)の相対差に着目し、入力度合の違いの影響を除くために振幅比（マイクロフォンで記録された打撃音の最大振幅値 Am をインパルスハンマでの打撃による加力最大振幅値 Ai で除した値）で整理を行った（図-6）。

(2) 電磁波レーダー法

電磁波レーダー法は、電磁波が比誘電率の異なる物質（舗装、鋼材、空洞等）との境界で反射する性質に着目し、往復の伝搬時間や電磁波の強弱から、反射源の距離や物性を推定するものである(図-7)。鋼板補強床版では、土砂化や水平ひびわれによるうきの発生部で床版コンクリートに密度変化などによる物質特性の異なる境界が出現すると考えられるため、電磁波レーダーでこれら内部変状を検知できる可能性がある。

本検討で用いた機器を図-8、表-3 に示す。測定は、アスファルト舗装面から橋軸方向に行い、200mm 間隔で 1 パネル 5 測線とした。アンテナ周波数は、一般的な床版全厚で内部変状を検知できるかどうかの確認も行うよう、厚さ 20cm 程度までが調査可能とされる 2.6GHz のほか、1.6GHz(30cm 程度まで)、900MHz (60cm 程度まで) の 3 種類を使用した。

4. 調査結果

非破壊検査の結果の検証のために、非破壊検査終了後に供試体の舗装を撤去し、外観目視により土砂化範囲を特定し、たたき検査によってその他の内部変状の推定を行った。たたき検査で異音が確認された位置は、水平ひ

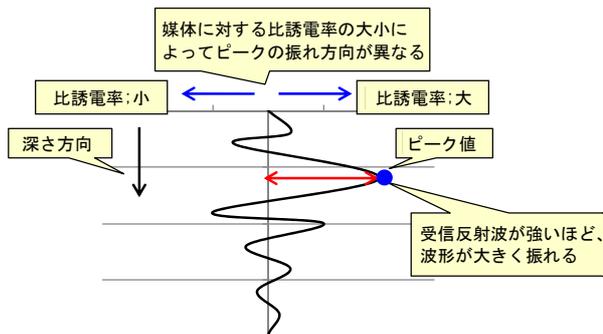


図-7 反射波形の例

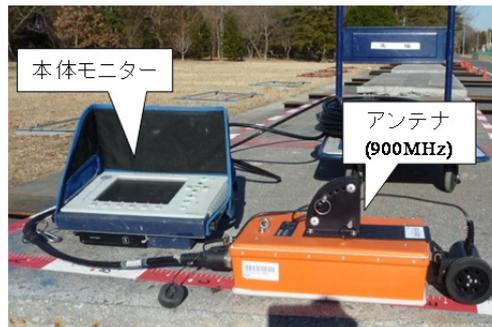
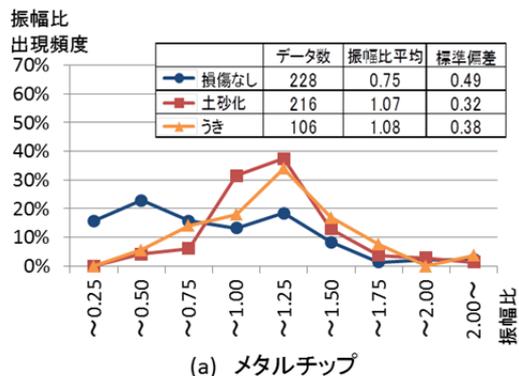


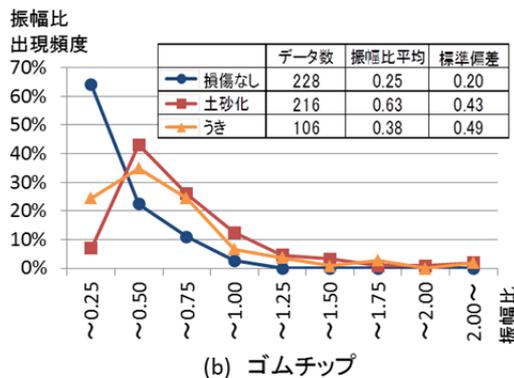
図-8 使用した電磁波レーダー機器

表-3 使用した電磁波レーダー機器の仕様

項目	仕様
使用機材	地下・鉄筋レーダー探索システム SIR-3000
機材寸法(アンテナ別途)	315 × 220 × 105mm
アンテナ周波数	900MHz、1.6GHz、2.6GHzの3種類



(a) メタルチップ



(b) ゴムチップ

図-9 損傷状況別の振幅比出現頻度

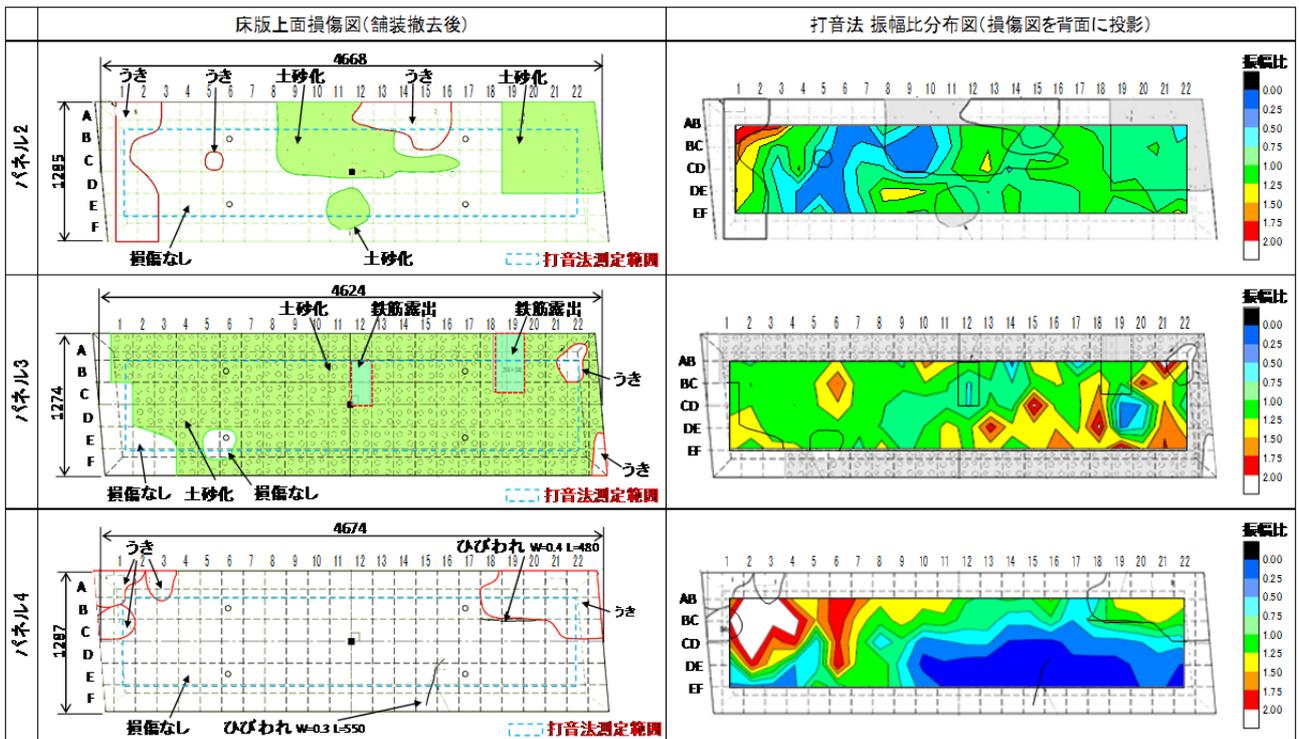


図-10 床版上面損傷図と打音法による振幅比分布図（メタルチップ）

びわれの発生により床版コンクリート内部に空隙がある可能性が高いと判断し、検証ではその範囲をうき発生箇所として扱った。

4.1 打音法による内部変状調査

図-9 に、舗装を除去して推定した損傷状況別に整理した振幅比（5 パネル分 550 測点）の出現頻度を示す。グラフの縦軸に示す振幅比出現頻度は損傷状況毎の値である。ばらつきはあるものの、いずれのチップも損傷の確認された位置では、特定の振幅比区分で頻度のピークが現れる分布形となった。一方、損傷の確認されない位置では、メタルチップでは頻度に明確なピークは見られず、ゴムチップでは振幅比が小さくなるほど頻度は多くなる結果となった。両者の分布の差にはチップの違いに起因する入力される打撃振動の特性の違いが影響している可能性があると考えられるが詳細は不明である。なお、ゴムチップのものはメタルチップと比較し、全体的に振幅比が小さく出る傾向が見られた。

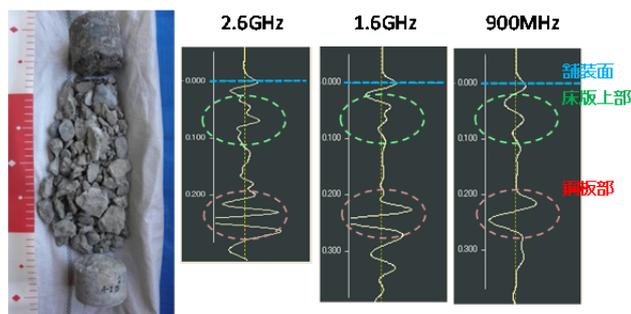
図-10 に調査を行った 5 パネルの内、床版損傷程度の異なる 3 パネルの床版上面損傷図と、メタルチップの場合の振幅比分布図を示す。振幅比と損傷との関係を明確にするため、分布図中には損傷図を投影している。なお、分布図は各測点の振幅比を線形補完して等値線を描画したものである。ここでは、図-9(a)において、損傷の有無による頻度が逆転する振幅比が 0.75 程度であることから、分布図の評価はこの数値を閾値として行うこととした。

全面に土砂化があるパネル 3 では、土砂化範囲の多くで 0.75 以上の振幅比が計測されている。一方、損傷がほ

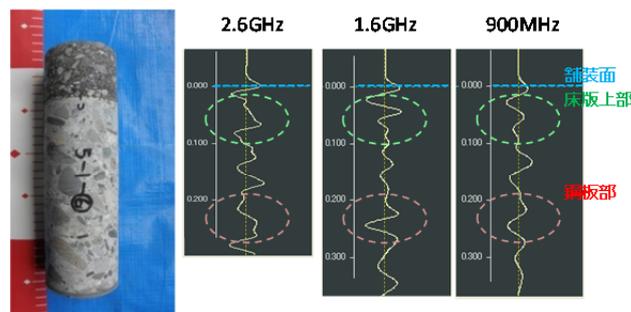
んど確認されないパネル 4 では振幅比 0.75 未満の範囲が広がっている。損傷がない箇所と土砂化、うきが混在しているパネル 2 では、位置が完全に一致していないものの土砂化やうきの範囲では振幅比が 0.75 以上の点が多く、振幅比が 0.75 を下回る点は損傷が少ない位置に一致している。

このように、土砂化やうきの存在により舗装上からの打音により得られる振幅比の出現頻度は特定の区分でピークが現れる分布形となる特徴があり、また、土砂化やうきの範囲の多くの点で、メタルチップを用いた場合の振幅比は 0.75 以上と測定されていることを確認することができた。適切な方法で打音を行い、その結果を健全部の結果と比較することで土砂化やうきを検知できる可能性があるものと考えられる。また、損傷の確認されない位置では振幅比が小さくなるほど相対的に検出頻度が多くなるなどの傾向を定量的に明らかにすることで、評価の閾値を適宜変更して、検査に要求される検出レベル（信頼性）に応じた判定結果を得ることも可能と考えられる。

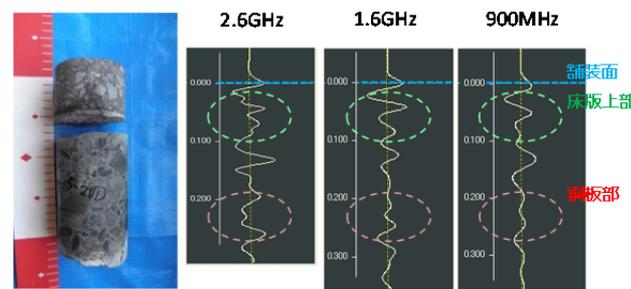
なお、本検討では床版を解体しての損傷状況の直接確認をしておらず、舗装除去後の外観とたたき検査で推定した損傷状況との対比を行った。検出性能の見極めには推定結果と実際の損傷の関係をより厳密に対比させることが必要である。また、振幅比の絶対値や損傷の有無に対応した振幅比の変化の感度は、床版コンクリートの種類や強度によっても異なる可能性があり、床版の各種条件と変状検知の信頼性を明らかにするためにはさらなるデータの蓄積が必要である。



(a) コア①(パネル3): 床版上面土砂化箇所



(b) コア②(パネル4): 健全箇所



(c) コア③(パネル5): うき箇所

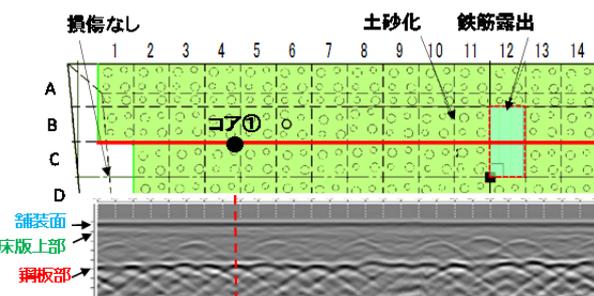
図-11 コア写真と反射波形図

4.2 電磁波レーダー法による内部変状調査

調査を行った5パネルの内、床版上面の損傷状況に違いのある代表的な3パネル(全面に土砂化があるパネル3, 損傷がほとんど確認されないパネル4, 一部にうきがあるパネル5)について調査結果を述べる。

図-11にコア写真と、3種類のアンテナ周波数による反射波形を、舗装撤去後の目視とたたき検査で確認した損傷状況別に示す。電磁波レーダー法のアンテナ周波数は、一般的に周波数が大きいほど小さな対象物を捉えることが可能であるが、減衰しやすくなると言われている。床版上面が土砂化していたコア①では、床版上部と鋼板位置に明瞭なピークが見られる。コア②③では①では明瞭な波が現れない中間部でも明瞭な波が現れ、特に2.6GHzと900MHzでは鋼板位置に対応する波よりも大きな波が現れている。鉄筋の影響の他、2.6GHzでの測定では、調査対象とした床版は全厚が260mmであったことから、鋼板からの電磁波の跳ね返りを捉えられていない可能性も考えられる。

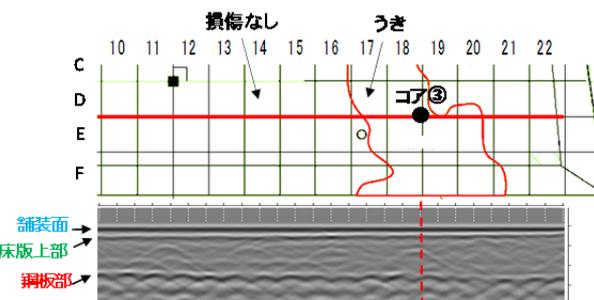
各コアで鋼板位置に明瞭な反射波形が得られた



(a) パネル3,Line.BC (1.6GHz)



(b) パネル4,Line.BC (1.6GHz)



(c) パネル5,Line.DE (1.6GHz)

図-12 床版上面損傷図と反射断面図 (1.6GHz)

1.6GHzの結果から、次のことが言える。

- 床版上部での反射波形は、土砂化しているコア①のみコア②③と比較して突出するピークがなく不明瞭で、振幅も小さくなる傾向がみられる。土砂化によってアスファルトとコンクリートの境界が不明瞭となり、電磁波が反射しにくくなったためと考えられる。
- 鋼板部の反射波は、床版上部に対応する反射波とは逆に、土砂化しているコア①はコア②③より明瞭かつ振幅も大きい結果となっている。コア①では土砂化によりアスファルトとコンクリートの境界での反射が少なくなったことで、電磁波が鋼板部まで強く届き、かつ、強く戻ってくることや、土砂化で空隙が多く含まれる領域があることが電磁波の減衰などの伝搬特性に相違を生じさせるなどの影響を及ぼした可能性がある。

なお、上記2つの反射波形の大小の傾向は、図-12に示す反射断面図において、コントラストの違いとしても確認できる。

- 健全箇所とうき箇所では測定結果に明確な差異は現れなかった。

以上のように、舗装上から電磁波レーダー法を用いて内部変状を把握する場合には、土砂化の有無が反射波形に突出するピークの有無や振幅の大小などの相違として検出できる可能性が高い。測定結果を土砂化が無い健全全部のものと比較することによって、RC床版上面に土砂化が拡がっていることを舗装上から検知できる可能性がある。

5. 内部変状検知の実務手法の提案

実橋への舗装上から調査を実施することを想定して舗装上から打音法と電磁波レーダー法の適用性を検討した結果、本検討での条件下において内部変状の有無によって検査結果に違いが現れ、健全全部と損傷部の調査結果の相対的な比較により内部変状の検知の可能性があることが確認できた。

実橋では、RC床版はすべての箇所で一様に損傷を受けるのではなく、損傷が進行している箇所と比較的損傷が少なく健全と思われる箇所が混在していると考えられる。両手法による実験結果を踏まえると、実務において以下のような2段階の調査とすることで、舗装と鋼板によって直接視認できない床版コンクリートの内部変状を全ての舗装を撤去することなく合理的に検知や把握ができる可能性がある。

①舗装上から打音法や電磁波レーダー法により得られた調査結果を、明らかに健全と思われる部位での結果と比較することで、内部変状がある可能性の高い箇所をスクリーニング的に検知する。

②相当の内部損傷が存在する箇所が推定された場合には、その箇所を舗装撤去や破壊検査を含めた様々な追加調査により変状の詳細を確認する。

6. まとめ

床版コンクリートを直接目視できない鋼板補強床版に対して、舗装や鋼板を撤去することなく床版コンクリートの内部変状を検出できる方法について実験的研究を行った。その結果、次の2点を確認した。

(1) 舗装上から打音法を適用した場合、RC床版に存在する土砂化やうきにより、舗装上からの打音による振幅比の出現頻度分布や大小に特徴が現れることが確認した。

(2) 舗装面から電磁波レーダー法を適用した場合、RC床版の土砂化箇所では、床版上部や鋼板部の反射波形に突出するピークの明瞭や振幅の大小に特徴が現れることを確認した。

上記2点の確認した事項を踏まえると、鋼板補強床版に対する打音法や電磁波レーダー法の適用は相対評価による内部変状検知の可能性があると考えられる。このことから、内部変状検知の実務手法として、打音法や電

磁波レーダー法をスクリーニング手法として適用し、相当の内部損傷が存在する箇所が推定された場合には、その箇所を舗装撤去や破壊検査を含めた追加調査を併用し詳細を確認することを提案した。

参考文献

- 1) 玉越隆史, 大久保雅憲, 星野誠, 横井芳輝, 強瀬義輝: 道路橋の定期点検に関する参考資料 (2013年版) - 橋梁損傷事例写真集 -, 国総研料第748号, 2013.7
- 2) 中谷昌一, 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸, 宮崎和彦, 川間重一, 松尾信二: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国総研料第28号, 2002.3
- 3) 佐野正, 山下幸生, 松井繁之, 堀川都志雄, 久利良夫, 新名勉: 浮きを有する鋼板接着補強RC床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.1, pp27-38, 2011.
- 4) 国土交通省道路局国道・防災課: 橋梁定期点検要領, 2014.6
- 5) 関口幹夫, 横山広, 堀川都志雄: リブ付き多層版解析による各種補強床版の実測たわみの評価, 土木学会構造工学論文集, Vo.54A, 2008.3
- 6) 中山和也, 鎌田敏郎, 内田慎也, 大西弘志: 衝撃弾性波法による道路橋RC床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究: コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009.
- 7) 杉山弘晃, 北川真也, 森山守, 木村定雄: 打音法による損傷検知の精度向上のためのインパクト強度の信頼性に関する検討, 土木学会第68回年次学術講演会, 2013.9
- 8) 森田英明, 大野敦弘: スケルカ技術を活用した橋梁床版劣化診断システムの開発と適用, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.
- 9) 西岡啓介, 渡辺健, 伊達重之, 橋本親典: 衝撃弾性波法を用いた鋼-コンクリート合成構造の鋼板下面の空隙検出について, 土木学会第63回年次学術講演会, 2008.9
- 10) 磯光夫, 久保田和徳, 越後滋, 橋吉宏, 伴亨, 歌川紀之: 打音法による合成床版の非破壊検査手法に関する研究, 土木学会第63回年次学術講演会, 2008.9
- 11) 山野達也, 鷹羽新二, 鎌田敏郎, 内田慎也: 鋼コンクリート合成床版モデルを用いた各種非破壊試験法の欠陥検出性能の評価, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9
- 12) 日本非破壊検査協会: コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第3部: 打音法, NDIS 2426-3, 2009
- 13) 歌川紀之, 市野大輔, 伴亨, 森濱和正: 非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究 打音法(その3) 表層部欠陥の検知, 日本非破壊検査協会 平成16年度春季大会, 2004.5