

論文 UHPFRC で上面補修した RC 床版の打継目のインパクトエコー法に基づく品質評価

鶴田 葵^{*1}, 後藤田 心平^{*2}, 沈 力^{*3}, 鎌田 敏郎^{*4}

要旨: 本研究では, UHPFRC により上面補修を施した道路橋 RC 床版を想定し, 舗装・UHPFRC・既設コンクリートの 3 層構造の床版供試体を用いて, 床版の一体性の確認, およびコンクリートと UHPFRC の打継目の模擬欠陥および供試体端部の剥離状況の検出をインパクトエコー法により行う手法について実験的に検討した。その結果, 打継目が健全な場合, 受信波のスペクトルには版厚に相当する縦波共振周波数でピークが認められた。一方, 模擬欠陥および供試体端部に剥離がある場合は, たわみ共振によるピークが確認された。これにより, 舗装上面から UHPFRC と既設コンクリートの打継目の品質を評価できる可能性が示唆された。

キーワード: RC 床版, UHPFRC, 打継目, 非破壊検査, インパクトエコー法

1. はじめに

道路橋 RC 床版の長寿命化対策として, 超高性能繊維補強セメント系複合材料(以下, UHPFRC)を用いて床版上面を打ち替える補修工法¹⁾²⁾が開発されている。本工法では, 緻密で付着が良好な 30~40mm 程度の UHPFRC 層を既設コンクリート上面に打ち継ぐことで, 補修後の床版の一体性や防水性を確保することが可能である。しかしながら現時点においては, UHPFRC 層と既設コンクリートとの打継目の状態を非破壊で把握する方法が未だ確立されていない。したがって, 補修後の床版の性能確認を行う上では, この打継目の品質を定量的に評価できる非破壊試験方法の検討が急務となっている。

上記に適用可能な手法の一つとして, 対象構造物表面での衝撃により弾性波を入力し, その結果として生じる波の多重反射の挙動から内部の状況を推定するインパクトエコー法がある。インパクトエコー法では, 受信波の周波数スペクトル上のピーク位置に基づいて内部欠陥の有無が推定できることから, 健全であることを確認する手段として期待できる。一方で, インパクトエコー法の一般的な適用対象は, 端部からの反射波などの影響を無視できる面的な広さを有する構造物であり, 構造物の端部に近い位置での適用に関する知見は少ない。また, 異種材料で構成された複数層構造への適用についても検討が十分とは言えない。

そこで本研究では, まず, 既設コンクリート上面に UHPFRC を打ち継いだうえで, さらに上面に舗装を施した標準施工による健全供試体を作製した。また, UHPFRC と既設コンクリートの打継目に厚紙などで欠陥を模擬した供試体と, UHPFRC 打設時に散水を行わず端部に剥離が生じる可能性のある供試体を準備した。これらの供試

体に舗装上面からインパクトエコー法による計測を行い, 欠陥の有無等が周波数スペクトルに与える影響について検討し, 本手法による打継目の品質評価が可能かどうかについて実験的に検討した。

2. インパクトエコー法による打継目の品質評価原理

インパクトエコー法の原理³⁾によれば, 版状構造物において表面で衝撃を与えた場合, 表面と底面との間で弾性波の多重反射が生じることによって, 表面での受信波の周波数スペクトルには, 版厚に相当する縦波共振周波数 $f_r(\text{Hz})$ が出現する。本研究では図-1 に示すような舗装, UHPFRC, および既設コンクリートの 3 層からなる供試体を用いており, これらの各層が一体化された供試体では, f_r は式(1)を用いて算出できる。ここで, C_1, C_2, C_3 はそれぞれ舗装, UHPFRC, および既設コンクリートの弾性波伝播速度(m/s)であり, T_1, T_2, T_3 はそれぞれ舗装, UHPFRC, および既設コンクリートの層厚(m)である。

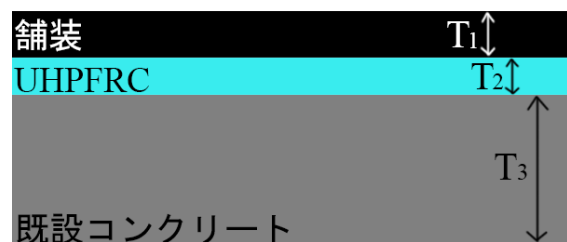


図-1 舗装, UHPFRC, および既設コンクリートの 3 層構造

$$f_r = \frac{1}{\frac{2T_1}{C_1} + \frac{2T_2}{C_2} + \frac{2T_3}{C_3}} \quad (1)$$

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻技術補佐員 学士(工学) (正会員)

*2 大阪大学工学部 地球総合工学科学生

*3 大成建設(株) 技術センター社会基盤技術研究部先端基盤研究室研究員 博士(工学) (正会員)

*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 1 Ad ₁	混和剤 2 Ad ₂
18	4.5	57.0	52.0	309	176	927	859	2.47	0.009

一方で、構造物内部に欠陥がある場合、版厚に相当する縦波共振周波数 f_r に加えて、計測面からの欠陥深さに相当する縦波共振周波数 f_d (Hz) が表れる。本研究において、UHPFRC と既設コンクリートとの境界面の剥離等で縦波の多重反射が生じる場合は、 f_d は式(2)により表される。

$$f_d = \frac{l}{\frac{2T_1}{C_1} + \frac{2T_2}{C_2}} \quad (2)$$

一方、コンクリート構造物内部に剥離等の欠陥がある場合、欠陥深さが小さく面的に広がりを持つケースでは、欠陥上部にあるコンクリート版におけるたわみ共振が発生することがある。このたわみ共振は縦波の多重反射より大きなエネルギーを持つ⁴⁾ため、表面での受信波のスペクトルにおいて、欠陥深さや版厚に相当する縦波共振周波数よりも低周波側にたわみ共振に起因するピークが生じる可能性も考えられる。

3. 供試体概要

UHPFRC と既設コンクリートの打継目の一体性を検討するため、図-2 に示すように 1500×1500×250mm(既設コンクリート 160mm, UHPFRC 40mm, 舗装 50mm)で寸法を同じとした以下に示す3通りの供試体を作製した。本研究では、既設コンクリート表面に散水したのちにUHPFRCを打設したものを健全供試体、既設コンクリート表面に模擬欠陥を設けたうえでUHPFRCを打設したものを模擬欠陥供試体、既設コンクリート表面に散水を行わずにUHPFRCを打設したものを散水なし供試体とした。既設コンクリートの配合を表-1に、UHPFRCの配合を表-2に示す。鋼繊維は直径0.2mm、長さ15mm、引張強度2000N/mm²以上のものを使用した。既設コンクリートおよびUHPFRCの材齢28日での圧縮強度はそれぞれ53.5N/mm²と142N/mm²である。アスファルト舗装には改質アスファルト(FB13)を、舗設の際にはタイヤ付着抑制型乳剤(PKM-T)を使用した。模擬欠陥供試体における模擬欠陥は、図-3(a)に示すようにそれぞれ直径を200mmとした。また、図-3(b)に示す通り、厚紙として紙製の厚さ0.87mm、発泡ウレタンとして厚さ3mmのウレタン系シート、フィルムとして厚さ0.05mmのポリエステルフィルム、グリズとして有機モリブデン化合物を用いた。

表-2 UHPFRC の配合

単位量(kg/m ³)					
	水		結合材	細骨材	鋼繊維
	高性能減水剤	消泡剤			
185	18	1	1108	1129	157 2.0vol.%

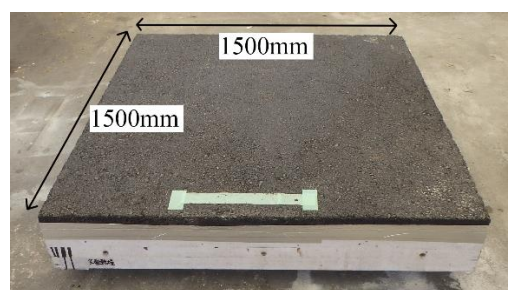
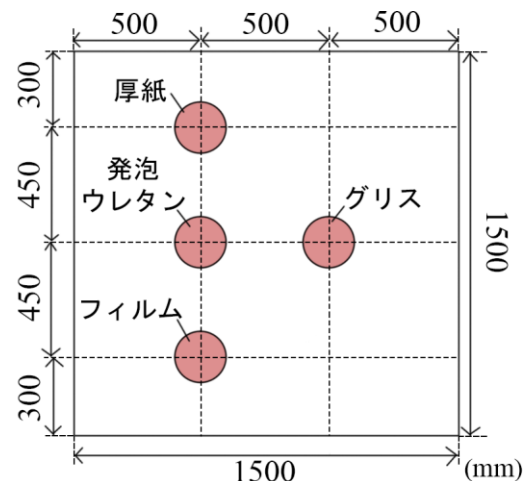
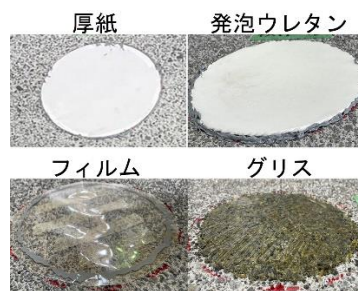


図-2 供試体概要



(a) 模擬欠陥供試体の概要



(b) 模擬欠陥の外観

図-3 模擬欠陥の概要

4. 床版の一体性評価

健全供試体を用いて、床版の一体性を式(1)で評価した。また、測定位置の違いが周波数スペクトルに与える影響について検討した。具体的には、健全供試体中央で得られた周波数スペクトルと中央以外の位置で得られた周波数スペクトルを比較した。

4.1 実験概要

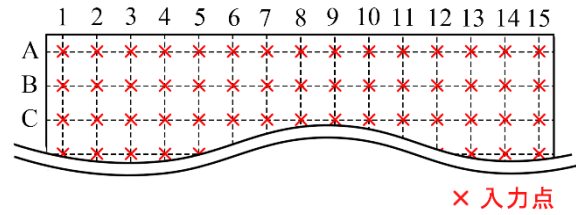
図-4(a), および(b)に示すように供試体端部から50mmの位置に衝撃入力点を設定し、AからOまでのそれぞれの行において1番から15番まで100mm間隔で15点ずつ合計225点を衝撃入力点とした。図-4(b)のように供試体の最外縁部については、供試体端部から25mmの位置に100mm間隔で15点に衝撃入力点を設けた。また、入力-受信位置の概要を図-5に示す。一度の入力に対して上下左右4か所に受信点を設けており、加速度センサをブチル製両面テープで舗装表面に貼り付けて測定を行った。最外縁部での計測では、1つの衝撃入力点に対し左右に50mm離れた2点で弾性波の受信を行った。サンプリング間隔は1 μ sとし5000点記録した。本研究において、舗装、UHPFRC、および既設コンクリートの弾性波伝播速度はそれぞれ3060m/s、4530m/s、および3710m/sであり、舗装は実測値より、UHPFRCと既設コンクリートは強度試験結果により得た密度、ヤング率、ポアソン比より換算して得た。式(1)より版厚に相当する縦波共振周波数を求めると7.3kHzとなる。直径の異なる鋼球を用いた事前検討の結果、振幅が十分に大きい受信波が得られ、版厚に相当する縦波共振周波数が明確に確認できる直径12mmの鋼球を本研究で用いることとした。

4.2 実験結果

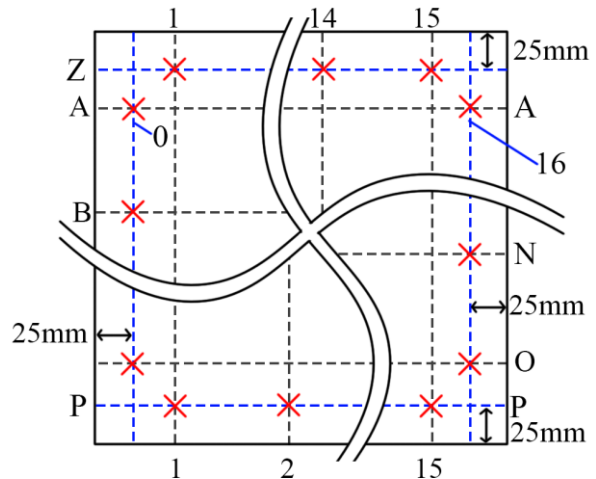
供試体中央(H8左)で得られた周波数スペクトルを図-6に示す。なお、周波数スペクトルの算出にあたり波頭(0~100 μ s)を除去し、測定ごとの打撃による振幅値の大きさの違いが周波数分析に与える影響を低減するため、高速フーリエ変換の前に式(3)を用いて時刻歴応答を正規化した⁵⁾。ここで、 x_i は*i*点目の振幅値(mV)、 \tilde{x}_i は正規化した*i*点目の振幅値(mV)、 n はサンプリング点数である。以降の検討では全て、この波頭除去の処理と正規化した時刻歴応答から周波数スペクトルを算出した。

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i}{\sqrt{\sum_j^n x_j^2}} \quad (3)$$

図-6より、健全供試体中央では7.6kHzで1つの明確なピークが認められ、理論上の版厚相当の縦波共振周波数7.3kHzとほぼ一致した。したがって、舗装・UHPFRC・既設コンクリートの3層からなる供試体において、舗装表面からの計測により版厚に相当する縦波共振周波数が得られることが確認できた。また、図-7のように、供

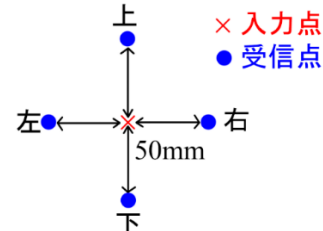


(a) 測定位置

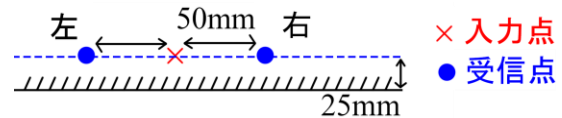


(b) 最外縁部の測定位置

図-4 測定位置概要



(a) 入力-受信位置



(b) 最外縁部での入力-受信位置の概要

図-5 入力-受信位置の概要

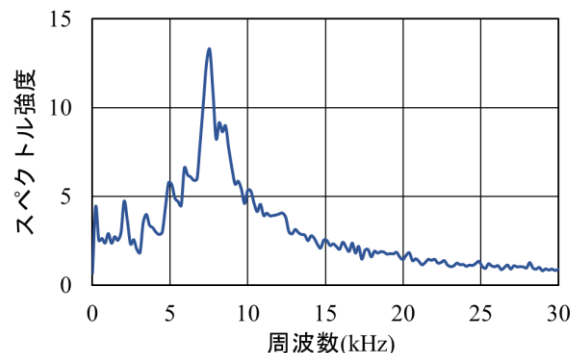


図-6 健全供試体中央(H8左)の周波数スペクトル

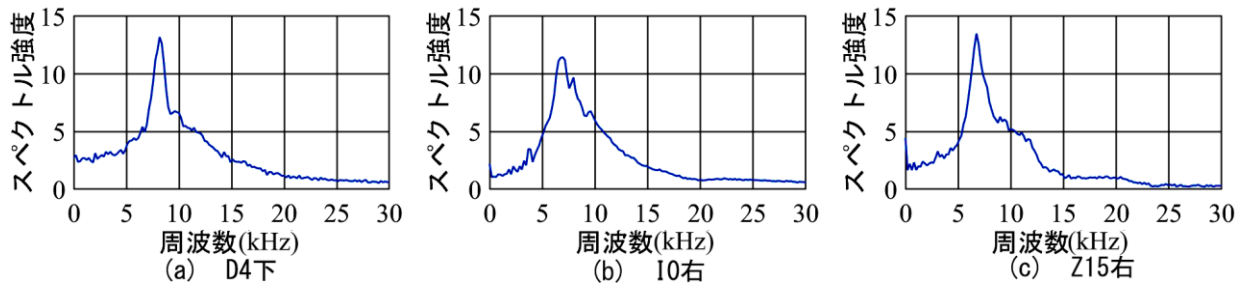


図-7 健全供試体の周波数スペクトルの一例

試体中央から離れた測定点である D4 では 8.2kHz に、最外縁部の I0 では 6.5kHz に、Z15 では 6.7kHz にそれぞれ単峰のピークが出現していた。なお、これらは各測定点の複数の受信点のうち最小のピーク周波数となった点である。本章において、267 点の測定点のうち約 90% に相当する 238 点の測定点で 6.5kHz から 8.3kHz にピークが出現した。これは、端面の反射波より縦波の多重反射が卓越し、反射波の影響が周波数スペクトルに表れていないためと考えられる。したがって、健全供試体では最外縁部も含めたほぼすべての領域で版厚相当の縦波共振のピークが確認できることから、供試体の測定位置によらず床版の一体性が評価可能であることが示唆された。

5. 打継目の欠陥検出

本章では、打継目に模擬欠陥がある箇所でインパクトエコー法による評価を行った。また、健全供試体中央で得られた周波数スペクトルと比べてどのような違いが表れるかについて検討した。

5.1 実験概要

図-8 に示すように模擬欠陥の中央位置を衝撃入力点とし、この点から 50mm 離れた位置に加速度センサを設置し、弾性波の受信を行った。その他の条件は 4 章と同一とした。UHPFRC と既設コンクリートの界面で多重反射が発生すると式(2)より 19kHz のピークが生じる。

5.2 実験結果

得られた周波数スペクトルを図-9 に示す。模擬欠陥では 3kHz 付近でピークが現れており、版厚、および模擬欠陥の深さに相当する縦波共振のピークは確認できない。また、このピークのスペクトル強度は、健全供試体のもものと比べて 2 倍程度と大きくなっている。これらの特徴は、部材全体の変形に伴って生じ、振動継続時間が長く振幅値が大きくなるたわみ共振の特徴と一致することから、3kHz 付近のピークは模擬欠陥より上側の UHPFRC と舗装が一体となったたわみ共振と推察される。また、欠陥深さに相当する 19kHz のピークが出現しなかったのは縦波の多重反射よりたわみ共振によるエネルギーが大きいためと考えられる。したがって、周波数スペクトルにおけるピーク周波数を確認することで、欠

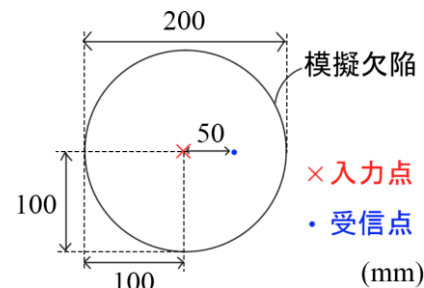


図-8 模擬欠陥供試体の測定



図-9 模擬欠陥の周波数スペクトル

陥の有無を判定可能であることが示唆された。

6. 供試体端部の剥離の検出

散水なし供試体の端部では UHPFRC が既設コンクリートから剥離を生じる可能性がある⁹⁾。そこで、散水なし供試体でインパクトエコー法による評価を行い、端部における剥離の有無が周波数スペクトルに与える影響について検討した。

6.1 実験概要

測定位置は図-4 に示す位置で、その他の衝撃入力および弾性波受信条件は 4 章、および 5 章と同一とした。

6.2 実験結果

得られた周波数スペクトルの例を図-10 に示す。H8 や K9 などでは前章の健全供試体の結果と同様の 7.3kHz 付近にピークが出現したものの、Z10 など一部の測定位置で版厚に相当する縦波共振周波数よりも低周波のスペクトルピークが出現した。この低周波のピークが出現した測定位置では、5.2 と同様に、既設床版から剥離した舗装と UHPFRC 層が一体となった板状部材のたわみ共振が生じたと考えられる。以上より、供試体端部で剥離が生じている場合、周波数スペクトル上にたわみ共振に

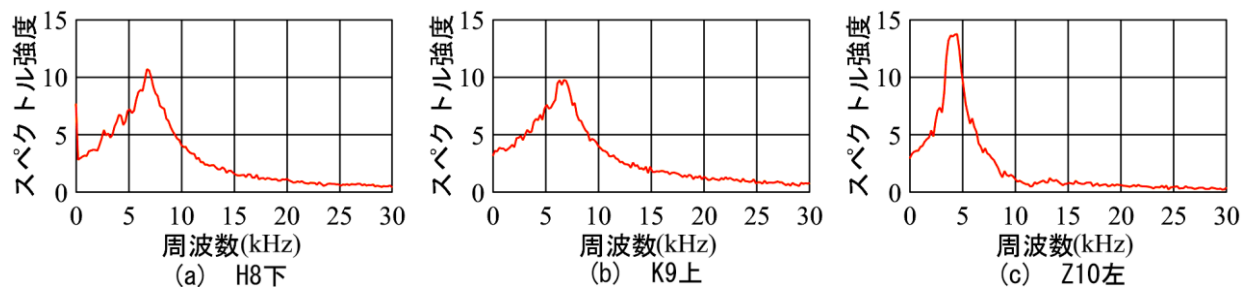


図-10 散水なし供試体の周波数スペクトルの一例

よる低周波のピークが出現することから、端部の剥離を検出することが可能であることが示唆された。

7. 端部剥離検出手法の適用性の確認

散水なし供試体において、低周波のスペクトルピークが出現した測定位置で実際に剥離が生じていることを確認するため、健全供試体と散水なし供試体の版厚方向の超音波伝播時間を測定した。また、健全供試体および散水なし供試体においてインパクトエコー法で得られた周波数スペクトルから健全か剥離の可能性があるかを判定し、インパクトエコー法による品質評価手法の適用性を確認した。

7.1 実験概要

ここでは、2 探触子法により超音波伝播時間を測定した。超音波の伝播経路に空隙などがある場合、超音波が空隙を迂回するため、超音波伝播時間は空隙がない場合より長くなることが知られている⁷⁾。超音波伝播時間の測定位置を図-11に示す。ここでは、散水なし供試体では全測定点で測定を行う一方で、剥離の可能性の低い健全供試体では最外縁部のみについて測定を行った。図-12のように超音波測定装置を用いて供試体版厚方向の超音波伝播時間を測定した。なお、探触子と供試体表面との接触を十分に確保するため、水溶性高分子を主成分とする接触媒質を使用した。

7.2 実験結果

健全供試体および散水なし供試体の版厚方向の超音波伝播時間の平均値はそれぞれ $63.2\mu\text{s}$ と $66.3\mu\text{s}$ となり、健全供試体より散水なし供試体の方が超音波伝播時間が長くなった。また、標準偏差は健全供試体が 1.20 で散水なし供試体が 2.11 であった。これより、散水なし供試体の端部には剥離が生じていることが示唆された。

7.3 インパクトエコー法の端部剥離検出への適用性

4 章より、健全供試体で得られた周波数スペクトルは、おおよその測定点でピーク周波数が 6.5kHz から 8.3kHz の範囲にあった。そこで、散水なし供試体および健全供試体において、上下左右全ての受信点で周波数スペクトルのピーク周波数が 6.5kHz より大きくなった測定点を健全と判定し、いずれか1つの受信点でも 6.5kHz より低

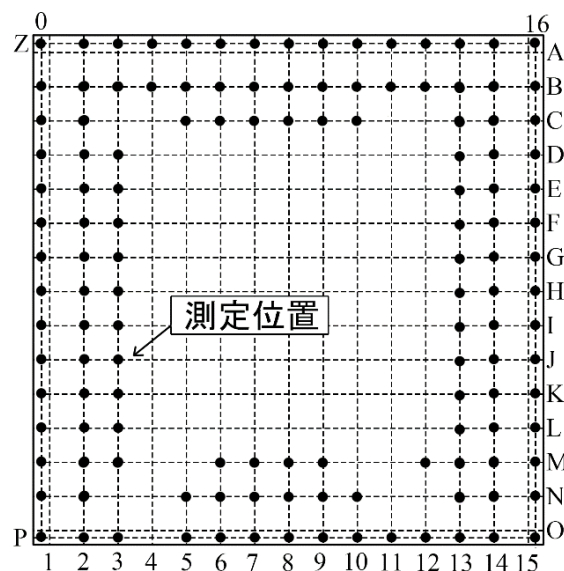


図-11 超音波伝播時間の測定位置

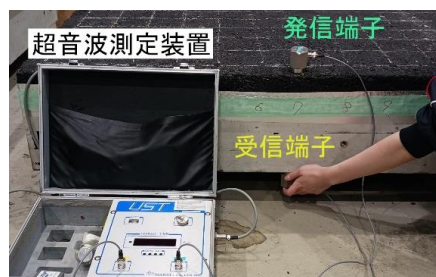


図-12 供試体版厚方向の測定概要

周波側でピークとなった測定点について剥離の可能性があると判定した(図-13)。また、散水なし供試体で超音波伝播時間が健全供試体での平均値である $63.2\mu\text{s}$ に標準偏差の 1.20 の倍の値を加えた $65.6\mu\text{s}$ を基準として判定した結果をあわせて示す。超音波測定で用いる弾性波はインパクトエコー法で入力される弾性波より波長が短く剥離部を透過する際に弾性波の減衰が生じやすいため、結果的に超音波伝播時間が長くなる場合がある。また、超音波は打継目が付着していなくても接触していれば透過するため、O行とP行で超音波伝播時間が短くなり健全判定となったと考えられる。そのため、インパクトエコー法による判定と超音波伝播時間による判定が一致しない場合がある。図-13より、周波数スペクトルによる

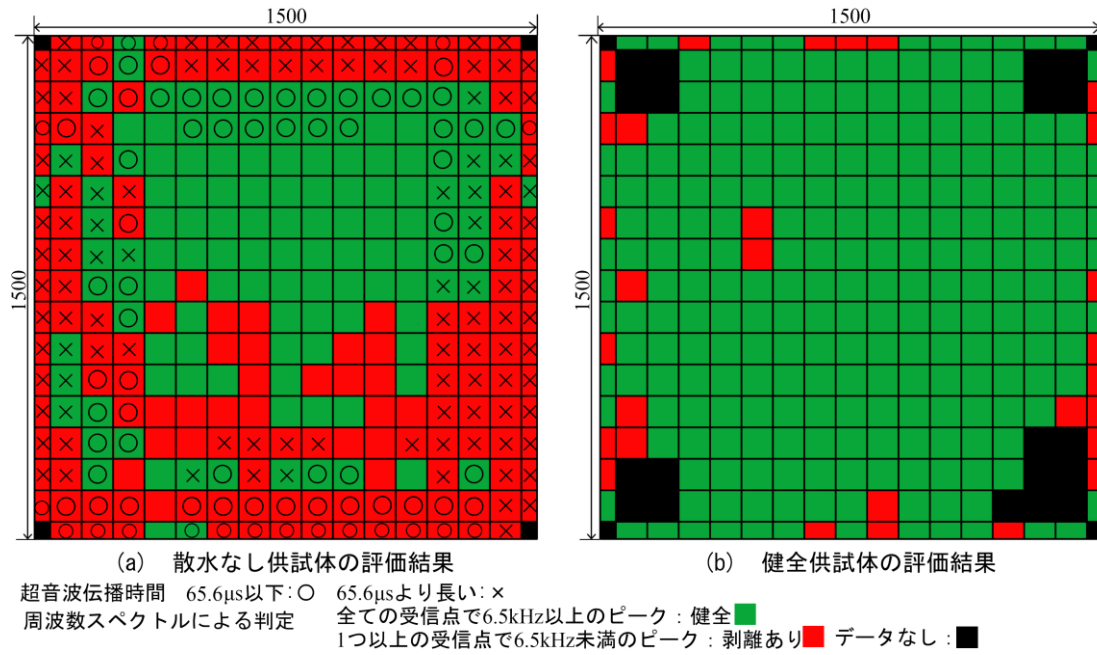


図-13 インパクトエコー法による端部剥離検出結果

判定では、健全供試体では、おおよその測定位置において健全と判定され、散水なし供試体は主に供試体の端部が剥離ありと判定された。したがって、ピーク周波数に適切なしきい値を設定することで、インパクトエコー法により端部での剥離検出が可能であることが示唆された。なお、各層の厚さが異なる供試体や、物性の異なる材料で構成された供試体で同様に判定を行う際は、判定基準のしきい値を別途検討する必要がある。

結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 舗装・UHPFRC・既設コンクリートの3層構造の健全供試体で舗装表面からインパクトエコー法を適用した結果、版厚に相当する理論上の縦波共振周波数に近い周波数でピークが表れることを確認できた。これにより、当該構造の一体性評価が可能であることが明らかとなった。
- 2) UHPFRC と既設コンクリートの打継目に欠陥がある場合、版厚に相当する縦波共振周波数よりも低周波側に単峰のピークを持つ周波数スペクトルとなることがわかった。
- 3) 周波数スペクトルにおけるピーク周波数に適切なしきい値を設定することで、供試体端部に生じたUHPFRC と既設コンクリートとの剥離を評価可能であることが示唆された。
- 4) インパクトエコー法を用いて、舗装上面からUHPFRC と既設コンクリートの打継目の品質を評価できる可能性が示唆された。

謝辞

本論文の執筆にあたり、大阪大学の服部晋一氏、大成建設株式会社の橋本理氏、および竹山忠臣氏に多大なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 長山清一郎ほか:現場施工型の超高強度繊維補強コンクリートを用いた床版上面増厚工法に関する研究, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol.76, No.2, pp.61-67, 2020
- 2) 橋本理, 越川喜孝: UHPFRC で上面を打ち替えたRC床版の耐疲労性の評価, 第12回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.279-284, 2022.10
- 3) Sansalone, M.J. and Streett, W.B.: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 4) 土木学会: 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ No.73, pp.1-29, 2007
- 5) 鶴田葵ほか: 上面増厚RC床版における剥離ひび割れが周波数スペクトルに与える影響に関する解析的検討, 土木学会第78回年次学術講演会講演概要集, CS19-05, 2023.9
- 6) 浅野雅則ほか: 打撃によるコンクリート部材の共振現象と打撃音の周波数特性, 土木学会論文集, No.760, pp.213-222, 2004.5
- 7) 吉田知宏ほか: 超音波法によるポーラスコンクリートの空隙評価に関する基礎的検討, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.339-340, 2004.9