

論文 電磁波レーダを用いた床版上面の滞水検出による予防保全の検討

野田 翼*1・松本 直士*2・遠藤 正史*3・石田 雅博*4

要旨：RC床版では、輪荷重による疲労に加えて、凍結融解や凍結防止剤散布による塩分浸透等の複合作用によって、土砂化が発生し、最終的には抜け落ちに至る場合がある。膨大な量の道路橋を効率的に維持管理するためには、劣化が生じる前に潜在的な劣化箇所をスクリーニングし、重点的に点検していくことが必要である。その中で、床版の劣化を著しく進行させる滞水を検出することが有効だと考えられる。本研究では、電磁波レーダ法に着目し、床版上の滞水検出手法を検討するために実橋における計測を実施した。その結果、舗装とRC床版の境界面の反射波の信号強度を抽出し、RC床版上面の滞水を検知する手法を提案した。

キーワード：非破壊試験，電磁波レーダ，RC床版，土砂化，予防保全

1. はじめに

RC床版では、車両走行時の輪荷重による疲労に加えて、凍結融解や凍結防止剤散布による塩分浸透、骨材のアルカリ骨材反応等の複合作用によって、床版上面の土砂化が発生し、最終的には抜け落ちに至る場合がある。

道路橋定期点検要領¹⁾では、橋長2.0m以上の道路橋において、5年に1回を基本とする近接目視点検が義務化されている。定期点検での既設床版の劣化・損傷状況の点検は、床版下面からの外観目視および舗装面のひび割れの点検によるもので実施されている。しかし、輪荷重による疲労、材料劣化等による床版土砂化の要因と定期点検における舗装のポットホールや床版下面のひび割れおよび漏水痕などの外観変状との相関が明確でなく現状の目視点検では、床版下面の抜け落ちのリスクが存在する。また、床版の設計基準では、建設省道路局長通達(S42)以降、最小床版厚および配筋鉄筋量の見直しによる疲労損傷へ対策が実施²⁾されているが、スパイクタイヤ規制(H5)以降、凍結防止剤の散布量が増加しており³⁾、塩分を含んだ水が床版へ浸入することにより、床版下面に変状が発生していなくても、床版上面が土砂化している事例が発生している。写真-1は、供用後10年経過後の舗装開削後の状況である。また、写真-2に5年前の定期点検時には損傷度判定が低く、対策不要と判定されていた箇所が、数年後に床版下面の抜け落ちが発生した事例を示す。このように床版の土砂化は、損傷の進行が速いことが特徴である。これらは、路面からの水が床版上面に浸入し、疲労を著しく促進する^{4,5)}だけでなく、凍害、塩害、アルカリ骨材反応などのコンクリートの劣化を誘発する可能性が高くなる⁶⁾ことが原因と推定される。

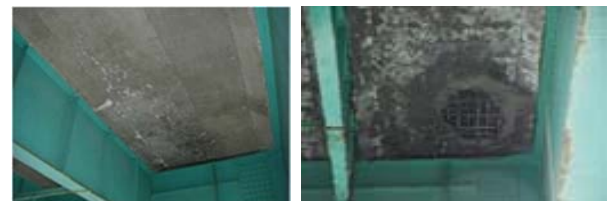
床版上面の滞水に関しては、舗装や床版の変状からそ

の有無を推測することは可能であるが、多くの場合には変状箇所の舗装を開削して初めて確認され、この時点で既に床版の性能が著しく低下していることもある。また、変状箇所の舗装開削により局所的な滞水を確認することは可能であっても、滞水箇所を面的に把握することはできず、潜在的な劣化箇所を特定することは困難である。

道路橋の調査は、劣化が生じた時点でその要因や健全性を評価するために行われるが、膨大な量の道路橋を効率的に維持管理するためには、劣化が生じる前に潜在的な劣化箇所をスクリーニングし、日常点検や定期点検において重点的に点検していくことが必要である。その中で、床版の劣化を著しく進行させる水を検出することが有効になると考えられ、滞水箇所が検出できれば排水および遮水を行う予防保全措置が実施できる。そこで本研究では、非破壊調査技術の一つである電磁波レーダにより床版上面の滞水箇所を検出する手法の検討を実施した。



写真-1 舗装開削後の土砂化が進行した事例



(a) 5年前の定期点検時 (b)床版下面の抜け落ち時
写真-2 床版下面の抜け落ち事例

*1 (国研)	土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	工修 研究員 (正会員)
*2 (国研)	土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	工修 交流研究員
*3 (国研)	土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	工修 交流研究員
*4 (国研)	土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	工修 上席研究員

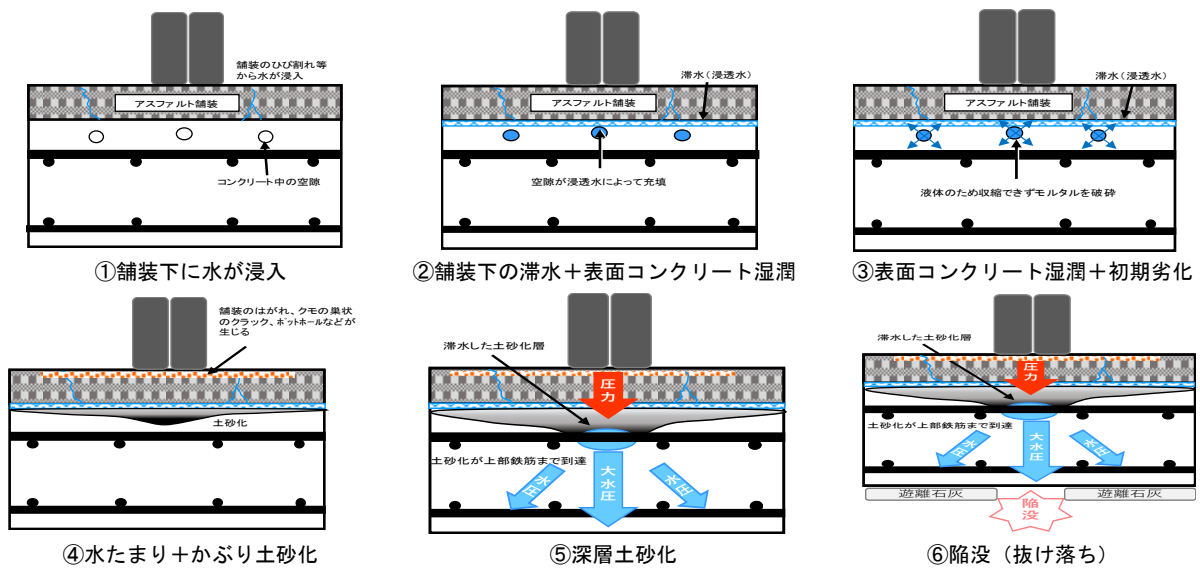


図-1 土砂化（輪荷重による）メカニズム

2. 床版の予防保全について

2.1 床版の劣化状態の定義

本研究における想定される床版の劣化状態の定義を図-1に示す状態①～⑥の劣化段階で定義する。床版では、図-1の車両走行時の輪荷重による疲労に加えて、凍結融解や凍結防止剤散布による塩分浸透、骨材のアルカリシリカ反応等の複合作用によって、床版上面の土砂化が発生し、最終的には抜け落ちに至る場合がある。

(1) 状態① 舗装下に水が浸入

降雨後に舗装の施工目地や伸縮装置・地覆境界、舗装のひび割れ等から床版上面に水が浸入する。

(2) 状態② 舗装下の滞水+表面コンクリート湿潤

排水不良により路面からの浸入水があると、床版上面の滞水および床版上面が湿潤状態になり、細孔空隙が水分で満たされる状態。排水不良により、路面水が適切に排水されないと、飽和状態が続き、次の状態に進みやすくなる。

(3) 状態③ 表面コンクリート湿潤+初期劣化

輪荷重により、充填された細孔空隙中の水圧により周囲のモルタルが破砕され、土砂化が始まる。床版の表面的な劣化や水平ひび割れが発生する。

(4) 状態④ 水たまり+かぶり土砂化

床版上面に土砂化した層が広がる。舗装面に舗装の剥がれ、ポットホール、蜘蛛の巣状クラック等の損傷が顕在化する。

(5) 状態⑤ 深層土砂化

水平ひび割れにより脆弱化した層が床版厚の半分程度まで広がり、床版上面鉄筋位置まで及ぶ。また、滞水層があると、輪荷重により大きな水圧が生じ、床版上面に土砂化した層が広がる。

(6) 状態⑥ 陥没(抜け落ち)

床版下面に遊離石灰が広範囲に噴出する。土砂化し



写真-3 ウォータージェットの作業



写真-4 大規模な仮設足場の設置事例

た床版の直下では、突然の陥没の可能性がある。

2.2 床版の予防保全に関する診断

床版の予防保全に関する措置が、状態③までの状態で実施できれば効率的なメンテナンスサイクルが実施できると考えられる。状態⑤での床版の補修作業では、土砂化箇所をウォータージェットにより除去する必要がある（写真-3）。また、架橋地点での条件によっては、大規模な仮設足場や長期間の交通規制を実施する必要があり（写真-4）、補修期間やコストが増大する傾向にある。

床版の予防保全には劣化の主要因である舗装下の滞水箇所の早期検知を行い、浸入経路を診断し、排水・遮水等の予防保全措置を実施することが重要である。このため、電磁波レーダによる床版上面の滞水箇所の検知が可能であれば床版の予防保全診断が可能であると判断した。

3. 電磁波レーダによる水分検知の検討

3.1 橋梁床版における電磁波レーダの適用

電磁波レーダ法によるコンクリートの非破壊検査は適用部材に対する制約が比較的少なく、測定も他の検査方法より早く簡単である。しかし、各種境界面や異なる物質等からの雑信号が目標物からの信号と混合されてしまうため、解析に専門的な知識と経験が要求される。特に橋梁床版部のように、舗装とコンクリート床版の各層別構成材料（媒質）が異なる場合は、各媒質の電気的性質

の差により電磁波の位相速度と反射および透過特性等が一層複雑に変化する。そのため、電磁波の基本伝搬特性を事前に整理して検討する必要があると考えられる。

3.2 電磁波レーダ法

電磁波レーダ法は、金属以外の媒質を透過し、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を利用し、物質内部を非破壊で探査する手法である⁷⁾。

探査原理は、図-2、図-3に示すように、電磁波を媒質中に送信器から放射（以下、送信波）し、反射した電磁波（以下、反射波）を受信アンテナで受信し、反射波が返ってくるまでの時間から深さ方向の位置を推定するものである。平面的な位置は、距離計を内蔵した装置を移動させることにより、位置情報を得ることができる。

電磁波の速度は、真空中の速度が基準となり各媒質に対する固有の速度 V で伝わる。各媒質内での伝播速度は、各媒質の固有の電気的定数である比誘電率に依り、式(1)の速度で進む。

$$V = \frac{Co}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで、 V ：媒質中の電波の伝播速度（m/s）

Co ：真空中での電波の伝播速度（ $=3 \times 10^8$ m/s）

ϵ_r ：媒質の比誘電率

また、比誘電率の異なる境界面で電磁波が反射する原理を利用すると、境界面までの深さ d は、比誘電率 ϵ_r および反射時間 t を用いて式(2)から求められる。

$$d = \frac{1}{2} \times V \times t = \frac{1}{2} \times \frac{Co}{\sqrt{\epsilon_r}} \times t \quad (2)$$

ここで、 d ：境界面までの深さ（m）、 t ：反射時間（s）

3.3 電磁波の反射

電磁波が媒質の異なる境界面に達すると、その境界面で一部反射し、残りは透過する。境界面に電磁波が垂直に入射する場合、この反射と透過の割合は境界面で接する二つの媒体の比誘電率によって決まり、式(3)により反射強度 R を表すことができる⁸⁾。上層の比誘電率が下層と比較し高い場合は、電磁波の反射強度のピーク値がプラス方向になり、上層に比誘電率が下層と比較し低い場合は、反射強度のピーク値がマイナス方向になる。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (3)$$

ここで、 ϵ_{r1} ：上層の比誘電率、 ϵ_{r2} ：下層の比誘電率

3.4 比誘電率

媒質固有の比誘電率は、媒質によって大きく異なる。表-1に比誘電率の概略値を示す⁹⁾。表-1に示す媒質の反射波の伝播速度は金属が一番早く、水、コンクリート、アスファルト、空気の順になる。また、コンクリートの比誘電率は、含水状態で大きく変化する。式(3)を用いる

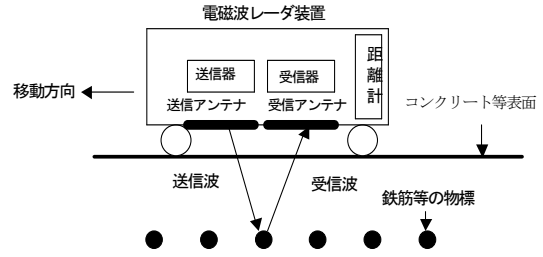


図-2 測定原理の概略図

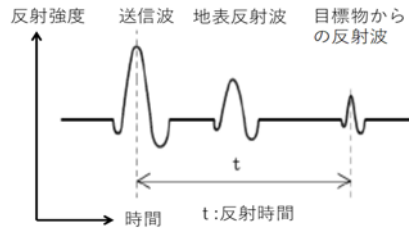


図-3 送信波と反射波

表-1 比誘電率の概略値

材 料	比誘電率
空 気	1
水	81
アスファルト	2~4 (乾燥状態) 6~12 (湿潤状態)
コンクリート	4~10 (乾燥状態) 10~20 (湿潤状態)
鋼材	∞

と、舗装からコンクリート床版の境界面での反射強度は、0.15~0.19となる。また、舗装と滞水部の境界面で反射した場合は、0.34~0.48となる。

3.5 計測波形評価方法

電磁波レーダの測定波形の評価方法として、送信波を1（100%）とし、舗装と床版との境界面での反射波の波形のピーク値との比を反射強度として表現する。

以上の評価手法により、電磁波レーダによるRC床版の劣化診断技術の適用可能性を検討するために、現地調査を実施した。

4. 電磁波レーダによる調査

4.1 調査橋梁

調査を実施した調査対象橋梁の概要を表-2、図-4~6、写真-6~8に示す。調査橋梁は、標高が高く、積雪寒冷地に位置する橋梁であり、冬季期間は路面の凍結防止のため、凍結防止剤を散布している橋梁である。床版下面には、ひび割れや遊離石灰の析出が確認されている。

4.2 電磁波レーダによる測定

本研究における電磁波レーダには、写真-5、表-3に示す車載式電磁波レーダを使用し、自然交通流での走行の下、電磁波レーダ信号を取得した。電磁波レーダは、

3D-Rader 社製のマルチチャンネルのステップ周波数レーダである。このシステムでは、40km/h 程度で走行しながら約 1.5m 幅の計測が可能である。計測ピッチは、橋軸および橋軸直角法に 7.5cm/scan でデータを取得できる。電磁波レーダのサンプリングレートは 256 レートで深度方向に 0.34(ns)毎にサンプルを取得している。写真-9 に路面画像、図-7 に舗装と床版上面との境界面での電磁波レーダの計測平面図を示す。測定結果を図化した場合、画像のコントラストは、振幅が大きい場合は白色、小さい場合は黒色側に階調で表示される。

4.3 舗装開削調査

舗装開削は、横断勾配が低い側の片車線にて実施した。舗装開削時は、乾式カッターとバックホウを用いて水を使わずに舗装開削を行った。橋梁架橋地点の最寄りアメダスを確認すると舗装開削前の 1 週間降水の記録がなく、舗装路面が乾燥状態で実施した。写真-10 に舗装開削後の状況を示す。青色マーキング箇所は、土砂化が確認された箇所、赤色マーキング箇所は、床版面のうきが確認された箇所を示している。

4.4 電気抵抗式水分計による水分量計測

床版上面の水分の確認を行うために、舗装開削後に 50cm×50cm 間隔毎に電気抵抗式水分計を用いて床版上面の水分量を計測した。図-8 に計測結果を示す。

電気抵抗式水分計は、コンクリート表面の水分状態の変化を電気抵抗値が大きい場合に最小表示 10(約 820GΩ)、小さい場合に最大表示 990(約 10kΩ)の数値に換算して表示するカウントモードに設定して測定を実施した。

また、床版上面のコンクリート水分状態とカウント値との関係について、次に示す 3 段階に区分した¹⁰⁾。

健全部 (カウント値 10~230)

- ① 湿潤部 (カウント値 231~520)
- ② 滞水部 (カウント値 521~990)

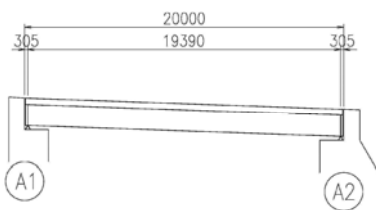


図-4 側面図

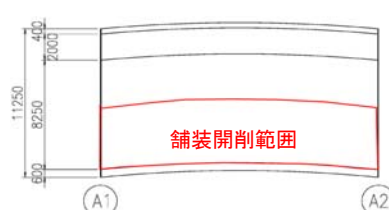


図-5 平面図

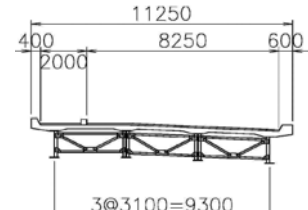


図-6 標準横断面図



写真-6 側面写真



写真-7 路面写真



写真-8 床版下面写真

表-2 調査対象橋梁概要

上部構造形式	単純非合成鉄桁橋
橋長	20.0m
全幅員	11.25m
有効幅員	10.25m
活荷重	TL-20
供用開始	1978 年
適用示方書	昭和 47 年
昼間 12 時間交通量	2,268 台
大型混入率	19.9%



写真-5 車載式電磁波レーダ

表-3 測定システムの概要

項目	仕様	性能
測定速度	推奨 40km/h	最大 80km/h
距離測定	車速信号取得	精度±0.3%以内
電磁波	マルチステップ周波数方式	200MHz~3GHz
	アンテナ幅 1.8m	有効測定幅員 1.5m
	チャンネル数 21	走行方向 7.5cm 間隔 走行直角方向 7.5cm 間隔 深さ方向 1.0cm 間隔

水分計の計測結果、床版健全部においてカウント値が 10~230 の範囲であったのに対して、地覆の端部・舗装施工目地・伸縮装置設置部付近および土砂化部で水分量が多くなる傾向が確認できた。

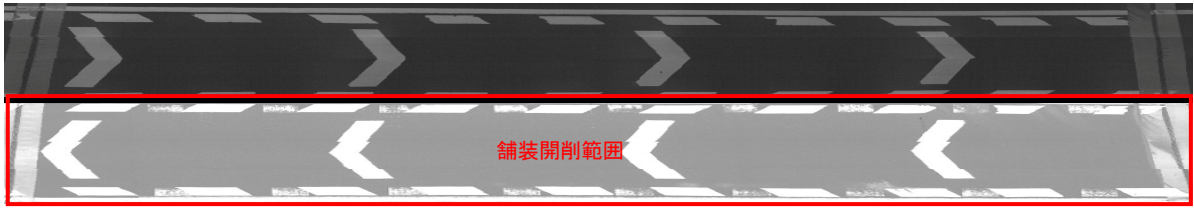


写真-9 路面画像

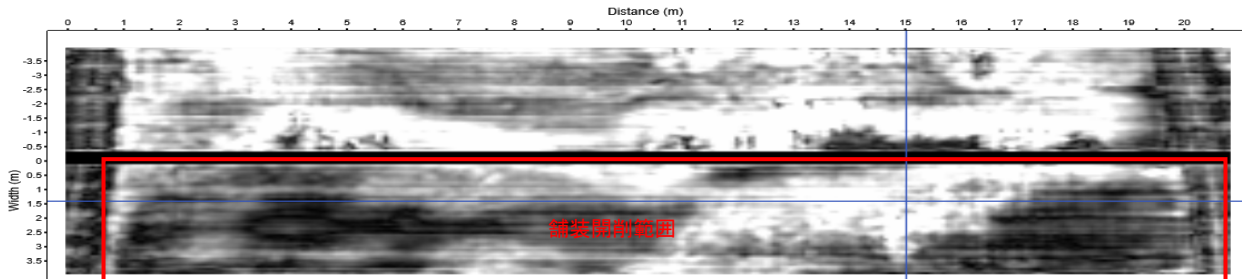


図-7 電磁波レーダ計測結果 (床版上面平面図)



写真-10 舗装開削後オルソ画像

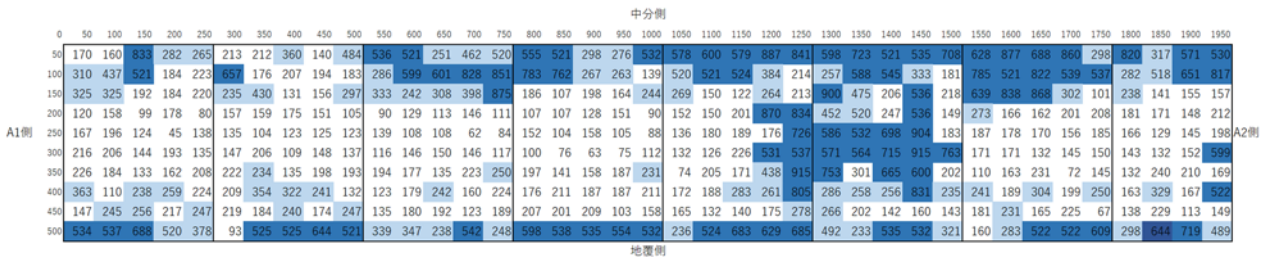


図-8 舗装開削箇所の床版上面の水分計測結果

5. 計測波形による分類

5.1 計測波形の整理

図-9 に深度方向に 70 サンプルまでの計測波形を示す。送信波を、電磁波が発信された時間を起点として、舗装表面から反射された電磁波が受信されるまでの時間に計測された波形とし、その区間での最大値を送信波の最大値とした。調査橋梁における計測波形を整理すると、送信波を深度方向に 6~15 の範囲、床版上面での反射波を深度方向に 30~45 の範囲と定義する。

計測波形における送信波と反射波の最大振幅を抽出し頻度分布として図-10 に示す。送信波は、最大振幅の分布が約 0.020~0.025 の範囲で輻射されていることがわかる。反射波は、舗装と床版上面の境界面において最大振幅が 0.000~0.010 の範囲でばらつきをもって境界面で反射していることがわかる。これは、床版に水が浸入し、コンクリートが湿潤状態になりコンクリートの比誘電率が大きくなったこと、もしくは床版上面に滞水層として水が存在したことが考えられる。

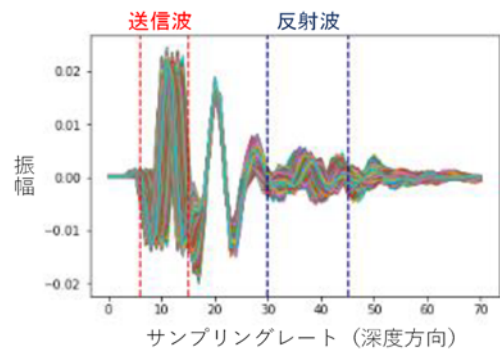


図-9 計測波形

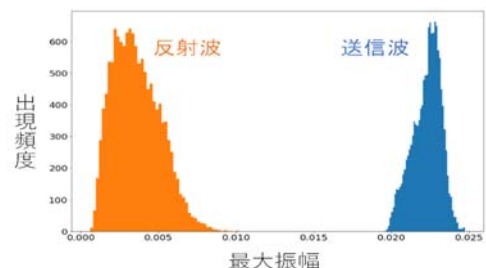


図-10 送信波・反射波の最大振幅分布

5.2 反射強度分布の比較

図-8 に示す、舗装開削後の床版上面の水分計の計測結果をもとに、健全部と滞水部と判定された範囲での計測波形を抽出した。健全部と滞水部における反射波の最大振幅値と、送信波の最大振幅値の比を、反射強度として表現する。図-11 に健全部と滞水部における反射強度の頻度分布を示す。健全部は、反射強度約 0.1 を中心として分布しているが、滞水部は、反射強度約 0.23 を中心に 0.1~0.4 の範囲で分布している。今回水分計の計測が、50cm×50cm 毎の範囲での計測であったためにばらつきが発生していることも要因の一つだが、健全部と滞水部での反射強度分布の範囲に違いが明確に出てきていることがわかる。

5.3 健全部判定手法

反射強度による評価を行うために健全部の反射強度分布に着目した。滞水部の反射強度分布はある程度の範囲で分布しているため評価が難しい。乾燥状態の舗装の比誘電率を 4、コンクリートを 6 とし、式(3)を用いると反射強度 0.101 となり健全部における反射強度の分布中心と同様となる。そこで健全部の反射強度から正規分布の確立密度関数から標準偏差 (σ) を算出した。その結果、 3σ の範囲 (0.23 以下) に入る反射強度を健全部と定義し、全計測データに対して分類を実施した。また、図-8 の計測結果を教師データとした、機械学習による決定木を用いたランダムフォレストによる分類を実施した。図-12 に全幅員において健全部、湿潤部および滞水部に分類した健全部分布判定図を示す。着色箇所は、床版上面に水の浸入している箇所であり、水の浸入経路を点検することにより予防保全を実施できると考える。

6. まとめ

本研究では、RC 床版の非破壊調査技術の一つである電磁波レーダ法に着目し、橋面上の滞水検出手法としての適用可能性を検討するために実橋における電磁波レーダによる計測と床版上面の水分計による水分量測定を実施した。その結果、床版上面の水分量の分布があることを確認した。また、舗装とコンクリート床版の境界面の反射波の信号強度を抽出することにより、床版上面に滞水を検知する手法を提案した。本手法は、劣化形態の特定はできないが、床版上面における滞水状態を把握することが可能である。今後、追加調査により本手法の適用性や精度を検証していく予定である。

謝 辞

本研究は、平成 30 年度から実施している「AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究」の成果の一部である。また、研究の実施にあたり、中部地

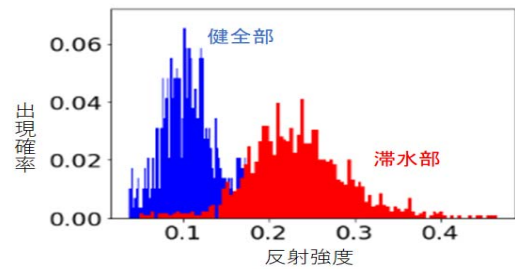


図-11 反射強度分布

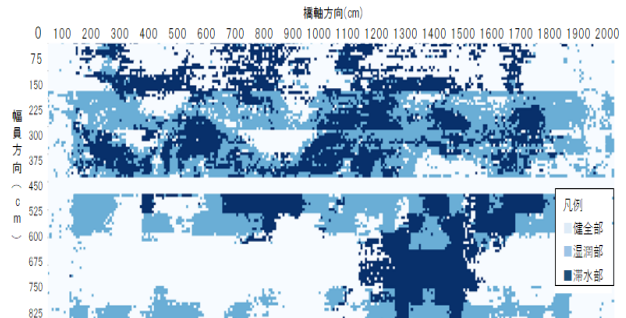


図-12 健全部分布判定図

方整備局飯田国道事務所には、多大なるご協力をいただきました。ここに謝意を記します。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局：道路橋定期点検要領，2019.2
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，第 472 号，pp.5-6，2008
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：凍結防止剤散布と沿道環境，国土技術政策総合研究所資料，第 412 号，pp.6-32，2007
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.9，No.2，pp.627-632，1987
- 5) 阪神高速道路公団，阪神高速道路技術センター：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性，1991.12
- 6) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，日本コンクリート工学協会，1999.11
- 7) 小林一輔，魚本健人，加藤潔，広野進：コンクリート構造物の非破壊検査，森北出版株式会社，pp.78-104，1990.5
- 8) 朴錫均，魚本健人：レーダ法による多層コンクリート床版の非破壊検査のシミュレーション解析，土木学会論文集，No.538，V-31，pp.95-104，1996.5
- 9) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，手法編，1998，第 7 章，pp.404
- 10) 谷倉泉，榎園正義，後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究，構造工学論文集 Vol.59A，pp.1112-1123，2013.