

論文

電磁波レーダによる床版上面の水分検知手法の検討

夏堀格*, 石田雅博*, 岩谷祐太*, 松本直士**, 野田翼 ***

*修(工), 土木研究所, 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

**修(工), (株)復建技術コンサルタント, 構造技術部 (〒980-0012 宮城県仙台市青葉区錦町 1-7-25)
(前 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター)***修(工), 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)
(前 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター)

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、非破壊調査技術の一つである電磁波レーダ法に着目し、床版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模型供試体における計測を実施し、水分検知手法の提案をするものである。

キーワード：電磁波レーダ、非破壊試験、床版、水分検知、予防保全

1. はじめに

近年鉄筋コンクリート床版（以下 RC 床版）では、写真-1 に示すような車両走行の輪荷重による疲労や、凍結抑制剤の散布による床版への塩分浸透や凍害など、劣化因子が複合的に作用することにより発生する土砂化が多く確認されている¹⁾

橋梁の維持管理上、現在発生している土砂化を早急に発見し補修を実施することが望ましいが、土砂化が発生した部分を補修しても早期に補修部の再劣化が起こる事例も報告されており、現状では土砂化に対する有効な補修方法は確立されていない²⁾。

また、土砂化が発生した RC 床版上面の補修や、陥没が発生した際の復旧には、交通規制を伴うことが必須であり、工事費用の増加や渋滞の発生による社会的影響が懸念される。実際に土砂化が進行し、RC 床版が抜け落ちに至ったとされる例も報告されており（写真-2）、土砂化の発生を未然に防ぐことを目的として、進行が激しくなる前に RC 床版の変状を検知し、予防保全を実施することが望ましい。

現在、定期点検で舗装のポットホールや床版下面のひび割れ及び漏水痕など、土砂化が懸念される損傷が確認された橋梁に対しては電磁波レーダによる床版のスクリーニングを行うのが主流となっている³⁾⁴⁾。しかし、現在の電磁波レーダによる調査技術は、進行が顕著な土砂化を精度よく検知することに活用されているが、土砂化の発生原因となる床版上面の滞水を検知することに利用され

た事例は多くない。

一方、松本⁵⁾、野田ら⁶⁾は、実橋梁において健全箇所と滞水箇所の電磁反射エネルギーの特性からそれらを分類する判別モデルを提案しているが、同手法の他橋梁への適用については課題があるとしている。このため、床版上面の滞水検知モデルを作成するためには、まず実橋梁を模した模型供試体等を利用して詳細に電磁波レーダの特性を検証する必要がある。

本研究では模型床版を用いてアスファルト舗装と RC 床版上面に滞水した水を電磁波レーダによって検知することに着目し、電磁反射波を用いて床版内部の滞水状況を再現することが可能かを検証した。



(a) 砂利化の例



(b) 舗装面の土砂噴出

写真-1 床版の土砂化とその変状



(a) 5年前の定期点検時



(b) 床版の抜け落ち時

写真-2 床版下面の抜け落ち事例

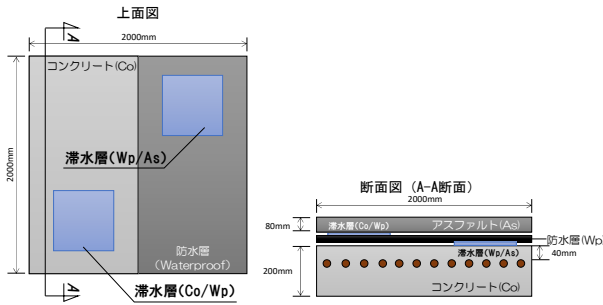


図-1 模型床版概要図

表-1 模型床版材料諸元

材料諸元	使用材料
舗装	改質II型 As 2層 80mm (40mm+40mm)
防水層	塗膜防水, シート防水
コンクリート	JIS A 5308 レディミクストコンクリート
コンクリート強度	24N/mm ²
水セメント比	53%
空気量	4.2%
鋼材規格	SD295 D13

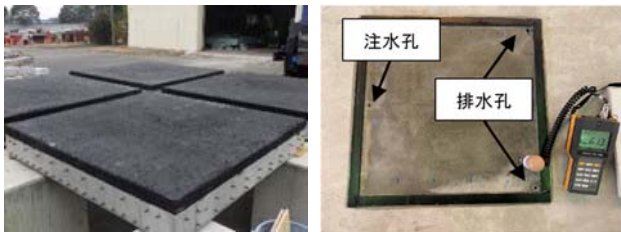


写真-3 模型床版外観と滞水スペース

2. 模型床版の概要

図-1に模型床版の概要, 表-1にはその材料諸元を示す. またその寸法は2.0m×2.0m, 主筋かぶり40mmで防水層にシート系防水を使用したものと, 塗膜系防水を使用したものの2種類を製作した.

この模型床版は, 舗装と防水層, 防水層と床版上面の2パターンの滞水状況を再現できるように設計されており, 各層に厚さ1mmのゴム板で50cm四方の滞水スペースを作り, 滞水スペース内に注水孔と排水孔を設けることで, 模型床版内部への水の出し入れを可能にした(写真-3).

本検証では, 防水層と床版上面の滞水パターンに着目して検証を実施した.

3. 検証方法

3.1 電磁波レーダ法

電磁波レーダ法は, 電磁波を輻射した際に受信アンテナから得られる振幅A(v/m)と受信までの時間T(s)を記録するものである. この時, 測定する深度D(m)は, 送信アンテナから輻射された電磁波

表-2 電磁波レーダの諸元

仕様	
周波数	2.7GHz
中心周波数	2.7GHz
探査深度	～約60cm
計測幅	10cm

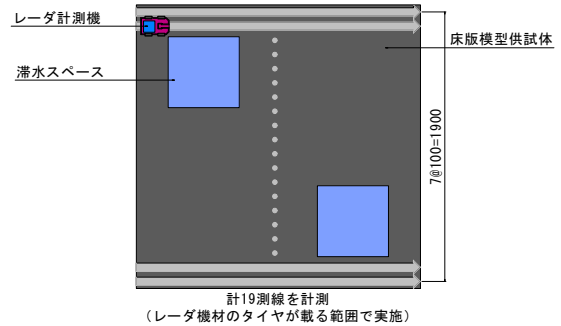


図-3 計測概要図

が媒質の異なる境界, すなわち誘電率の異なる境界面で反射されて受信アンテナで受信されるまでの時間差T(s)と透過した媒質の速度v(m/s)との関係から式(1)のように推定することができる.

$$D = 1/2 \times T \times v \quad (1)$$

なお, 電磁波の空気中での速度は 3×10^8 (m/s)であるが, コンクリートや舗装等の空気以外の物質を透過する際の速度はその物質が個別に持つ比誘電率 ϵ_r に影響され, 比誘電率を考慮した電磁波の速度は以下の式(2)で表現される.

$$v = (3 \times 10^8) / \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

また, 受信振幅Aは, 反射媒体の反射効率に依存する. この時, 反射の効率を示す反射係数Rは以下の式(3)で表現される.

$$R = (\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}) \quad (3)$$

ただし, Rは反射係数, ϵ_1 は上層の比誘電率, ϵ_2 は下層の比誘電率である. よって, 受信された反射強度A(Volt/m)は, 計測器の利得G(Volt/m)を用いて, 式(4)のように表すことができる.

$$A = G \times R \quad (4)$$


3.2 計測方法

本検証に用いる電磁波レーダの諸元を表-2に示す. この電磁波レーダは, 内部アンテナの仕様上, 計測の幅が1測線10cm幅となる. 今回の模型供試体の計測は, 機材のタイヤ両輪が載る範囲で計測を行うものとし, 19測線のデータを取得した. 計測の概要図を図-3に示す.

表-3 比誘電率の一般値⁷⁾と松本ら⁸⁾の研究結果

	一般値	松本らの研究
水	81	—
舗装	乾燥状態：2~4 湿潤状態：6~12	6.8
コンクリートのみ	乾燥状態：2~4 湿潤状態：6~12	11.5
舗装+防水層+ コンクリート	—	7.9

表-4 水分計の諸元

主な仕様情報		
(1)測定方法	電気抵抗式	
(2)測定対象	コンクリート床版	
(3)測定範囲	0~6.0% (コンクリート床版) 40~990 (電気抵抗換算値)	
(4)使用温度範囲	0~40℃	

3.3 分析方法

本研究では、レーダ計測により模型供試体が健全(乾燥状態)である箇所と、滞水(湿潤・滞水状態)している箇所を電磁波形の特性を利用して判別可能であるかを分析する。

計測により取得される電磁反射波は、表-3に示した物体の持つ比誘電率の違いによって最大振幅値が異なる。滞水箇所と健全箇所の比誘電率を比較すると、滞水部では比誘電率が高い水が存在するため反射波の最大振幅値が大きくなり、健全箇所では水より低い比誘電率を有するコンクリートからの反射波が返ってくるため、最大振幅値が滞水部に比べて小さくなる。本検証ではこのような比誘電率の違いによる反射波形の違いに着目した。

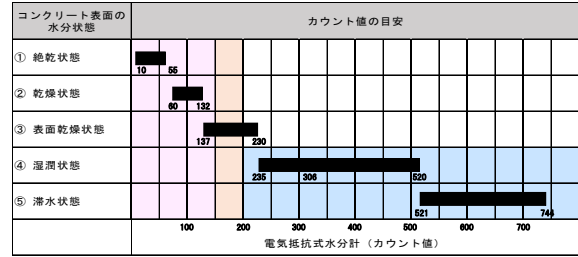
3.4 健全箇所と滞水箇所の定義

本検証で分類する健全箇所と滞水箇所は、その含水状態を定量的に評価し判別することを目的としているため、事前に模型床版上面で水分カウント値の計測を行った。滞水状態の計測に用いた水分計の概要を表-4に示す。この水分計の計測方式は電気抵抗式であり、計測物質の飽和点以下の範囲で精度が良いのが特徴である。また水分量をカウント値で表示することにより、その床版の滞水状態を表-5に示す状態で評価することができる⁹⁾。床版上面の水分量計測は、乾燥状態と湿潤状態の2ケースにおいて50cm四方の滞水スペース内を10cmピッチで計25箇所を計測した。

図-4に測定結果を示す。今回検証モデルの作成に利用する模型供試体は、乾燥状態ではカウント値が200~300程度の値を示しているのに対し、湿潤状態では500~700程度の値を示している。

なお、乾燥状態のカウント値が湿潤状態を示した後28日間養生をした時点で計測したものであり、

表-5 水分計の目安



湿潤状態					乾燥状態				
567	612	597	678	545	197	226	223	213	207
547	587	565	710	637	219	225	214	222	217
548	713	674	753	621	233	230	228	219	208
534	610	730	701	539	204	238	229	233	213
607	685	768	722	613	222	228	221	219	222

図-4 シート防水施工床版の水分カウント値

比較的水分を多く含んだコンクリートで実施しているためである。このため健全部では、『健全』としながらも含水状態が比較的高い状態として定義されるが、実橋梁として供用される床版は供用後にコンクリート中の水分が蒸発して乾燥することを考慮すると、供用中の床版をその年数に依らず評価可能な水分検知モデルを構築できると考える。

4. 検証結果

4.1 電磁波レーダ計測

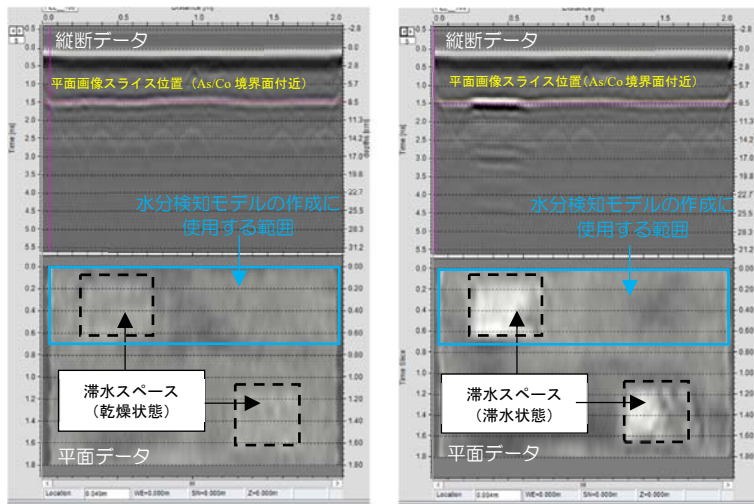
図-7(a)に健全な模型床版、(b)に滞水スペースに注水した状態の模型床版の電磁波レーダ計測の結果を示す。図-7(a)(b)の上図は模型床版のある側線での縦断図であり、下図は縦断図上のピンクのラインで示された深さ(舗装と床版上面の境界部)での平面図となっている。

なお、画像のコントラストは反射振幅が大きい場合は白色を示し、小さい場合は黒色側に階調で表示されている。

まず図-7(a)(b)の縦断図に着目すると、(a)の縦断図ではピンクのラインで示された舗装と床版上面の境界部がほぼ同様の色調の電磁反射波振幅を取得しており、境界部の下に位置している鉄筋からの反射(馬蹄形の放物線)も明確に表示されている。

次に、(b)では、境界部が明確に白色となり色調が異なる箇所が示されている。また境界部の下に位置している鉄筋からの反射も(a)と比較して不明瞭である。

これは輻射された電磁波が滞水箇所へ入射する際に、水に反射したことにより振幅の大きい反射波として受信されたためである。また、発信された電磁波が水の影響により鉄筋位置まで透過されな



(a)乾燥状態 (b)滞水状態

図-7 電磁波レーダ結果

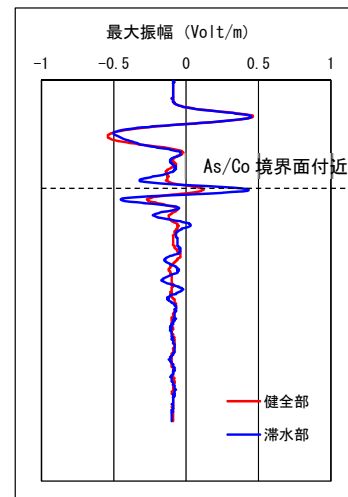


図-8 健全部と滞水部の振幅

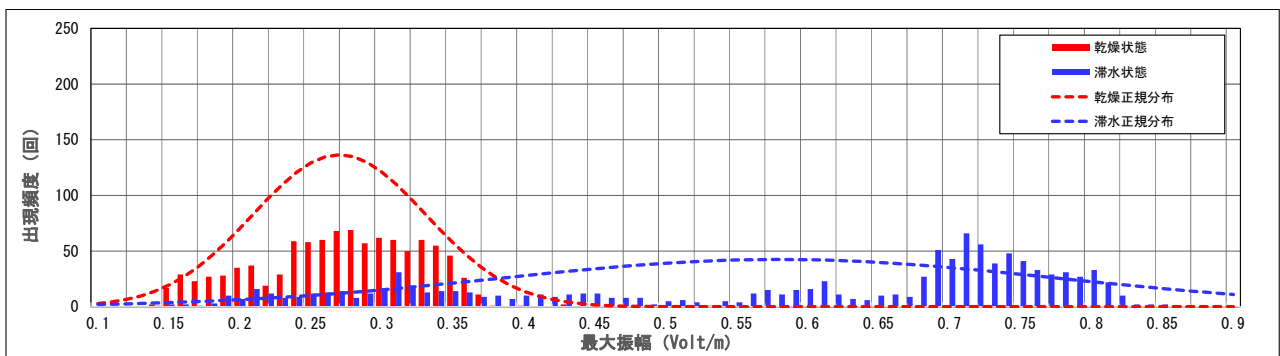


図-9 電磁反射波の最大振幅の頻度分布

かったため、鉄筋からの反射が不明瞭になっている可能性が高い。

以上の結果を用いて、反射振幅の特性から滞水検知モデルを作成する。作成には、図-7に示す、起点側の滞水スペースを含む範囲を使用し、振幅による閾値の設定を行う。

4.2 健全部と滞水部の反射波の比較

図-8に健全部と滞水部の反射波の違いについて示す。これは健全部と滞水部を計測した場合の代表波形データを重ねたものである。舗装と床版上面の境界部に着目すると、滞水部を計測した場合の反射波が、健全部を計測した場合の反射波を大きく上回っている。これは、前述した水の比誘電率によって反射エネルギーが増大していることを示しており、水の有無によって反射波の最大振幅に大きな違いが表れることがわかる。

4.3 床版状態を推定するための最大振幅の閾値

図-9に反射波最大振幅の頻度分布を示す。健全部と滞水部ではそれぞれ最頻値に明確な差が出ている。健全部の最頻値は0.28であり0.15~0.36の値域で出現頻度が多い。対照的に滞水部の最頻値

は0.71であり0.68~0.81の値域で出現頻度が多く、この最頻値は、健全部に比べて約54%大きい最頻値となっている。この比較結果は既往研究⁵⁾においても約60%程度大きくなるとされており同様の傾向であることが確認できる。また滞水部は、健全部に比べると分布のばらつきが大きい。これは滞水スペースに注水して滞水箇所を作り出す際、その湿潤状態にばらつきがあった可能性がある。

次にこれらの分布を正規分布で近似する。図-9には正規分布で近似した結果を併せて示している。近似の結果、健全部の平均値は0.27であり、滞水部は0.58であった。また、それぞれの偏差は、健全部で0.06、滞水部で0.20であった。図-9より、それぞれの平均値、最頻値付近では、健全部と滞水部で明確に振幅が異なるため分離することが可能であるが、それ以外の区間においては滞水部のばらつきが大きく両者を明確に分離することが難しい。ここで、健全部の信頼区間として、平均値から 3σ 以上を想定した場合に0.45となる。これは健全部の95%以上の信頼区間であり、この値を上回る場合は極めて高い確率で『健全ではない状態』となる。また、模型床版製作時に測定した水分計のカウント値と、健全箇所及び滞水箇所の最大振幅値を

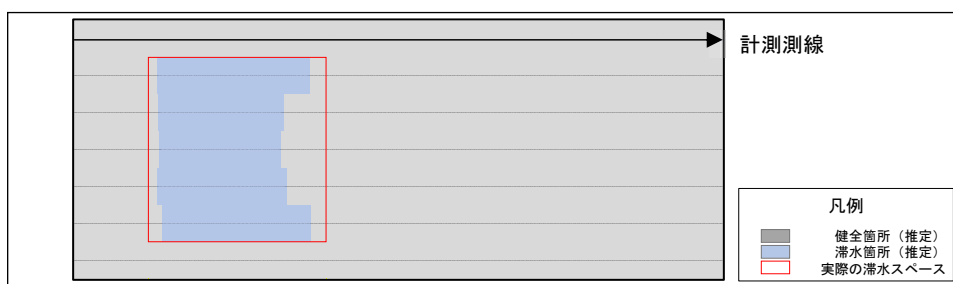


図-10 滞水検知モデルの検証結果

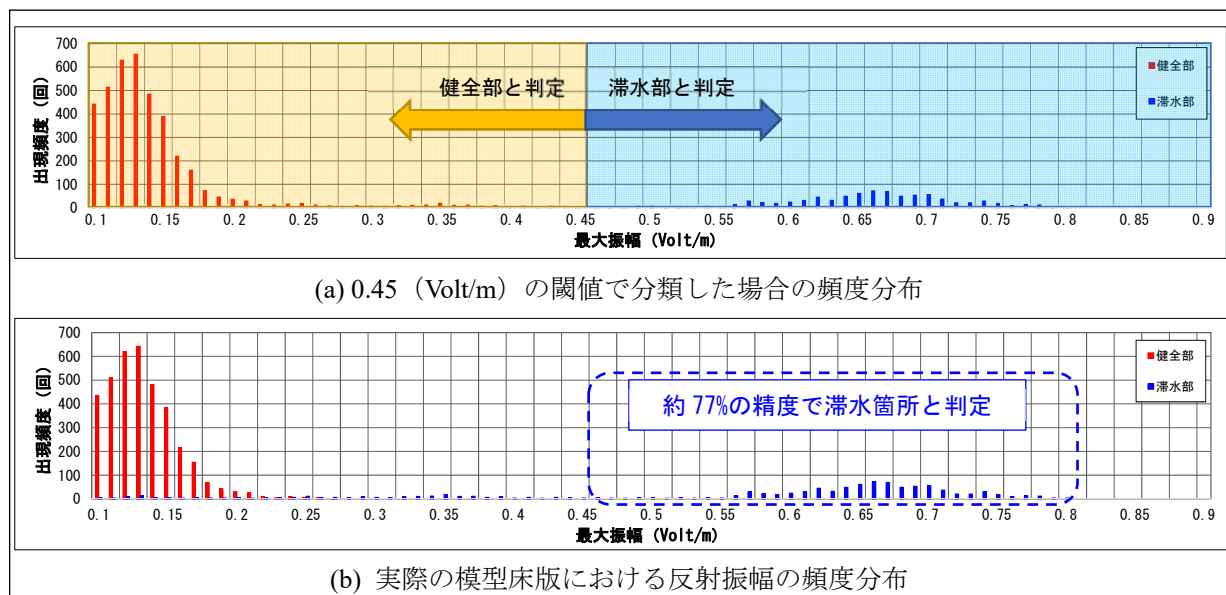


図-11 滞水検知モデルで分類した結果と模型床版の真値との比較

比較すると最大振幅値が 0.45 以内であれば、カウント値が概ね 40～300 の間であり、0.45 より大きい値であれば 500～990 の間である可能性が高い。表-5 に示したカウント値の目安を提案した谷倉ら⁹⁾の研究でも滞水状態をカウント値 521 以上としていることから最大振幅値が 0.45 より大きい値であれば滞水している可能性が高いことが示された。

よって、本検証では健全部とそれ以外の状態（本研究内では滞水箇所）を最大振幅 0.45 (Volt/m) で分離する手法を滞水検知モデルとして塗膜防水工を施した床版模型供試体の電磁波レーダ結果を検証することとした。

4.4 滞水検知モデルの検証

モデル検証用の模型供試体で計測された振幅値を振幅 0.45 (Volt/m) で分離した結果を図-10、図-11 に示す。なお、レーダ計測による検証は上記で設定した閾値により、反射波の最大振幅を分類することで、水分検知の精度を確認することが目的であるため、模型床版に注水した状態で計測を実施した。

まず図-10 において、滞水スペースの箇所が一部を除いて青色に着色されていることが確認できる。また同図中に示された赤線部分は設計値上の滞水スペースの範囲を示している。

次に、図-11 を比較する。図-11(a)は閾値を 0.45 としたモデルで推定したヒストグラムを示しており、図-11(b)は設計値通りに滞水ポケット内が均一に湿潤状態となった場合に計測される振幅のヒストグラムである。これらを比較すると、滞水検知モデルの閾値 0.45 (Volt/m) 以下に健全部がすべて収まる結果となった。一方で滞水部はばらつきが大きく、健全部の範囲にも含まれているが、それらは全滞水箇所の内の約 23%であった。よって滞水検知モデルの精度は約 77%と比較的高精度に滞水を検知可能であることが分かった。

これらの中で、明確に振幅が小さい箇所に関しては、閾値設定用に用いたシート系防水の模型供試体同様、注水後に均等な湿潤状態となっていないためと考えられる。これらの箇所は模型床版の注水装置の精度により湿潤状態にばらつきが生じたためと考えられる。しかし、これらを踏まえても、滞水箇所を 77%の精度で検知しているため、十分に精度の良い滞水検知モデルと言える。

5. まとめ

表層と基層からなる舗装と防水工が施工された模型供試体の、舗装と床版上面の滞水状況を電磁波レーダの反射波最大振幅値によって滞水状態を推定できることを示した。

この手法は他の電磁波レーダで取得したものであっても、そのアンテナの直接波の振幅と当該模型床版による注水計測試験結果があればキャリブレーション可能である。これにより電磁波レーダの機材の違いによる滞水箇所 の推定結果をより正確に相互検証することが可能となる。

今後は、土砂化等の損傷が内在した場合の取得データの違いなど、実橋で電磁波レーダによる計測を実施した際に、舗装と床版上面の状態をより明確に把握できることを目標に検証を重ねていきたい。

謝辞

本稿は、「官民研究開発投資拡大プログラム」及び、「AIを活用した道路橋メンテナンス効率化に関する共同研究」の成果の一部である。

研究及び論文作成において、野田前研究員並びに松本前交流研究員には多大なるご協力を頂きました。ここに謝意を記します。

参考文献

- 1) 田中良樹, 村越潤, 長屋優子, 吉田英二: 鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性に関する最近の研究, 土木技術資料, 第56巻, 3月号, pp.30-35, 2014
- 2) 田中良樹, 村越潤: 道路橋鉄筋コンクリート床版の劣化形態の多様化と防水対策, 第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.281-284, 2014
- 3) 小林大, 永塚竜也, 田代大樹, 橋本竜也: 電磁波レーダによるRC床版上面の状態評価に関する実験的検討および現場適用事例, 第九回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.73-76, 2016.
- 4) 永塚竜也, 小林大, 唐木正史: RC床版上面の状態グルーピングアルゴリズムの適用事例, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.71, CS11-001, 2016
- 5) 松本直士, 大島義信, 野田翼, 尾西恭亮, 石田雅博: 電磁波レーダ法を用いたRC床版の定量的状態判別手法, 構造工学論文 Vol.66A, 2020.3
- 6) 野田翼, 松本直士, 遠藤正史, 石田雅博: 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, コンクリート工学年次論文集 Vol.42, 2020
- 7) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック, 手法編, 第7章, pp.403-404, 1998
- 8) 松本直士, 野田翼, 石田雅博, 金澤文彦: 床版模擬供試体の比誘電率計測および滞水層の伝播速度差計測, 2020年度(令和2年度全国大会)第75回年次学術講演会, 2020
- 9) 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, 2013.3

(2020年7月17日受付)