

論文

RC 床版の電磁波による非破壊調査記録の解析処理

尾西恭亮*, 小林貴幸*, 松本直士**, 野田 翼***, 田中良樹*

*国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6)

**国立研究開発法人土木研究所 (現 株式会社復建技術コンサルタント)

***国立研究開発法人土木研究所 (現 西日本高速道路株式会社)

RC 床版の土砂化による劣化診断のために、電磁波レーダ (地中レーダ, GPR) による非破壊調査が適用されている。GPR が捉える床版からの電磁波の応答信号は、土砂化、滞水、舗装の浮き、舗装面の起伏など、様々な状態の影響を受ける。ひとつの記録断面だけでは、個々の状態を識別できず、検出される異常領域が何を捉えているのかはわからない。多数の応答異常が検出された橋梁では、劣化損傷が進行している可能性が高いが、個々の異常信号が緊急性の高い土砂化等の状態を捉えているとは限らない。しかし、各々の状態に対する電磁波の応答は異なるため、応答の仕方に即して、特定したい状態を識別する方法が存在する。本報告では、代表的な床版の状態における電磁波の応答の仕方を説明し、滞水などの特定したい対象を識別する解析断面の利用方法を紹介する。

キーワード：土砂化、滞水、電磁波レーダ、地中レーダ

1. はじめに

橋梁床版の土砂化はその進行が早い傾向にあり、舗装に明瞭な症状を示すような段階では、すでに抜け落ち等が発生するような深刻な状態であり、検知が遅れる場合がある^{1),2)}。このため、非破壊手法による舗装に症状が出る前の早期検知が求められている。様々な非破壊調査手法がある中で、電磁波レーダ (地中レーダ, GPR = Ground-Penetrating Radar) が注目されている。

GPR は、土木の分野では、路面下の埋設管や空洞の調査、およびトンネル覆工コンクリートの厚さや背面空洞の調査に多用されており、土工構造物中を直進する周波数帯域の電磁波の応答により、非破壊で構造調査を行う技術である。昨今の技術革新により、電磁波の送受信を高速に処理できるようになり、一般的な車両走行速度で十分な測定間隔の記録が取得できるようになった。また、複数のアンテナを搭載し、1 回の走査で一般的な車両相当の幅の範囲の記録が取得可能な装置が普及し、路面下の記録取得に要する時間やコストが減少したことにより利用性が高まった。

GPR の有用性のひとつは、交通規制を行わずに調査が行える点であり、交通の要衝となる橋梁の調査では大きな利点となる。ただし、車載型または車両牽引型 (以後車載型と総称する) の GPR は、アンテナ面を路面から 9cm 以上離さなければならない等の制約があり、高い記録品

質の記録が必要な場合には、交通規制下で詳細調査を実施する必要がある。

また、電磁波は水に対する応答特性が高い。土砂化が生じる原因のひとつに滞水の影響が指摘されており、舗装下の滞水の状態を把握可能な能力は有利となる。一方、媒体の力学的強度は電磁波の伝播に直接影響を与えないため、コンクリートの劣化等を直接検知することは難しい。舗装の浮き等の検知には打音試験が有効であるが、電磁波では弾性物性を捉えることはできない。

GPR による橋梁床版の劣化箇所の検出には、水平断面が多用される。水平断面においては周囲と応答が異なる異常箇所が明瞭に特定できる。しかし、応答異常の原因は、土砂化や浮きとは限らず、舗装の起伏や鉄筋深度の相違など、床版が健全な場合もあり得る。単一の記録解析処理断面により異常領域を判別しているだけでは、検知したい対象の検出効率は一定以上向上しない。

そこで、本報告では、代表的な現象の理論的な電磁波の応答を整理し、実際の供用橋梁の調査記録を基に評価判別手法について考察する。

2. GPR による橋梁調査

2.1 車載型と手押し型

GPR は車載型と、カート式およびハンディ式 (以後手押し式と総称する) に大別される。主な車載型は複数の

アンテナを搭載したマルチチャンネル方式で、中心周波数が500~800MHz帯域に設定され、深度1.5m程度までの空洞調査に適した設計となっている。調査に用いる電磁波の周波数を高くすると、分解能は高くなるが、探査可能な深度は浅くなる。橋梁床版用には、探査可能な深度は浅くても良いので、より高周波の装置が適しているが、高周波仕様の車載型の汎用装置が販売・運用されていないため、空洞調査用の装置の利用が現実的である。このため、やや特性の低い周波数帯域の応答を用いた調査方法の整理が必要で、高周波帯域による詳細調査の方法とは分けて整理する必要がある。

なお、送受信する電磁波の周波数特性はアンテナの大きさに決定されるため、高周波を用いる場合には、専用のアンテナを備えた装置が必要となる。ただし、ステップ周波数方式の場合は送信帯域を変更して、いくらか周波数特性を調整することができる。

車載型は交通規制を必要としない大きな利点を有するが、アンテナ面を地表から離す必要があり、アンテナと路面との間の空間で生じる多重反射により信号品質が低下する。また、高速度移動による測位誤差の増大、道路端部の欠測、横断方向の走査記録が得られないことに加え、装置が高価な点が欠点となる。

一方、手押し式では高周波仕様の装置も普及しているため、高分解能な調査を実施できる。手押し式を用いて詳細点検を行う利点は、高周波帯域による高分解能な記録、アンテナ面が路面と接することによる高いS/N（信号対雑音比）の記録、路面端部までの調査記録の取得、鉄筋を適切に捉えることが可能な走査方向が異なる記録の取得、繰り返し調査の適用が可能な高い調査位置精度などがある。

空洞の調査では、車載型で概要調査、手押し式で詳細調査を行う。空洞は頂部の形状が複雑なため、詳細調査において複数の方向から測定し、判定確度を向上させる。橋梁の場合は、異常域の検出のために複数の方向による走査記録の必要性は乏しく、鉄筋の位置を適切に把握する目的がある場合でも、2方向の調査で十分である。

2.2 橋梁床版中の電磁波の伝播

GPRは調査対象物中を直進する周波数帯域の電磁波の応答により非破壊で調査を行う。電磁波の伝播速度、反射率、減衰率は、媒質の誘電率、導電率、透磁率の3つの物性により影響を受けるが、床版調査時には誘電率だけを考慮すれば良い場合が多い。真空の誘電率の比である比誘電率は、空気中がほぼ1なのに対し、乾燥コンクリートが $4\sim 10^3$ 、水が約81となり、水の空間占有率（体積水分率）の影響を大きく受けることがわかる。

超音波探傷では、わずかな開口の亀裂でも弾性波が透過しないため、高い感度で亀裂の検出が行えるが、電磁波の場合は亀裂も透過して伝播可能であるため、検出感度は高くない。ただし、空洞のように波長に対して十分

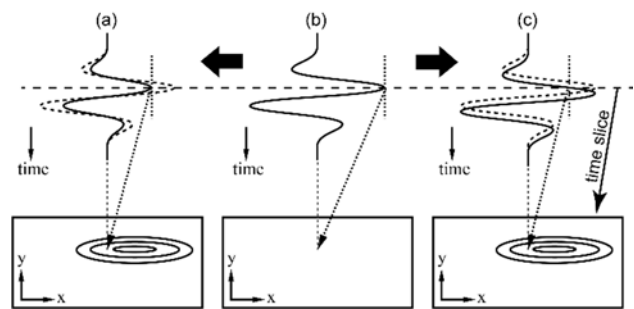


図-1 タイムスライス断面の振幅変化

な体積を有する場合は強い反射面として捉えることができる。一方、金属は全反射となるため、高い検出感度を有する。

土砂化により分離した石灰分や細粒砂が舗装の亀裂を通じて流出すれば、空隙の増大により反射波が発生し、直接的に検出できる可能性が高まる。しかし、このような重篤な状況を、異常箇所のひとつとして他の異常部と同列に検出する程度の調査しか行えなければ、GPRによる調査の有用性は高くない。より軽微な段階の劣化が進行している領域または土砂化中間層⁴⁾を検出できる能力が、非破壊手法による概略調査として強く求められる。

石灰分等の流出がなく、床版上部に空隙が形成されていない初期段階の状態でも、体積水分率が上昇し、異常領域として検出できることがより重要となる。

2.3 タイムスライス断面の異常域

GPRは、一組の送受信アンテナにより、反射・回折信号を得る。これを直線上で走査することにより、測線下の記録断面（プロファイル記録）を得る。横軸が測定位置で縦軸が時間（往復走時）となる。走時（travel time）とは、波動が媒質中を伝播する時間を指す。複数の平行測線の記録を集め3次元データボリュームとし、同走時面の記録のみを集めることによりタイムスライス断面を得る。GPRでは異常箇所の特定に、タイムスライス断面が多用される。測定地点により伝播速度が異なることから、同走時面の情報に過ぎず、同深度の情報を集めた水平断面でないことに注意する。

タイムスライス断面で周囲と異なる異常な振幅を示すのは、代表的な応答信号（b）に対して、反射振幅が変化する場合（a）と位相が変化する場合（c）が考えられる（図-1）。上段の波動記録の同走時面（横方向の破線）を並べると下段のタイムスライス断面となる。タイムスライス断面の振幅異常は、波動記録の振幅変化（a）と位相変化（c）を区別できない。

一方、GPRの波形記録に影響する各現象を図-2に整理する。振幅の変化は、反射対象の反射係数が変化している場合（A）と、電磁波が伝播する経路上のどこか（反射対象物と送受信アンテナの間）で、反射係数の異常や減衰が生じている場合（B）がある。また、位相の変化は、反射対象の反射係数列が多段になるなどして周波数変調

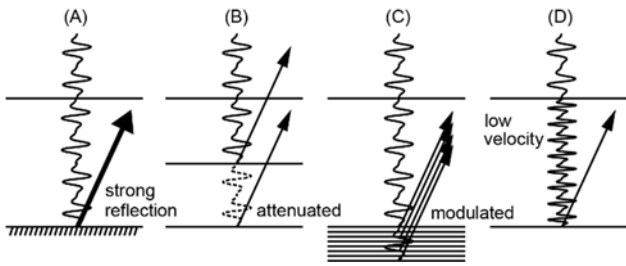


図-2 振幅と位相の変化を生じる現象

を生じる場合 (C) と、経路上のどこかで伝播速度異常や伝播時間の相違が生じている場合 (D) がある。

橋梁の各状態異常が A~D のいずれかまたは複合して電磁波の応答に影響する。ただし、空間的な波動の重ね合わせ等の 1 次元波線上の現象で説明できない影響も存在するが、ここでは省略する。

例えば、オーバーレイの領域が異常域として識別できる場合がある。これは、舗装の材質が異なることにより、電磁波の伝播速度が異なる影響 (D) の他に、研り施工時に床版が一部切削され舗装厚が増したため通過時間が変わる影響 (D)、舗装材質が異なることによる床版上面境界での反射係数が異なる影響 (A) などが考えられる。

舗装と床版との間に浮きが生じている場合でも、ほとんど開口はないため、A~D のような電磁波の応答に対する影響は生じにくい。しかし、浮きの認められた領域を GPR が異常領域として検出する場合は多く、水分が隙間に侵入することにより、反射係数が異なっている (A) ののではないかと推定する。導電率の低い媒質の垂直入射の反射係数は、2 つの媒質の比誘電率のみの関数で解析的に近似して表せる。

これに対して、土砂化が生じているが軽微で、石灰分が流出せず空隙が生じていない場合は、水分の供給により土砂化域の伝播速度が低下する (D) と考えられる。

GPR の帯域の電磁波の、導電率が低い媒質中の伝播速度は、およそ光速を比誘電率の平方根で除した値となる。

A と C の現象は、床版上面に相当する走時の信号で評価する必要がある。一方、B と D の現象は、対象より深い深度の反射イベントで評価した方が良い。なお、イベントとは、GPR 記録上の特徴的な波動群を指す。

また、GPR は鉄筋から強い反射波を得られるので、鉄筋の反射イベントの影響が強い走時での評価がよく用いられる⁵⁾。車載型のアンテナは高周波仕様でないため、表層近傍の床版上面の反射波を安定して扱うのが難しく、鉄筋のイベントによる評価の方が有効な場合が多い。鉄筋からの反射や回折のイベントで床版の健全性評価を行う場合は、それより上部領域の速度異常や減衰異常の検出を利用している。特に速度低下による D の現象を用いて床版の劣化損傷域を捉えようとしている。

なお、電磁波の放射方式で近年増加傾向にあるステップ周波数型は、信号を戻す処理過程で、本来より浅い深度に相当する走時記録の振幅にも影響が出る。この場合、

より浅い深度に相当する走時でも鉄筋の影響を受けて評価してしまう可能性があることに注意する必要がある。

2.4 GPR による検出対象

タイムスライス断面上の振幅変化が大きければ、その橋梁は全体として劣化や損傷が進行している可能性が高い。しかし、その個々の異常域の原因が、土砂化なのか、舗装の構成の相違なのか等の識別は、単純な断面の評価だけでは難しい場合がある。

調査判定の向上には、各々の状態を特徴的な現象として捉える応答イベントを選択し、論理的に判断する方法が有効であると考えられる。路面の起伏、舗装厚や床版厚、鉄筋位置と深度、浮き、土砂化、滞水、などの床版の様々な状態の相違が、電磁波の振幅や位相に影響する。異常の検知にとどまらず、現象の特定や状態の判別を行う方法を考えたい。

水分は GPR で検出しやすい影響 (速度低下による位相変化) をもたすため、有力な検出対象となり、これを用いて土砂化域等の主要検出対象を間接的に検出する手続きを考える。

一方、一般に GPR は調査可能な深度が浅い点が問題点とされるが、橋梁調査適用時の問題は極浅部である表層域の信号応答の品質が不十分である点である。車載型では周波数が高めの卓越周波数 800MHz の波長は、比誘電率が 9 程度の場合 12.5cm となり、路面と床版上面の反射波の分離は簡単ではない。

そこで、鉄筋深度の回折波の走時遅れが有力な判断指標となる。着目する状態が床版上部域における滞水であり、滞水は鉄筋の反射・回折イベントの走時を遅らせ、滞水により土砂化や劣化の進行が発生している可能性が高いと間接的に判断する手順を明確にして、解析作業を行うことが重要である。

3. 橋梁調査記録

3.1 調査位置精度

実際に橋梁で調査した記録を基に、GPR 記録の特徴と現象の判別方法を示す。はじめに、図-3 に GPR のタイムスライス断面例を示す。

調査対象橋梁は上下 2 車線の国道で緩やかなカーブを有していると共に、傾斜を有している。重交通による交通量が多く、路面に多数の亀裂が発生していたことから、RC 床版の劣化損傷が指摘されていた。

調査には、EarthRadar 社製の手押し式の GPR を用いた。1 度の走査で測線間隔が 6.5cm の 16 測線の記録が同時に取得できる。トレース (1 点の記録) 間隔は 2.7cm で記録を取得した。コード送信式の特殊な放射方式であるが、ステップ周波数式の特性に近い。卓越周波数は、空洞調査用の GPR 相当の 800MHz 付近である。Trimble 社製の RTK-GNSS を搭載し、およそ 4~5 回の適当な走査で 1

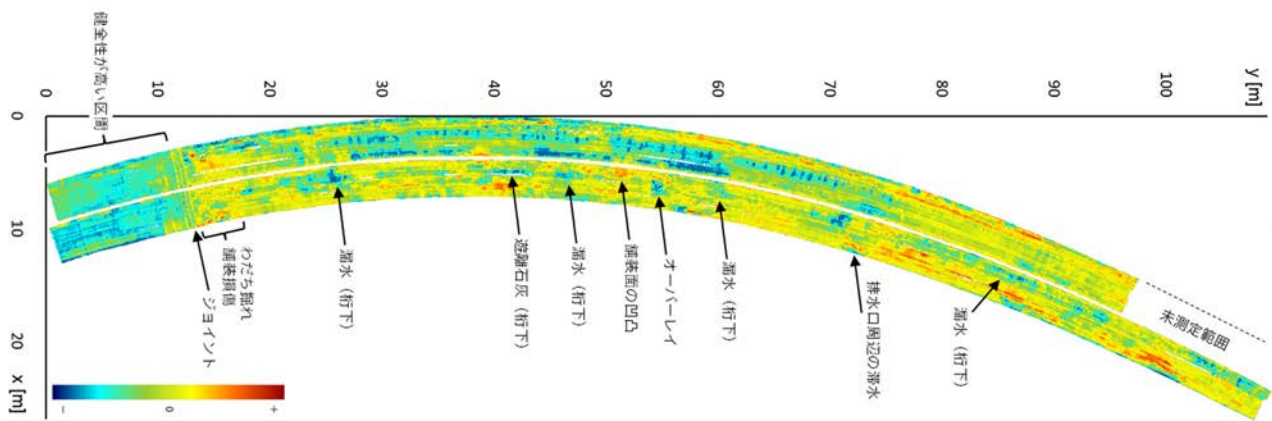


図-3 タイムスライス断面例

車線分を網羅する記録の取得が行えた。なお、RTK-GNSSはGPS等による衛星測位方式のひとつで、水平約1cmの測位精度を提供する。

図-3は床版上面付近に相当する2nsの走時の記録で、暖色系が正の振幅を示す。振幅値はGPRの装置、測定条件、解析処理等により変化し、絶対値に物理的な意味はない。特徴的なイベントの代表箇所を橋梁の状態の説明を付加した。排水口付近に異常域の分布が認められる。また、オーバーレイの境界が認識できる。桁下漏水の領域は約5年前のひび割れ調査等における記録に基づいており、異常域として判定できる。GPRではジョイントの箇所は明瞭に識別できる。健全性が高い区間は、振幅異常が認められないことがわかる。

カート式の場合は縁石近傍まで調査が行える点が利点となるが、センターライン付近は交通量の多い区間では片側交互通行では危険を伴うため、車載型同様に記録を得ることは難しくなる。橋梁の端部や中央部は、舗装の施工境界となり、水分が床版まで侵入する経路となる場合が多く、調査範囲としたい領域である。

カーブを有する橋梁の調査位置の特定には、走行距離計や路面のオルソ画像との整合の他に、GNSSによる測量記録も有効で、橋梁の曲線区間を再現したタイムスライス断面が得られる。

マルチチャンネルGPRは何回かの走査を繰り返すことにより記録範囲や記録密度を向上させることができ、この場合、より高い調査位置精度の測定が求められる。RTK方式による水平方向の絶対精度は1cmを有し、有効である。しかし、GNSSによる測量記録は、トラスや樹木など上空視界が遮られる場合は利用できなくなり、慣性航行装置を付加する必要性が生じ、コスト高となる。

RTK-GNSSの市販装置は、大抵10Hz程度で測位できる。20Hzで測位し、時速36kmで走査した場合に、50cm間隔の測位となる。2cmの記録間隔で調査すると、25倍の乖離を走行距離記録等を用いて補間する必要性が生じる。

GPRの記録解析の手法は、多くを石油開発等の地震探査用に古くから開発されてきた技術を利用できる。しか

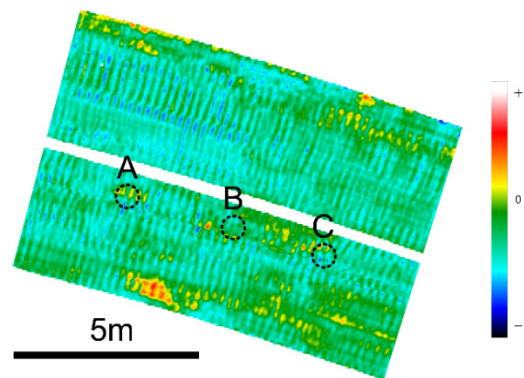


図-4 タイムスライス断面 (拡大)

し、実用では基本的な解析手法しか適用されていない。高度な解析手法の適用に障害となるのは、調査位置精度が不十分な点で、これはGPRが数十年来抱えている課題であり、費用対効果の関係で簡単には解消できない。

位置精度の向上には、マルチチャンネルGPRの場合には、アンテナ列の方向の情報も重要となり、車載型の場合にはアンテナ面の地表からの高さも重要となる。実用技術としては、調査位置に誤差が含まれることを前提に解析体系を整えることが肝要となる。

3.2 タイムスライス断面とプロファイル断面

図-3では異常域の把握はできるが、原因となる橋梁の状態の判別は難しい。そこで、プロファイル断面を併用した状態の判別方法を示す。図-4に一部域の拡大図を示す。鉄筋からの回折波を含む2.1nsの走時の記録で、鉄筋位置が明瞭に視認できる。走査方向と平行する方向の鉄筋に対し、ボウタイアンテナの感度が低く設計されていることが一般的で、一般に走査方向と直交する方向の鉄筋しか検出できない。

調査位置の舗装路面と研り後の床版上面の写真を図-5に示す。図-4と図-5のA, B, Cは同地点を表す。A, Bは路面から損傷が進行していることがわかる。一方、Cは舗装オーバーレイにより部分補修されているだけであっ

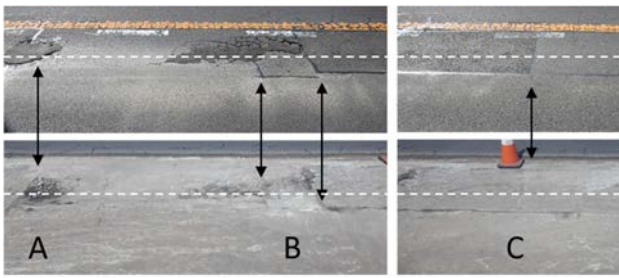


図-5 舗装路面（上）と床版上面（下）

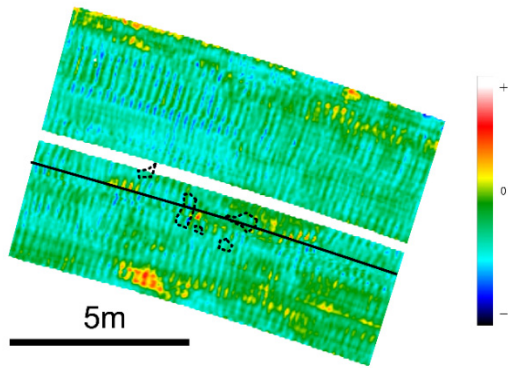


図-6 下面の漏水箇所（点線部）

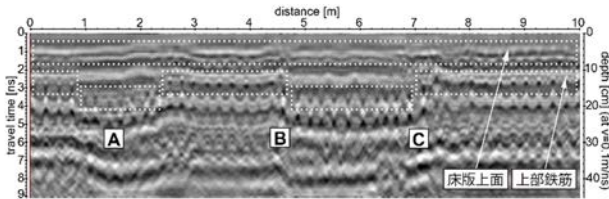


図-7a プロファイル断面（深度は一般的なコンクリートの伝播速度に基づく参考値）

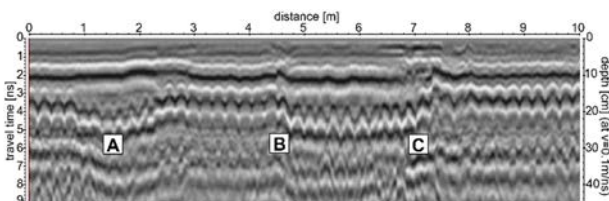


図-7b マイグレーション処理前記録

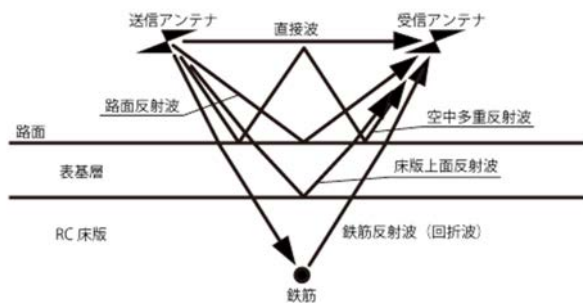


図-8 橋梁調査における典型的な電磁波の伝播

たが、床版にはうきが認められた。

GPR では A, B, C の位置は周囲と異なり、鉄筋のパターンが消えており、異常箇所と認識できる。図-6 に前述

の床版下面の調査で認められた漏水域をプロットすると、床版上面の損傷域と整合的であることがわかり、滞水を伴う損傷域であると推定される。なお、橋梁は箱桁下面からの点検は、2 ボックスであったため中央付近しか行われていない。

図-6 の直線で示される位置のプロファイル断面を図-7a に示す。横軸が調査位置、縦軸が往復走時となる。電磁波の伝播速度を 0.1m/ns とした場合の仮定深度を右軸に示している。点散乱点の回折波形を本来の 1 点に戻すマイグレーション処理を適用している。鉄筋位置が明確となる。また、処理前記録を図-7b に示す。鉄筋の回折波形の識別が容易なため、イベントの識別に併用する。

タイムスライス断面の異常箇所 (A 及び BC 間) は、プロファイル断面では鉄筋の回折波の走時が遅れている。一方、それより上位の床版上面からの反射には一部乱れている区間はあっても大きな走時変化はない。これは、オーバーレイに関わらず、この調査領域の舗装と床版の境界の反射は材質の相違や滞水等による影響が小さいことを示している。そのため、床版上面から鉄筋までの走時が遅れていると判断できる。この原因は2つ考えられるが、鉄筋の敷設深度が一部の狭い範囲だけ急に深いという可能性は低く、床版中の滞水が原因と特定できる。

電磁波の伝播速度は、媒質の種類や特に体積水分率により異なるため、実際の深度とは異なる。各地点の各走時の適切な伝播速度を求めて修正深度断面を解析する実用的な手法はまだ確立していない。人力による解析では実用性が低いため、自動解析手法を開発する必要がある。現時点で汎用的に解析が可能で、時間（走時）軸の記録に対する解析手法の整備が重要となる。

3.3 異常状態と応答現象の整理

車載型の場合はアンテナ面を路面より離す必要があり、アンテナと路面との間で強い多重反射が発生する。多重反射を抑制することが、記録品質向上に不可欠となる。多重反射の抑制を適切に行えば、反射振幅の評価による診断が有効である⁹⁾。

図-8 に橋梁調査における典型的な電磁波の伝播経路を示す。路面反射波、空中多重反射波、床版上面反射波、の応答が一部で重なり合い、反射イベントの識別が困難となる場合がある。多重反射の抑制に多用される各走時の平均値からの変動分を評価する背景除去処理（各走時において、ある測点範囲の振幅の平均値からの変化分を抽出）等の簡易処理だけでは限界がある場合は、最も強い反射が生じる床版内部の上部鉄筋の反射イベントの利用を優先する。

浮きや土砂化が存在する場合は、床版上面で相対的に強い反射や回折が発生し、鉄筋の反射強度が小さくなる。床版の体積水分率が高くなっている場合は、伝播速度が遅くなるため、鉄筋の反射走時が遅れる。

タイムスライス断面では強度の変化と位相の変化の違

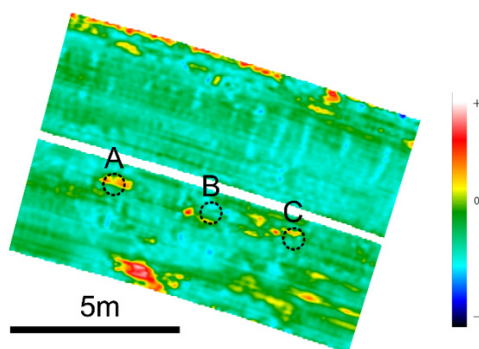


図-9 鉄筋パターンの視認性低下

いはわからないため、検出された異常域の要因が振幅と位相のどちらか、プロファイル断面で判別する。

鉄筋のパターンを認識するには、測定間隔（トレース間隔）を細かく設定する必要がある。送受信アンテナの間隔もある程度近接させた設計である必要がある。図-9に記録間隔を低下させた場合のタイムスライス断面を示す。鉄筋のイベントの視認性が低下し、異常箇所の識別に不利となる場合がある。

路面に深いわだち掘れが発生している道路では、タイムスライス断面上の異常判定は、路面の起伏の影響を受けている場合があり、異常信号の原因が内部に起因しているのか、プロファイル断面等による確認が必要となる。

波動の伝播経路長が長くなると走時の遅れは積算されるため、橋梁によっては、下面反射などの、より深部の記録の方が適している場合がある。なお、本来の鉄筋深度よりも近接した走時において、鉄筋の影響が認められる場合があり、これはGPRの放射方式の特性やマイグレーション等の処理の影響である。より詳細な評価には波形特性の良いパルス式の方が適している。

また、鉄筋による回折パターンが見えなくなる箇所は異常領域として判定できる。鉄筋の模様の視認性が低下する原因は、滞水等による伝播速度の低下により走時が遅れる場合と、減衰や乱反射が発生している場合がある。

タイムスライス断面等は適当な色分布で塗り分けると視認性が改善される。GPRの基本波形は必ず正負に振れているため、正負は振幅強度を示す点では相違はない。しかし、1波長内のわずかな位相の相違を評価する場合には、正負を分析することにより振幅の変化が増大傾向か減少傾向かの特徴を評価対象とすることができる。

実際には、路面の凹凸やオーバーレイによる舗装の違いなど、他にも記録に影響する複雑な現象が多く介在している。これらが、図-2で示した4つの現象に複雑に影響する。このため、現象の原因の判別が適切に行える記録ばかりではない。

しかし、代表的な異常状態とその応答特性を中心に、特徴的な信号の整理が進めば、判別の誤りを減らしていくことができると考える。本稿がそのひとつのきっかけ

となれば有り難い。記録解析に有効な解析アイデアの共有は、GPRの判定確度の向上に寄与し、技術の普及促進と共に健全性調査の効率向上をもたらす、橋梁の維持管理効率向上を期待する。

4. まとめ

橋梁床版の土砂化等による劣化損傷域の早期検知手法として電磁波レーダ（地中レーダ、GPR）による調査手法が利用されている。車載型を用いる場合は、交通規制を実施せずに調査が行える利点がある。劣化や損傷の可能性のある領域の特定にはタイムスライス断面が分かりやすく多用される。断面上に現れる周囲と振幅の異なる異常域は、振幅異常と位相の異常が原因となる。振幅と位相の異常は、対象物の深度とそれより浅い領域の影響の場合が存在する。橋梁の劣化損傷の状態が、影響を与える電磁波の応答現象を理論的に考察し、応答現象の特定に即したイベントを評価すると検知確度が向上する。特に滞水による伝播速度の低下を鉄筋のイベントで捉える手法例を紹介した。

謝辞

九州地方整備局には、橋梁調査の貴重な機会を頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- 1) 村越 潤, 田中良樹: 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, 土木施工, Vol.55, pp.68-71, 2014.
- 2) 国土交通省道路局国道・技術課, 国土技術政策総合研究所, 東北, 北陸, 中部, 九州の各地方整備局及び北海道開発局, (国研) 土木研究所: 道路橋コンクリート床版の土砂化対策に関する調査研究, 土木研究所資料, 第4398号, 2020.
- 3) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック, 手法編, 第7章, 404p., 1998.
- 4) 田中良樹, 上仙靖: 道路橋鉄筋コンクリート床版の土砂化に関する調査～土砂化中間層とその適切な除去範囲～, 土木技術資料, Vol.61, pp.53-54, 2019.
- 5) Amos, W., Evgeniy, T. and Anderson, N.: Bridge deck assessment using ground penetrating radar (GPR) - Proceedings of the 22nd Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Society of Exploration Geophysicists, Vol.2, pp.652-668, 2009.
- 6) 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, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.791-799, 2020. (2020年7月17日受付)