

地中レーダを用いた道床バラストの細粒化および滞水評価手法の検討

東海旅客鉄道株式会社 正会員 ○千田 耕大
株式会社ジオファイブ 高橋 亨

1. はじめに

道床バラスト（以下、バラスト）の検査・調査は、主に目視や人力での掘削により行っているため、労力やコストがかかる反面、劣化状態の定量評価はできていない。

地中レーダ技術は、国内外において様々な分野で広く活用され、鉄道の分野でも軌陸車等に搭載して埋設物や空洞の探査に用いられている。高須らは、地中レーダを用いたバラスト状態の定量評価手法の検討を進めてきた¹⁾。

本稿では、バラスト層を模擬した試験供試体を製作して地中レーダによる測定試験を行い、バラスト層の厚さ、主な劣化状態である細粒化および滞水の評価手法を検討したので報告する。

2. 地中レーダによる評価手法

地中レーダでは、図1に示すアンテナから地中に電磁波を発信し反射波を受信することで、電磁波の送信から反射波の受信までの時間（以下、往復走時）と振幅の関係を示す反射波形が得られる。一般的な地中レーダ探査では、電磁波が電気的特性（比誘電率）の異なる媒質の境界面で反射する性質を利用して、電磁波速度と往復走時から媒質の境界面の深さ、すなわち埋設物等の深さを算定する。

本研究では、反射波形がアンテナからの電磁波（入力波形）が比誘電率の異なる媒質の境界面で反射したものであることから、これを逆解析することで反

射係数を算出し、式(1)から式(3)の関係式より体積含水率を求める手法²⁾を用いる。

$$r_i = \frac{\sqrt{\varepsilon_i} - \sqrt{\varepsilon_{i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_i} + \sqrt{\varepsilon_{i+1}}} \quad \text{式(1)}$$

$$v_i \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_i}} \quad \text{式(2)}$$

$$\theta_i = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon_i - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_i^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_i^3 \quad \text{式(3)}$$

ここで、 r_i ：反射係数、 ε_i ：比誘電率、 v_i ：電磁波速度、 c ：光速、 θ_i ：体積含水率である。加えて、反射波形に強い反射がみられた地点までの往復走時と、式(2)で求めた電磁波速度からバラスト厚さも推定できる。

また、バラストは健全な状態と細粒化した状態とで比抵抗（導電率の逆数）が異なるため、電磁波の減衰に差が生じることが考えられる。一般に土砂は碎石に比べて比抵抗が小さくなる³⁾ため、細粒分を多く含むバラストも同じ傾向を示すと考えられる。細粒化については、供試体底面までの反射波形の減衰係数を算出し、評価に用いることとした。

3. 試験内容および結果

試験供試体（以下、供試体）の全景を図2に示す。供試体は、土槽にバラスト等の材料を投入し締め固めながら製作した。供試体の構成と細粒化層の材料配分を図3及び表1に示す。供試体は、路盤層を想定したクラッシュラン層 200mm と、バラスト層 500mm の構成を基本（CASE1、健全な状態を想定）とし、バラスト層の一部に細粒化を模擬してクラッシュランやカオリンを混ぜた CASE2、CASE3、細粒化に加え、滞水を想定して細粒化層に散水した CASE4 の4種類とした。CASE4 の体積含水率は、細粒化層に土壌水分計を設置して測定した。

測定結果の例として、CASE3 で得られた反射波形を図4に示す。反射波形から振幅最大箇所の上位 2

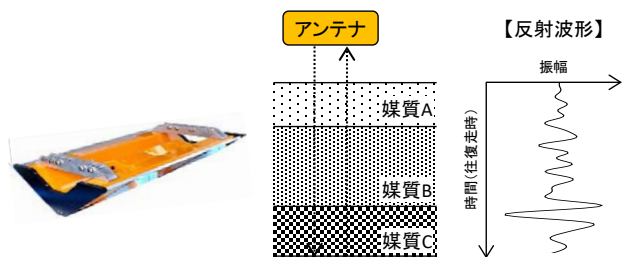


図1 地中レーダの概要

キーワード 道床バラスト、地中レーダ

連絡先 〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33 東海旅客鉄道株式会社総合技術本部技術開発部 TEL:0568-48-5380



図 2 試験供試体

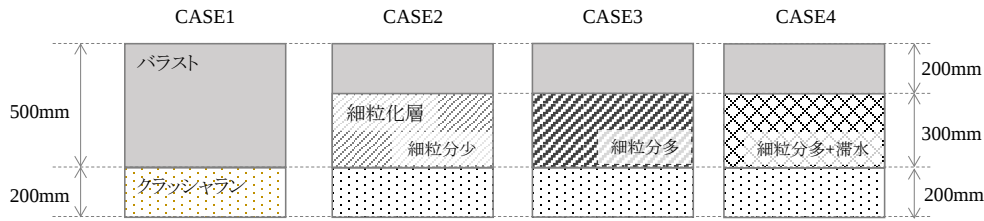


図 3 試験供試体構成

表 1 細粒化層の材料体積比率と散水量

	バラスト (%)	クラッシュラン (%)	カオリン (%)	水 (kg)
CASE1	—	—	—	—
CASE2	75	25	0	0
CASE3	60	30	10	0
CASE4	60	30	10	6.2

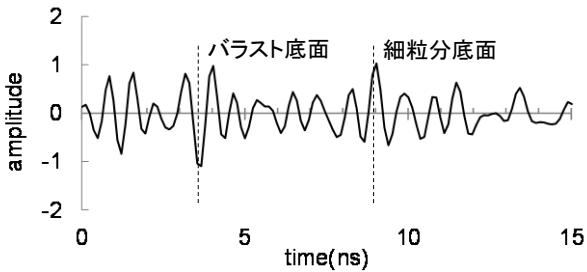


図 4 反射波形の例 (CASE3)

表 2 各層の厚さ推定結果

	バラスト層 (mm)	細粒化層 (mm)
CASE1	496	—
CASE2	204	490
CASE3	169	461
CASE4	152	399

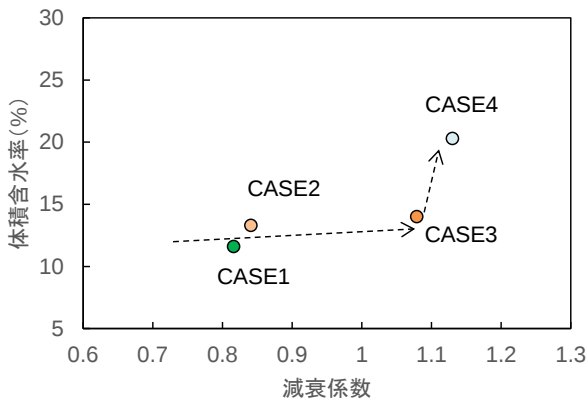


図 5 細粒化と滞水状態の評価

点をバラスト底面、細粒化層底面と推定し、この点を境界としてバラスト層および細粒化層の厚さを算出した。各ケースの算出結果を表 2 に示す。CASE4 では実際の厚さより小さくなったものの、他のケースでは概ね一致する結果が得られた。

次に、細粒化と滞水状態を分析した結果を図 5 に示す。グラフの横軸は反射波形から求めた減衰係数、縦軸は反射波形の逆解析から求めた細粒化層 (CASE1 はバラスト層) の体積含水率である。CASE1、CASE2、CASE3 を比較すると、健全なバラスト CASE1 と細粒分が少ない CASE2 では明確な差異は見られないが、細粒分が多い CASE3 では減衰係数が増加した。一方で、この 3 ケースでは体積含水率はほとんど変化しなかった。CASE3 と CASE4 を比較すると、減衰係数の変化量は小さく、体積含水率が 7% 程度上昇した。土壌水分計で算出した体積含水率は 27% であり、地中レーダから求めたものとは乖離があった。これは、解析の初期値として与えるバラスト表層面の初期誘電率 ϵ_1 の設定などが影響しているためと考えられる。体積含水率の絶対値には乖離があるものの、健全状態に比べて細粒化、滞水の傾向が減衰係数、体積含水率に個別に影響する結果が得られた。

4. おわりに

本研究では、バラスト劣化状態把握を目的に、地中レーダによる探査結果を用いた評価手法を検討し、細粒化や滞水というバラストの主な劣化状態を評価できる見通しを得た。

今後は、逆解析による体積含水率推定の精度を向上させるため、用いるパラメータ等の最適化を進めるとともに、営業線で試験測定を実施し、手法の妥当性を検証する。

参考文献

1) 高須、高橋：地中レーダによる道床バラストの評価手法の検討、土木学会年次学術講演会、2022 年 9 月。
2) 物理探査ハンドブック、物理探査学会、pp.404、1998。