

## 地中レーダによる道床バラストの評価手法の検討

東海旅客鉄道株式会社 正会員 ○高須 豊  
株式会社ジオファイブ 高橋 亨

### 1. はじめに

道床バラストの検査は、主に目視により行っているため、検査の実施に労力を要する上、道床バラストの劣化状態の定量的な評価には至っていない。

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。地中レーダの探査結果を検査に活用できれば、効率的な道床バラストの状態把握が期待できる。

本稿では、地中レーダによる探査結果を用いた道床バラストの評価を試みた結果について報告する。

### 2. 地中レーダ探査

地中レーダ探査では、図1に示すアンテナから地中に電磁波を発信し、反射波を受信して地下構造を把握する。探査によって得られるのは、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である。多数の送受信素子が搭載されたアンテナを用いて連続的に探査することで、図2に示すような反射波形断面が得られる。

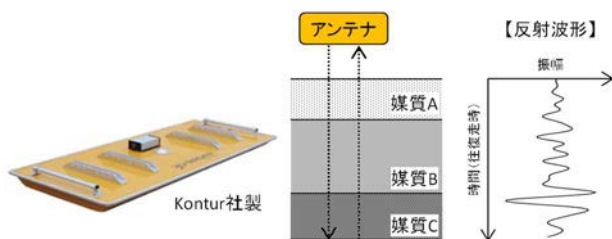


図1 地中レーダ探査

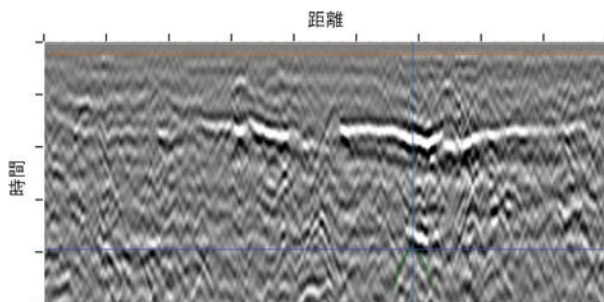


図2 反射波形断面（レール長手方向）

### 3. 評価手法

一般に、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得る。しかし、電磁波速度は細粒化や滞水の状況によって変化するため道床厚を正確に得られない。そこで、反射波形に着目することで、道床厚や含水状態の評価を試みた。

図3に、評価手法のイメージを示す。反射波形は、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が得られる。

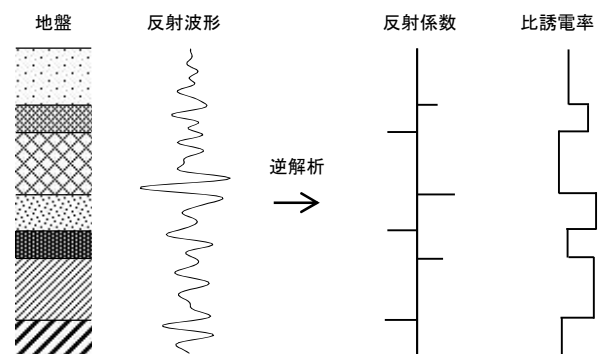


図3 評価手法のイメージ

境界面における反射係数 $r_i$ には前後の媒質の比誘電率 $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_{i+1}$ を用いて式(1)が、電磁波速度と媒質の比誘電率、光の速度 $c$ には式(2)が、それぞれ成り立つ。式(1)は漸化式であるから、地表付近の比誘電率 $\epsilon_1$ が既知であれば反射係数 $r_i$ を用いて比誘電率 $\epsilon_i$ 、電磁波速度 $v_i$ が求められる。

道床厚は、求めた電磁波速度と、反射波形から読み取った道床と路盤との境界面の往復走時から求めて評価する。含水状態は、求めた比誘電率と、土壌の比誘電率と体積含水率の関係を示す経験式(3)<sup>1)</sup>から得られる体積含水率により評価する。

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

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

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

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

#### 4. 試験とその結果

各種の試験を通じて、道床厚と含水状態の評価の可否を検討した。

##### (1) 道床厚

道床厚が既知な軌道上を探索し、逆解析により求めた道床厚と既知の道床厚を比較した。その結果、図4に示すとおり、概ね±5cm程度の精度で推定できた。

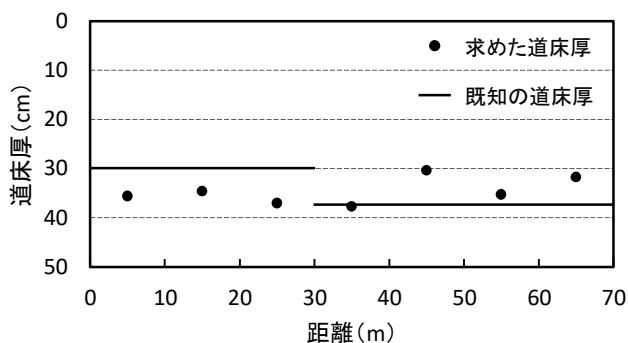


図4 道床厚

##### (2) 含水状態

図5に示す供試体に注水しながら連続的に探索し、水面からの反射波の往復走時の時間変化を観察した。その結果、図6に示すように、水位の上昇に伴って往復走時が小さくなり、地中レーダにより道床内の水面を捉えられることを確認した。

次に、水面が道床バラスト上面から200mm時点の反射波形を用いて、逆解析により水面より下の道床バラストの体積含水率を求めた。得られた体積含水率は約40%であった。ここで、過去の道床バラスト石質試験結果から単位体積重量は1.6~1.8 g/cm<sup>3</sup>程度、碎石の比重は2.5 g/cm<sup>3</sup>程度である。これらより間隙率は30~40%程度と推定され、水面より下の体積含水率はこれと同等と考えられる。このことから、求めた体積含水率はよい推定値を与えていると考えられる。

##### (3) 体積含水率コンター図

東海道新幹線の本線で探索を行い、逆解析により体積含水率を求めた。図7には、求めた体積含水率を、深さ方向および距離方向のコンター図として表示した。こうした表示方法を用いることで、軌道内の滞水状況を可視化できる。

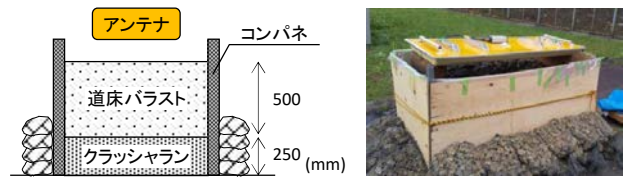


図5 供試体

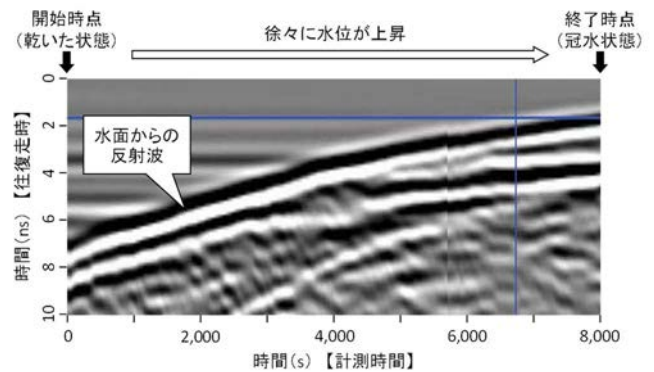


図6 往復走時の時間変化

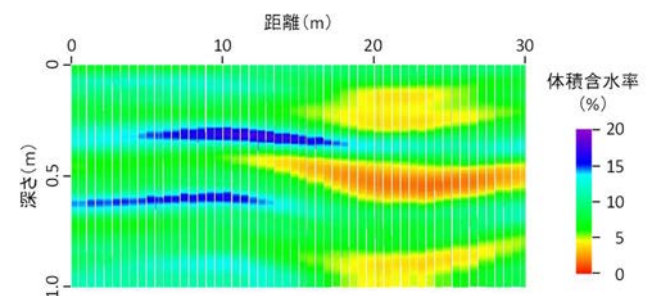


図7 体積含水率コンター図

#### 5. おわりに

効率的な道床バラストの状態把握を目的に、地中レーダによる探索結果を用いた評価手法を検討し、道床厚や含水状態といった道床バラストの状態を評価できる見通しを得た。

地中レーダによる道床バラストの評価は海外でも行われており、細粒化や滞水による電磁波の減衰に着目した事例<sup>2)</sup>もあることから、今後も基礎的な試験により評価手法の検証を進める。そのほか、探索結果の処理によって、道床バラストの状態を簡易に把握できる仕組みについて検討する。

#### 参考文献

- 1) Topp et al., Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, Vol. 16, No.3, pp.574-582, 1980.
- 2) Z. Leng and I. Al-Qadi, Railroad Ballast Evaluation Using Ground-Penetrating Radar: laboratory investigation and field validation, Journal of the Transportation Research Record, TRR 2159, pp.110-117, 2010.