

線路下空洞探査における新たな検出手法の検討

JR 東日本 正会員 島津 優
JR 東日本 正会員 村岡 洋
JR 東日本 正会員 高橋政善
JR 東日本 正会員 ○江良文靖

1. はじめに

路盤下に生じる空洞は、軌道周辺の凹みや陥没を誘発し、安全輸送にとって重要な課題である。これに対して当社では地中レーダーを用いた技術開発に着手し、2000 年代後半から可搬式空洞探査装置（PORTABLE UTRAS）を維持管理に導入してきた。この装置は線路下 2m 以浅の地盤内における電磁波の反射強度を測定・可視化する。一方、従来の運用で空洞の検出作業は、測定データの数値化を介さず、出力画像から目視で行っていたが判定に苦慮することが多かった。そこで筆者らは客観的な空洞の検出方法を検討してきたところである。本稿では可搬式空洞探査装置（以下 P-UT）について概説し、今回、新たに考案した簡便な数値データ解析に基づく空洞検出方法と、これを既往の陥没発生箇所の測定データに適用した一事例について報告する。

2. P-UT の装置概要

探査は、電磁波を送信装置から発信し、地中の地層境界、埋設物や空洞との境界で反射した波を受信装置で受け、対象物との距離および反射波の受信時間との関連性で位置を特定する。レール上に載線した装置の送・受信機は線路方向に 2 対配置されており、一方が枕木上にあっても、もう一方で計測できる仕組みである。送信する電磁波には 2 つの周波数帯があり、比較的深部の探査が可能な 50～1000MHz 帯と、これより浅い範囲が対象で解像度に優れる 50～1500MHz 帯を用いている。1 回あたりの測定距離は線路方向に最大 20m であり、探査結果は線路方向と深度方向の 2 軸上に、反射強度の相対的な強弱を可視化した画像が出力される。

3. 従来の検出手法

従来の手法では、測定した地中の反射強度の画像から、技術者が目視で空洞を抽出していた。出力画像上には図-1 のように反射強度の分布による波がみられ、この形状から経験的に空洞の存在が疑われる箇所を読取る方法や、反射強度が相対的に高いエリアを着色処理した画像を参考に行う方法などが試されてきた。着色処理は各深度の反射強度の平均値に対して、4～6 倍のエリアを黄色、6 倍以上を赤色で出力する。

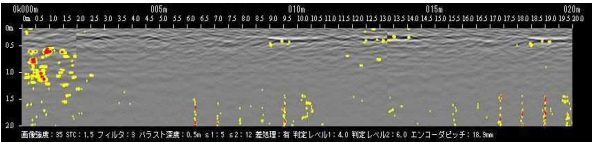


図-1 出力例

なお地層境界などにおける反射強度は、上下で異なる 2 つの材料の比誘電率から計算でき、上層を構成する材料の比誘電率を ϵ_2 、下層の材料の比誘電率を ϵ_1 とすると反射強度は以下の式となる。表-1 に軌道下を構成する主な材料の比誘電率を示す。

表-1 主な材料の比誘電率

材料	比誘電率	平均値
バラスト	5.0～9.0	7.0
乾土	2.5～4.0	3.25
湿土	14～30	22
コンクリート(乾)	4～12	8
水	81	81
導体	1.00E+10	1.00E+10
空気	1	1

$$\text{反射強度}R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}$$

4. 新たな検出手法

反射強度の算出式から、各材料の境界がどのような値をとるか計算を行った。表-2 は 2 列目に記した各材料が上層に、1 行目の材料がそれぞれ下層にある場合の反射強度のマトリクスであり、比誘電率のばらつきを考慮しなければ対角成分は 0 となる。

演算結果から上層の比誘電率が下層より大きい場合は正值となり、逆ならば負値となる。なお空洞がある場合は表の右端の列のように、他の材料より大きな正值となる。

表-2 各材料の境界での反射強度

比誘電率	材料		バラスト	乾土	湿土	コンクリート(乾)	水	導体	空気
			7.0	3.25	22	8	81	1.00E+10	
5.0〜9.0	バラスト	7.0	0.000	0.189	-0.279	-0.033	-0.546	-1.000	0.451
2.5〜4.0	乾土	3.25	-0.189	0.000	-0.445	-0.221	-0.666	-1.000	0.286
14〜30	湿土	22	0.279	0.445	0.000	0.248	-0.315	-1.000	0.649
4〜12	コンクリート(乾)	8	0.033	0.221	-0.248	0.000	-0.522	-1.000	0.478
81	水	81	0.546	0.666	0.315	0.522	0.000	-1.000	0.800
1.00E+10	導体	1.00E+10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000
1	空気	1	-0.451	-0.286	-0.649	-0.478	-0.800	-1.000	0.000

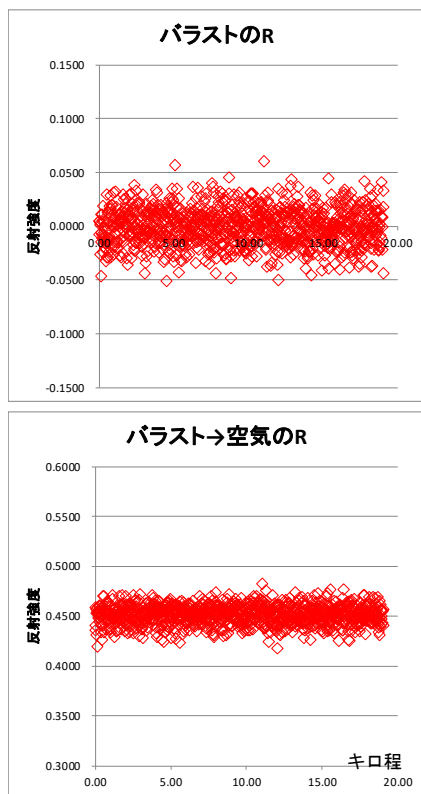


図-2 反射強度 R の分布

土やバラストの比誘電率にはばらつきがあるが、空気の値は一定である。これに着目して図-2 では比誘電率のばらつきが反射強度のばらつきに与える影響と、下層に空洞がある場合の反射強度のばらつきを試算・比較した。グラフ上段はバラスト単体の試算で、比誘電率 5.0~9.0 から平均値を 7.0 とし、標準偏差 σ がこの範囲に $\pm 3\sigma$ で分布する乱数を与え反射強度 R を計算し、線路方向 20m の測定点数と同数を横軸方向にプロットした。グラフ下段はバラスト下層に空洞がある場合の試算結果である。反射強度の平均値は表-2 と同値の 0.45 付近にあるが、ばらつきは上のグラフよりも明らかに小さくなる。

キロ程(延長)方向について
? 同一の土質等であれば、反射強度はキロ程方向に同一であるが、空洞があれば反射強度のばらつきは、減少する傾向になる。

- ①標準偏差により、反射強度のばらつきが減少する箇所を探す
- ②空洞の場合、正の反射が付加されることから、平均値が+側に遷移する箇所を探す

①and②を満たす箇所を、空洞と判断

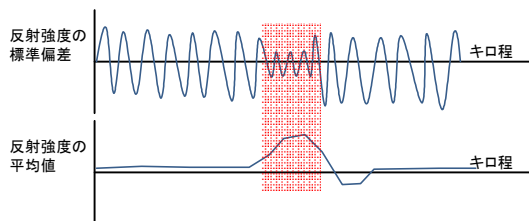


図-3 空洞がある場合の傾向

以上から下層に空洞がある場合は相対的に強い正の反射強度が得られ、かつ標準偏差は小さくなることがわかった。図-3 は横軸を線路方向として、空洞付近で測定される反射強度の波形を模式化した図である。

5. 新たな検出手法の検証

試算で得られた、空洞付近に予想される反射強度の波形を確認するため、実際に路盤陥没が起きたフィールドの計測データを数値化して平均値と標準偏差の線路方向の値をグラフ化した。図-4 は 2 対の送・受信機の組合せから得られた 4 種類のグラフである。このうち上段右の T2R1 と下段左の T1R2 では網掛けした陥没発生位置の付近に、赤枠で示す図-3 と類似の波形がみられた。また、これ以外の陥没発生箇所でも同様の結果が確認された。

以上より、探査の原理に立返り空洞検出手法を検討した結果、良好な結果が得られたので、今後は検証箇所数を増やしていきたい。

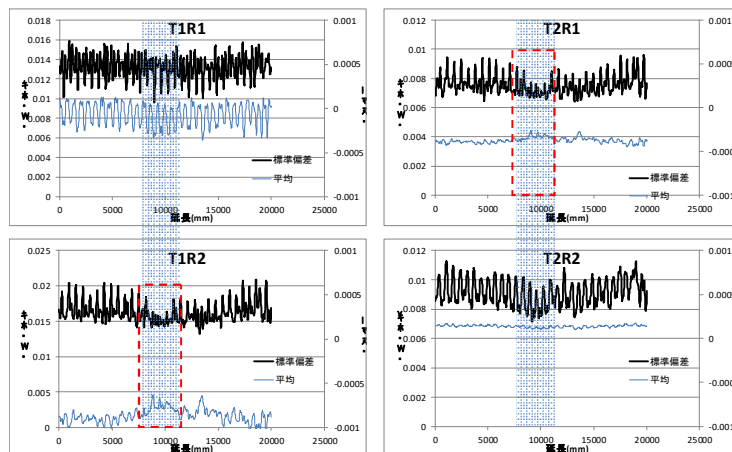


図-4 解析結果