

地中レーダに関する基礎実験 —電磁波速度と地盤の含水比の相関—

(株) 田中地質コンサルタント 正会員 ○野村 成宏
戸田建設株式会社 正会員 吉野 尚人
〃 正会員 蟹井 猛宏

1. はじめに

地中レーダ (Ground Penetrating Radar : GPR) は電磁波を地中に放射して地下物体からの反射波を利用した地下計測方法であり、地下構造を迅速かつ高精度に可視化できる物理探査の手法の1つである。地中レーダは他の地下計測手法と比較して計測対象が電磁波に特徴的な性質を持つときに有効である。具体的には、地盤内部の水分率に変化があるような岩体と土壌の地層境界面の判定、土壌の水分率の分布、岩体中の水みち、地下亀裂の検出、人工的な埋設物や遺物等の検出などが挙げられる。

地下構造等の深度を正しく知るためには地中の電磁波速度の正確な測定が必要となる。電磁波速度は、対象とする地盤(媒質)の電気的性質、つまり導電率、誘電率、透磁率によって定まる。しかし、地中レーダでは10MHzより高周波数領域で計測が行われるため、地下媒質の電気的性質は比誘電率 ϵ_r にのみ依存する。媒質の比誘電率 ϵ_r であるとき、地中での電磁波速度は次式により表される。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} (m/s) \quad \text{ここで、} v: \text{電磁波速度}(m/s), c: \text{真空中の光速}(3 \times 10^8 m/s)$$

表-1には土壌や岩石など代表的な地球構成物質の導電率と比誘電率をまとめたものを示す。乾燥状態と湿潤状態での代表値を示すが、乾燥状態ではどの物質も似たような比誘電率であるのに対し、湿潤状態では値が大きく変化しているのが分かる。つまり、土壌や岩石などで構成される地層の比誘電率は地層に含まれる水分比に大きく左右されることになる。従って、地中の電磁波速度も含水比によって大きく左右されることを示す。そこで、今回、電磁波速度と含水比の関係を調べた室内実験結果についての報告を行う。

表-1 代表的な地球構成物質の導電率と比誘電率(100MHz) ¹⁾一部抜粋 (Daniels, 1996)

媒 体	導電率(S/m)		比誘電率	
	乾燥状態	湿潤状態	乾燥状態	湿潤状態
空気	0		1	
真水	10 ⁻¹ - 10 ⁻²		81	
海水	4		81	
粘土	10 ⁻³ -10 ⁻¹	10 ⁻¹ -1	2-6	15-40
花崗岩	10 ⁻⁸ -10 ⁻⁶	10 ⁻³ -10 ⁻²	5	7
土壌(砂質)	10 ⁻⁴ -10 ⁻²	10 ⁻² -10 ⁻¹	4-6	15-30
土壌(ローム)	10 ⁻⁴ -10 ⁻³	10 ⁻² -10 ⁻¹	4-6	10-20
土壌(粘土質)	10 ⁻⁴ -10 ⁻¹	10 ⁻¹ -1	4-6	10-15

2. 室内実験の概要

図-1には今回の実験における模式図を示す。横80cm×縦50cm×高さ20cmのトロ舟の中央部の深さ約15cmの位置にφ48.6mmの鉄パイプを設置して、珪砂(6号)を敷詰めて疑似的に均質な地盤を製作した。なお、今回の実験では、電磁波速度の含水率との直接的な影響を把握するために、地盤は均質地盤とするために珪砂を使用した。図-2には、使用した珪砂の粒径加積曲線を参考までに記す。このうち1方は、乾燥状態のままを維持させて、もう1方は比較のために加水して湿潤状態とした。

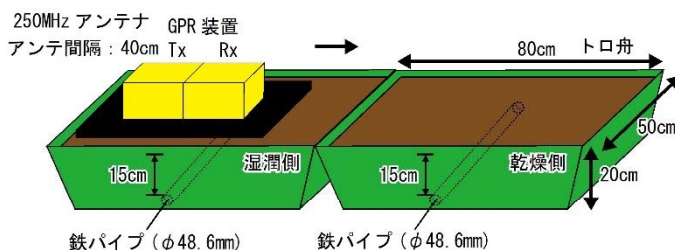


図-1 室内実験模式図

実験は、Sensors & Software社製のpulsEKKOPRO

の中心周波数 250MHz を用いてモデル地盤上を湿潤側地盤から乾燥側地盤へアンテナを 5cm 間隔で移動させて鉄パイプからの反応を検出した。1 度測定を行った後に、含水比による電磁波速度の低下を検証する目的で、湿潤側の地盤に加水して含水比を高くして再度測定を行った。対象とした地盤の含水比を把握するために地中レーダ探査後、使用した砂の含水比を測定した。

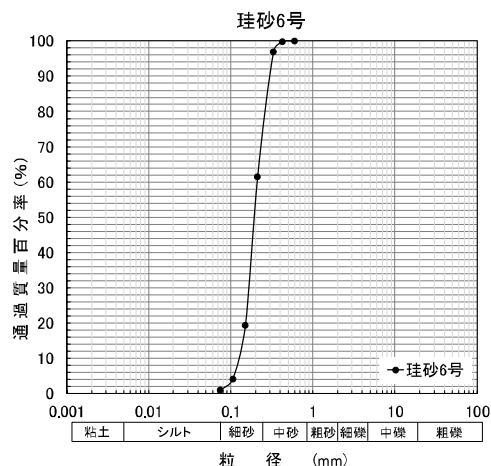


図-2 珪砂の粒径加積曲線 (メーカーからログより)

3. 室内実験結果

今回の室内実験結果を図-3 に示す。1 回目の測定では、湿潤地盤では距離 0.25m の走時 $T=5.22\text{ns}$ 地点で、乾燥地盤では、距離 1.15m の走時 $T=4.32\text{ns}$ 地点で鉄パイプからの反応と思われる双曲線状の反射が検出された。2 回目の測定では、湿潤地盤では走時 $T=10.07\text{ns}$ 地点で、乾燥地盤では 1 回目と変化せず走時 $T=4.32\text{ns}$ の地点で検出された。

反射面までの深度を $D(\text{m})$ 、送・受信アンテナ間隔を $X_0(\text{m})$ 、反射時間(往復走時)を $T(\text{ns})$ とすると、電磁波速度 $V(\text{m/ns})$ は、次のようになる。

$$V = \sqrt{X_0^2 + 4D^2} / T \quad (\text{m/ns})$$

※深度 D : 0.15m

アンテナ間隔 X_0 : 0.40m

上記の数式より算出した各含水比における電磁波速度を表-2 にまとめる。

表-2 電磁波速度と含水比の関係

条件	含水比 (%)	電磁波速度 $V(\text{m/ns})$
乾燥	0.8	0.12
湿潤(1)	5.4	0.10
湿潤(2)	11.9	0.05

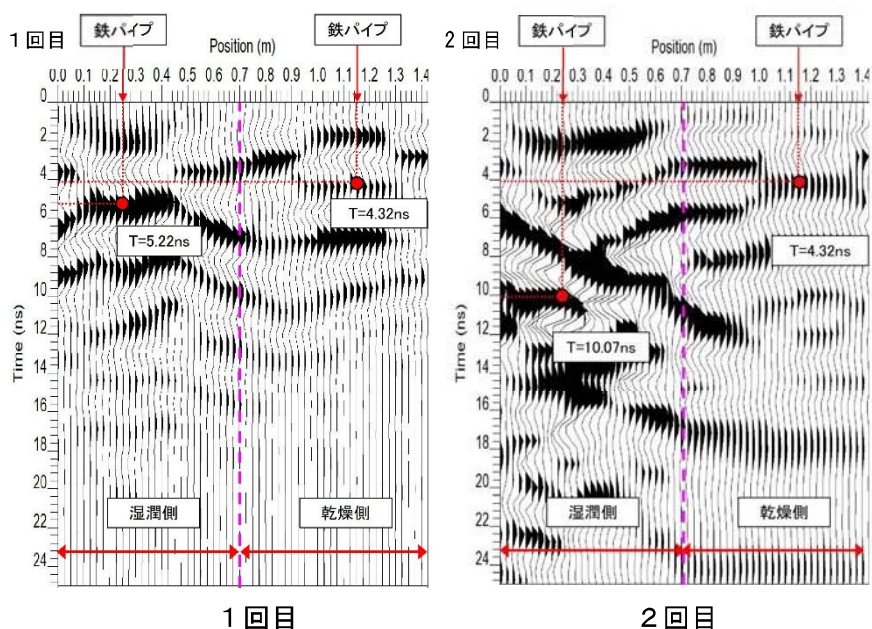


図-3 地中レーダ探査結果

含水比が高くなるについて、電磁波速度が遅くなる結果を確認できた。特に湿潤側には、含水比が 2 倍程度高くなった地盤では電磁波速度が $0.10\text{m/ns} \Rightarrow 0.05\text{m/ns}$ と 1/2 まで低下しており、電磁波速度に地盤内部の含水状態が大きく寄与していることが改めて確認できた。

4. まとめ

本稿では、中心周波数 250MHz を用いた地中レーダでの均質地盤モデルにおける電磁波速度と地盤の含水比の関係を確認した事例の報告であった。ただし、実際の地盤は複雑であることから、今後、含水変化の間隔を細かくして実験数を増やしていくとともに、実際の地盤に即した条件下での探査を実施してデータを蓄積していきたいと考える。

参考文献

- 1) 物理探査ハンドブック 増補改訂版 手法編 第7章地中レーダ：(公社)物理探査学会, 2016
- 2) 地盤工学・実務シリーズ 14 地盤工学への物理探査技術の適用と事例：(公社)地盤工学会, 2001
- 3) 地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]：(公社)地盤工学会, 2020

低周波地中レーダによる切羽前方探査手法の開発（その1）

—実証実験結果の妥当性の検証—

戸田建設株式会社 正会員 ○吉野 尚人, 蟹井 猛宏
田中地質コンサルタント株式会社 正会員 野村 成宏

1. はじめに

山岳トンネルにおける切羽前方の地質性状を精度よく予測することは切羽崩落などの危険箇所を事前に把握でき、経済的で安全性の高い施工を実施する上で必要となる。一方で、現状の切羽前方探査手法である先進ボーリング調査は切羽前方の地質を直接観察できる反面、点情報であり、調査日数がかかることや、反射法地震探査（TSP 探査）、電磁探査（FDEM）は面情報で、探査結果が比較的速く出力される反面、解析者によって結果にばらつきがあり、解析精度上に課題があると思われる。

本研究では中心周波数 25MHz の低周波地中レーダを用いて、切羽前方の地質を迅速かつ高精度に評価できる手法について検討を行った。本稿では、低周波地中レーダの探査結果と切羽観察ならびに穿孔探査で得られた地質性状を比較することで、実証実験結果の妥当性に関する検証事例について報告する。

2. 低周波地中レーダの概要

一般に、地下埋設管や空洞等を把握する際は、浅部での構造を詳細に把握するために分解能が高い中心周波数 200MHz の地中レーダを使用することが多い。しかし、周波数と波長の関係から対象深度は 2m 程度と浅いため、山岳トンネルの切羽前方探査手法としては不向きである。一方で、中心周波数が 25MHz である低周波地中レーダは分解能がやや劣るが、対象深度は 12m 程度と 200MHz と比較して深部まで探査できることから、切羽前方の探査手法として利用できると考えた。

図-1 は、トンネル切羽に対して地中レーダの 2 種類の計測方法を示している。プロフィール計測とは、計測面の深部にある反射面を測定するために実施し、計測方法は受信アンテナと送信アンテナを一定間隔に保持した状態で計測面に沿って移動する。ワイドアングル計測とは、ある反射面までの反射時間と距離をプロットすることで伝搬する電磁波速度と反射面までの距離を算定するために実施し、計測方法は計測面の中心位置から送信アンテナと受信アンテナを等間隔に離して計測する。本開発では、ワイドアングル計測で算定した電磁波速度をプロフィール計測で得られた反射面の深度補正に用いた。

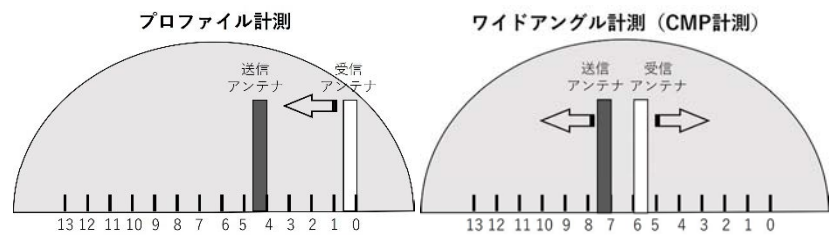


図-1 地中レーダの計測方法

図-1 は、トンネル切羽に対して地中レーダの 2 種類の計測方法を示している。プロフィール計測とは、計測面の深部にある反射面を測定するために実施し、計測方法は受信アンテナと送信アンテナを一定間隔に保持した状態で計測面に沿って移動する。ワイドアングル計測とは、ある反射面までの反射時間と距離をプロットすることで伝搬する電磁波速度と反射面までの距離を算定するために実施し、計測方法は計測面の中心位置から送信アンテナと受信アンテナを等間隔に離して計測する。本開発では、ワイドアングル計測で算定した電磁波速度をプロフィール計測で得られた反射面の深度補正に用いた。

3. 実証実験現場の概要

実証実験を行った現場の地質は、白亜紀後期に形成された火成岩類が分布している。実施地点は坑口から 590m 進んだ地点で行った。

図-2 は、現場実証を行った地点の切羽写真である。左半分は熱水変質により、非常に軟質化していた。低周波地中レーダは右側（計測点 0）から左側（計測点 13）に向けて測定した。なお、低周波地中レーダ結果と比較するために中央（計測点 6.5）の地点で穿孔探査を実施した。

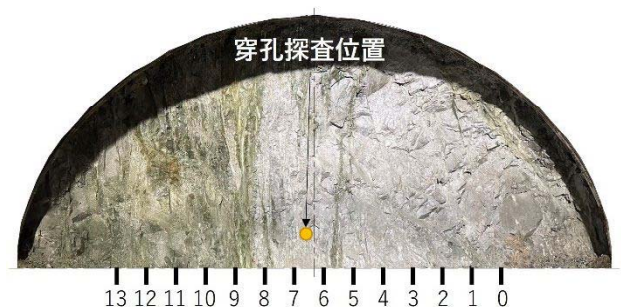


図-2 実証実験を行った切羽面

キーワード 地中レーダ 低周波 切羽前方探査 地質特性

連絡先 〒104-0032 東京都中央区八丁堀 2-8-5 戸田建設株式会社土木技術部 TEL050-3818-4987

4. 実験結果及び考察

切羽の観察結果では、図-2の熱水変質による軟質化した部分は漸移的に左肩に移動し、6m付近で軟質化した部分が不明瞭となった。また、11m付近で切羽全体に熱水変質による軟質化した部分が認められるようになったことから、地質境界としては6mと11m付近にあると想定される。

図-3は、低周波地中レーダ探査のワイドアングル計測結果を示しており、その結果、走時80nsの位置に反射面が認められ、走時80nsの電磁波速度は0.092~0.101m/nsに集中していることが分かった。そこで、集中区間(0.092~0.101m/ns)から平均値(0.097m/ns)を求め、この値を用いて反射面の深度を補正した。

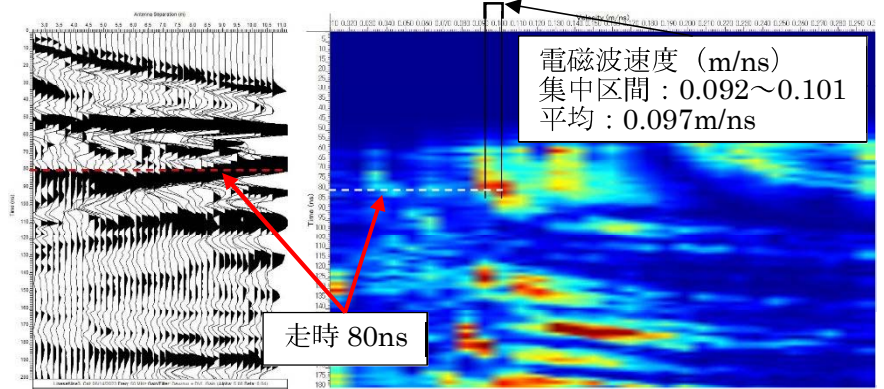


図-3 ワイドアングル計測結果

低周波地中レーダ結果と穿孔探査結果を図-4に示す。

低周波地中レーダ結果では、5m、10m、12m、14mに反射面が認められ、両端に向かうにつれて反射強度が弱くなり、特に左側(計測点11)は顕著に弱くなる傾向が認められた。なお、探査深度14m以深は電磁波の減衰により、反射強度が弱くなる傾向にあった。

穿孔探査については5m地点で穿孔エネルギーが高く、穿孔速度が遅くなる特徴が認められ、12m地点付近においても穿孔エネルギーが高くなり、穿孔速度が遅くなる特徴が認められたため、5m地点と12m地点は地質性状が変化すると想定される。

低周波地中レーダ探査で得られた反射面の位置は、切羽観察結果から想定した地質境界および穿孔探査の穿孔エネルギーと穿孔速度の特異点と概ね整合していることが明らかとなった。以上より、低周波地中レーダ探査を用いることで切羽前方の地質性状を予測することができると考えられる。

低周波地中レーダ結果

穿孔探査結果

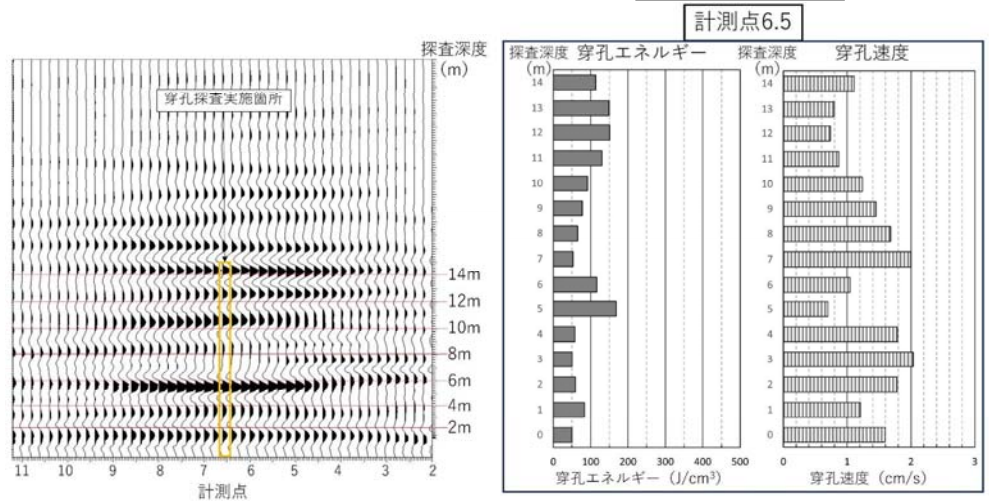


図-4 低周波地中レーダ探査と穿孔探査結果

5. まとめ

本稿では、中心周波数25MHzの低周波地中レーダを用いることで、山岳トンネルにおける切羽前方の地質状況を推定できることを明らかにした。今後は、多くの現場で適用して計測結果を蓄積していき、地質性状の予測精度を向上させ、実用化を目指したい。

参考文献

- 1) 国立天文台：理科年表平成10年度版，丸善株式会社，1997，p.501
- 2) 升元一彦：地中レーダによる岩盤割れ目内の地下水浸透評価に関する研究，東京大学，2017，12601乙第18315号

低周波地中レーダによる切羽前方探査手法の開発（その2）

—水の影響を考慮した評価手法に関する検討—

戸田建設株式会社 正会員 ○蟹井 猛宏, 吉野 尚人
田中地質コンサルタント株式会社 正会員 野村 成宏

1. はじめに

筆者らは中心周波数 25MHz の低周波地中レーダを用いて、山岳トンネルにおける切羽前方の地質を迅速かつ高精度に評価できる手法について検討している。前報¹⁾²⁾では、低周波地中レーダの結果と現場観察結果（切羽写真、穿孔探査結果）を比較した検討と水が電磁波速度に与える影響に関する実験的検討について報告した。本稿では、水の影響を考慮した結果精度の検討について報告する。

2. 実証実験現場の概要

実証実験を行った現場の地質は前報¹⁾と同じであり、実施地点は坑口から 690m 進んだ地点で実施した。実施地点の周辺では湧水の発生が懸念されていた。なお、実証実験は掘削位置を 1m 変えて 2 回実施した。

3. 1 回目の実証実験結果

実証実験 1 回目の切羽写真を図-1 に示す。切羽全体に割れ目が細かく入っているため、崩れやすく、さらに右側は風化が進行して脆弱な部分が認められた。低周波地中レーダは左側（計測点 13）から右側（計測点 0）に向かって計測した。なお、低周波地中レーダ結果と比較するために右側（計測点 2）、中央（計測点 6.5）、左側（計測点 11）の地点で穿孔探査を実施した。

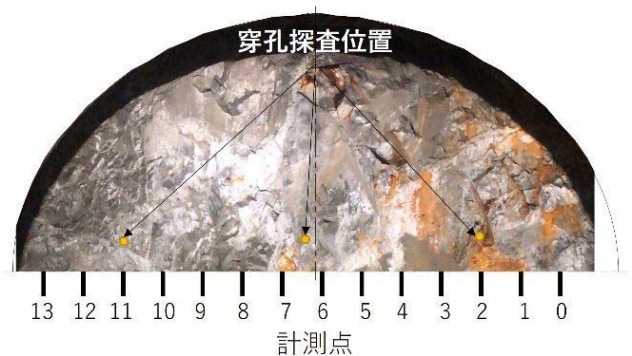


図-1 1 回目測定時の切羽面

図-2 は、1 回目の低周波地中レーダ探査結果を示す。

ワイドアングル計測の結果では、走時 100ns の位置に反射面が認められ、その位置の電磁波速度は 0.098~0.102m/ns に集中していることが分かった。そこで、集中区間（0.098~0.102m/ns）から平均値（0.100m/ns）を求め、この値を用いて反射面の深度を補正した。深度補正を行ったプロファイル計測結果では、探査深度 4m、6~8m、9m、12m に反射面が認められ、特に 6~8m に強い反射面であることがわかった。

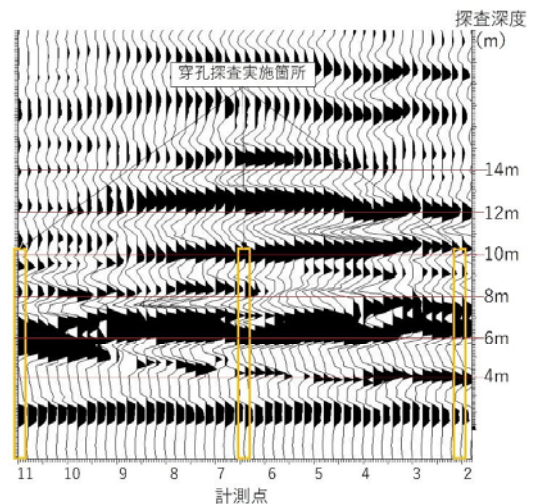


図-2 1 回目の探査結果

低周波地中レーダ探査実施後に行った穿孔探査結果を図-3 に示す。なお、中央（計測点 6.5）は 11m 削孔中に機材不具合によりデータが欠損したため、10m までとした。左側（計測点 11）では、4m と 7m に穿孔エネルギーが低く、穿孔速度が速くなり、8m 以深はいずれも特異な点が認められなかった。中央（計測点 6.5）では、穿孔エネルギーについては明確な差異はないが、穿孔速度については 4m 以深から速度が速くなった。右側（計測点 2）では、穿孔エネルギー、穿孔速度ともに明瞭な差異は認められなかった。以上から、穿孔探査では探査深度 4m と 7m 付近で地質性状の特異点があると想定された。この結果は、地中レーダ探査結果と整合するものである。なお、9m と 12m については地質構造が変化する地点であり、地質境界を示す反射面であることが分かった。

キーワード 地中レーダ 低周波 湧水 切羽前方探査 地質特性

連絡先 〒104-0032 東京都中央区八丁堀 2-8-5 戸田建設株式会社土木技術部 TEL050-3818-3759

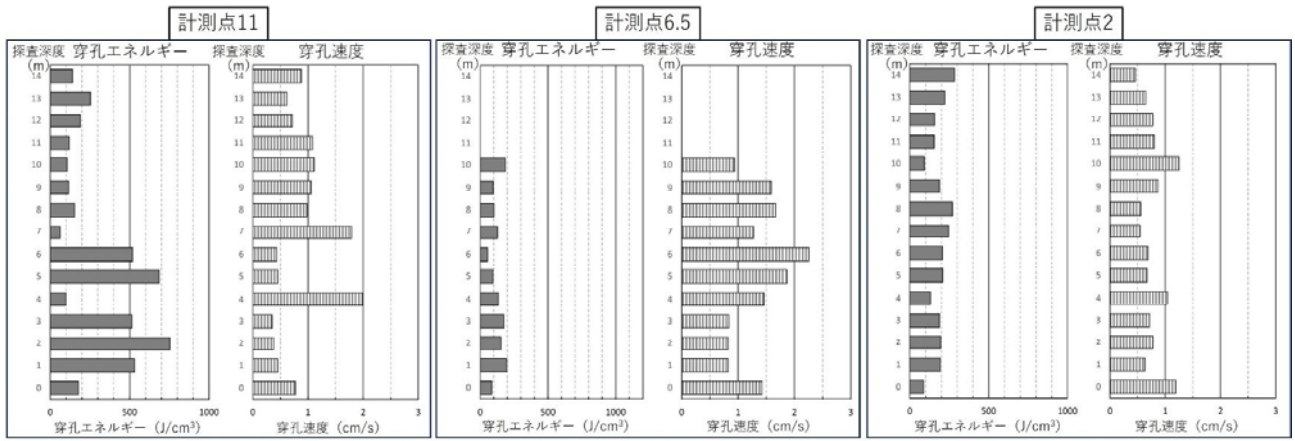


図-3 穿孔探査結果

4. 2回目の実証実験結果と考察

実証実験 2 回目の位置で切羽観察を行った結果、1 回目で実施した穿孔探査の左側，中央，右側のすべてから湧水が認められた。なお、2 回目は 1 回目の地点から 1m 前進しているため、想定した地質性状の特異点は 3m と 6m にあると想定される。

2 回目の低周波地中レーダ探査実施後に行った穿孔探査結果を図-4 に示す。ワイドアングル計測の結果では、走時 100~125ns の位置に反射画面が認められ、その区間での電磁波速度は 0.042~0.072m/ns に集中していることが分かった。一般に、電磁波速度が極端に低下していた場合は電磁波速度の一般値を用いることが多いが、前報²⁾の検討結果から含水比に応じて電磁波速度が低下することが明らかとなったため、本研究では低下している電磁波速度を除外することなく、解析に用いることにした。そこで、集中区間 (0.042~0.072m/ns) から平均値 (0.057m/ns) を求め、この値を用いて反射面の深度を補正した。その結果、概ね 3m と 6m の位置に反射面が認められ、1 回目で想定した地質性状の特異点である反射面をとらえていると考えられる。

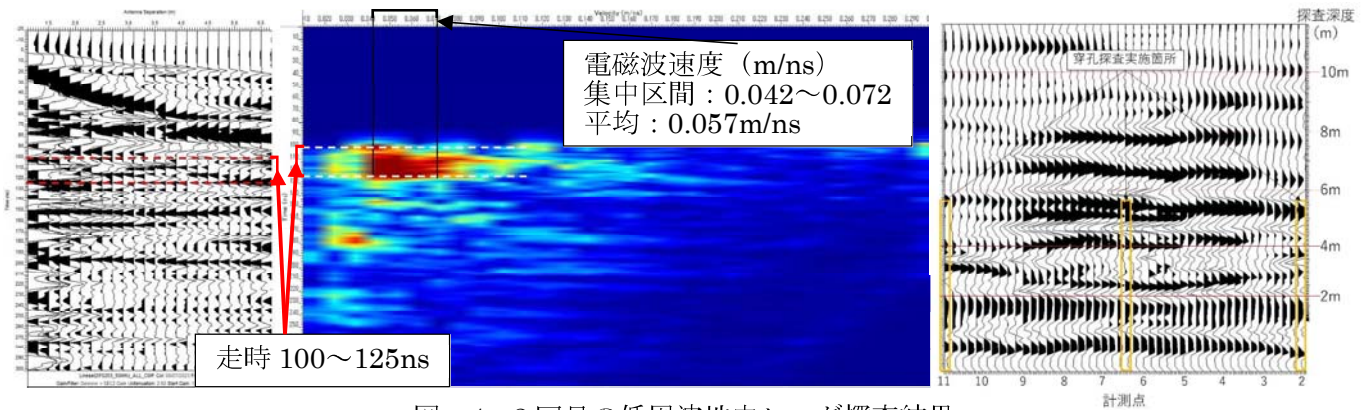


図-4 2回目の低周波地中レーダ探査結果

5. まとめ

本稿では水の影響を考慮した電磁波速度を用いて反射面深度を補正することで、より高精度に地質性状の特異点となる反射位置を特定できることを明らかにした。今後も多くの現場で結果を蓄積していき、地質性状の予測精度を向上させ、実用化を目指したい。

参考文献

- 1) 吉野尚人, 蟹井猛宏, 野村成宏: 低周波地中レーダによる切羽前方探査手法の開発 (その 1) —実験結果の妥当性の検証—, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, 2024.9 (投稿中)
- 2) 野村成宏, 吉野尚人, 蟹井猛宏: 地中レーダに関する基礎実験—電磁波速度と地盤の含水比の相関—, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, 2024.9 (投稿中)