

ボアホールレーダー反射法による岩盤内亀裂調査

Application of Borehole Radar Reflection Method for Fracture Survey in a Rock Mass

升元 一彦*・宮嶋 保幸*・戸井田 克*

Kazuhiko MASUMOTO, Yasuyuki MIYAJIMA and Masaru TOIDA

Methods using electromagnetic wave are promising techniques to survey the accurate distribution of fractures in a rock mass. One of the methods is electromagnetic tomography by propagation property between boreholes, which the authors have been developing. The other is borehole radar reflection method using only one borehole by reflection property. In this paper, the authors describe the results of basic test in water-pool and in-situ tests in rhyolite, granite and sedimentary rock site to verify the applicability of this reflection method. From these results, it is possible to evaluate the distribution of open fractures and the continuity of cracks located far from the measurement borehole.

1. はじめに

地下空洞利用の多様化に伴い、岩盤内部の構造を高精度に把握する技術が必要になってきている。特に、岩盤内の亀裂の情報については、岩盤の力学的、水理学的特性に大きく影響を与えることから詳細な調査技術が要求されている。筆者らは、他の物理探査手法よりも高分解能が期待できる電磁波を用いた岩盤調査手法に着目し、これまでにボーリング孔間の電磁波の透過特性を利用した電磁波トモグラフィ手法の開発を行ってきた¹⁾。一方、同じ電磁波を用いた調査手法であるが、単一のボーリング孔による電磁波の反射特性を利用したボアホールレーダー反射法は、ボーリング孔周辺の亀裂の詳細な情報を把握することができる技術であると考えられる²⁾。今回、このボアホールレーダー反射法の適用性を確認するため、まず水中において明らかに電磁波の反射が認められる対象物を検出する室内水槽試験を行い、次に実際の岩盤における原位置調査を実施したので、その結果について報告する。

2. 室内水槽試験

2.1 ボアホールレーダー反射法の概要

岩盤中の亀裂が開口していたり水や鉱物で充填されている場合、岩盤とその亀裂内物質の電磁特性の違いにより、岩盤と亀裂の境界面において電磁波の反射が生じる。ボアホールレーダー反射法は、1本のボーリング孔内で送信アンテナ、受信アンテナを一体化したゾンデを上下させ、送信された電磁波の反射波を受信しボーリング孔周辺の亀裂情報を把握する手法である(図-1)。反射法により得られる出力は弾性波探査の反射法と同じで、プロファイルの横軸は孔壁からの距

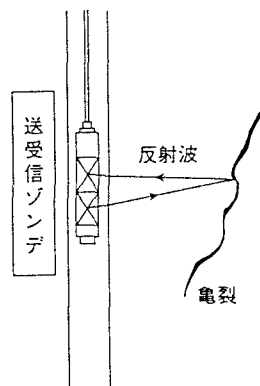


図-1 反射法の測定方法

* 正会員 鹿島技術研究所

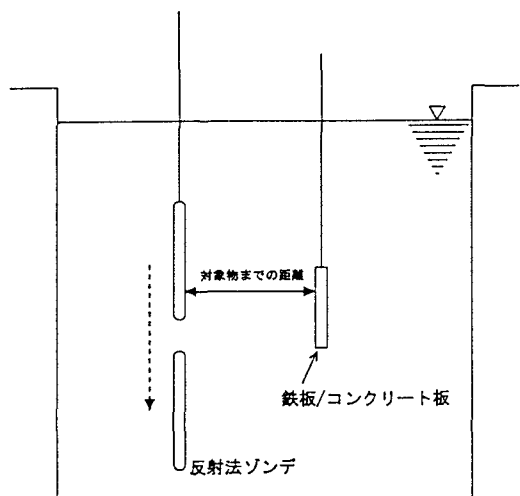


図-2 室内水槽試験方法

離に対応した往復走時で、縦軸は深度である。深度は送信アンテナと受信アンテナの中間の位置で、往復走時 0 の位置は直接波が受信された時点とした。また、波形処理は行っていない。今回使用したポアホールレーダーの送信波形はパルス波で、中心周波数は 500MHz であった。

2.2 試験方法

水で満たされた水槽（9m × 9m × 9m）内において、深さ 5 m の位置に鉛直に設置した対象物をポアホールレーダー反射法で検出する試験を実施した（図-2）。対象物として、鉄板（30cm × 30cm × 厚さ 1cm）、コンクリート（20cm × 20cm × 厚さ 5cm）を用いた。ソナードと対象物との距離は 50cm と 1.5m とした。

2.3 試験結果

鉄板の検出結果を図-3に示す。距離が 50cm の時は往復走時 30ns に反射波形が見られ、1.5m の時はかなり振幅が減衰しているものの、90ns に反射波形が見られる。この往復走時の差 60ns が、電磁波が 1m を往復するのに要した時間であることから、この水中を伝播した速度は 3.3×10^7 (m/s) であることが分かる。電磁波の伝播速度 V は、媒質が絶縁体に近い場合周波数が高い場合、比誘電率 ϵ_r を用いて、

$$V = C_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad \text{-----} \quad (1)$$

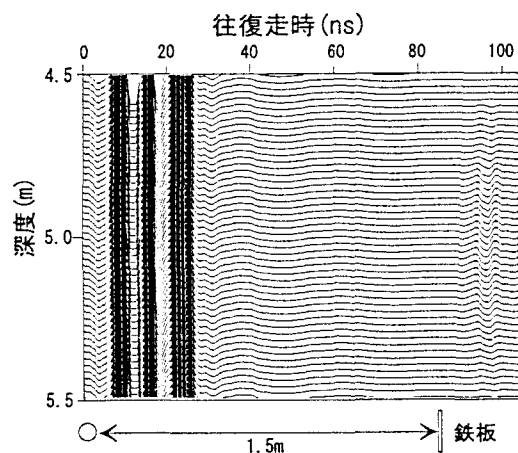
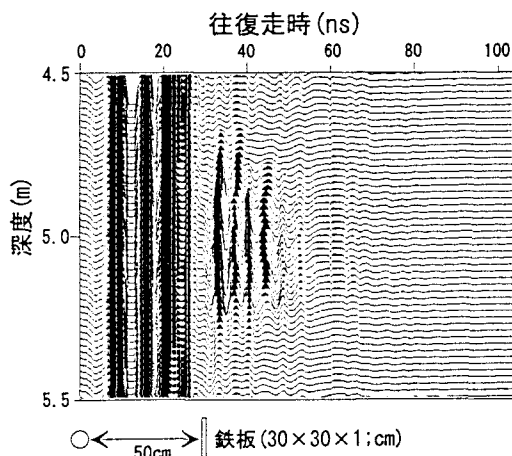


図-3 鉄板の検出結果

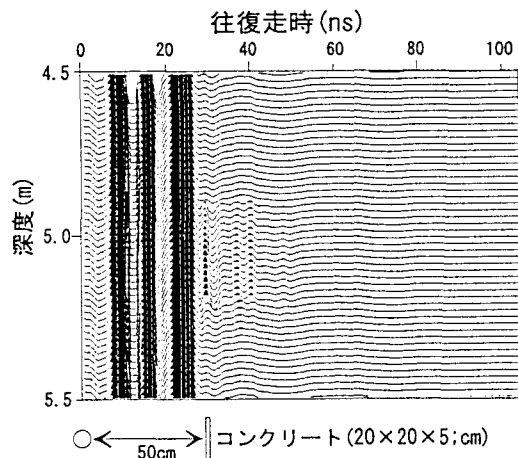


図-4 コンクリートの検出結果

(但し、 C_0 は真空中の電磁波速度 = 2.998×10^8 m/s) で近似されることから、この試験時の水の比誘電率は 82.5 と計算される。これは一般に求められている水の比誘電率 81 に非常に近い値である。このことから伝播媒体の比誘電率を求めることにより、反射波の孔壁からの距離を推定できることが確認できた。

次に、コンクリートの検出結果を図-4に示す。コンクリートは鉄板よりも反射強度が弱く、1.5m では反射波形が見られなかった。しかし、50cm の時は鉄板と同じ 30ns に反射波形が見られ、この場合も水の比誘電率に対応した伝播速度であることが分かる。

3. 原位置調査

前項で性能の確認できたボアホールレーダー反射法を用いて、原位置の岩盤における亀裂調査を凝灰岩、花崗岩、砂岩泥岩互層の3ヶ所で実施した。各々の調査結果について報告する。

3.1 凝灰岩サイトにおける調査結果

調査に用いたボーリング孔長は 20m で、平均の RQD は 43%と比較的亀裂が多く、水位は孔口から 15m の位置にあった。図-5に水位より上の 13.5m から 15.0m の調査結果を示す。この図から R-1 ~ R-3 の比較的連続した反射面が認められる。また、コア観察結果から亀裂が確認されている 13.9m (F-1)と 14.4m (F-2)の深度においては直接波が乱れており、往復走時 5ns 付近においても強い反射が見られることが分かる。反射面 R-2 の延長が F-1 付近の波形が乱れている部分に相当し、反射面 R-3 の延長が F-2 付近に相当していることから、これらの反射面 R-2, R-3 はそれぞれ F-1, F-2 に連続した亀裂であると推定できる。

反射面の孔壁からの距離を推定するため、この岩盤中の電磁波の伝播速度を求める必要がある。同サイトでは電磁波トモグラフィを実施しており電磁波速度の平均値は、 8.0×10^7 (m/s)である。この時、(1)式から計算される比誘電率は 14.0 になる。一方、このサイトのボーリングコアを用いて供試体レベルでの比誘電率測定も行っており、その結果、乾燥時 40MHz で 5.95 の値を得ている。トモグラフィにより求められた値は 1m メッシュの平均値であり、その領域内での亀裂の影響を含んだ値であることから、今回対象としている比較的詳細な 1m

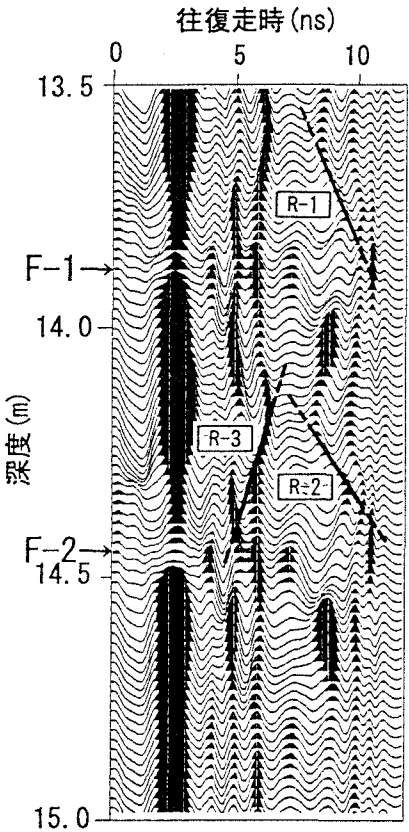
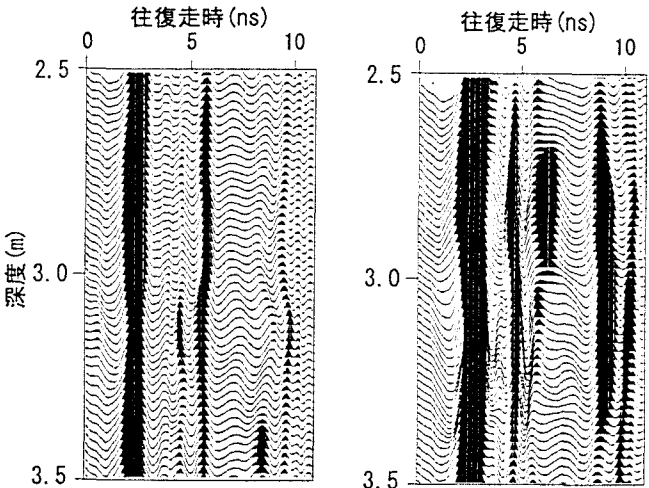


図-5 原位置調査結果 (凝灰岩サイト)



(a)水なし (b)水あり
図-6 ボーリング孔内の水の影響

以内の亀裂の調査には供試体レベルでの測定結果を用いる方が良いと判断した。比誘電率 5.95 の時、(1)式から伝播速度は 1.23×10^8 (m/s) となり、往復走時 10ns では孔壁からの距離が 60cm 程度と計算される。これにより反射面 R-1 ～ R-3 の傾斜角度を求めると、それぞれ約 65° 、 50° 、 70° となる。

次に、ボーリング孔内に水がない場合とある場合での比較を行った。このボーリング孔での水位は孔口から 15m の位置にあるので、水がある場合の測定は孔口から水を注しボーリング孔内の水位を上昇させて行った。図－6 に 2.5m から 3.5m の調査結果を示す。孔内に水がある方が反射が強く出ているが、この図に見られる強い反射の多くは孔壁からの反射とその多重反射である。このため、水がない場合に見られた深度 3.0 ～ 3.2m、往復走時 9ns 付近の反射面が、水のある場合には強い多重反射により隠れてしまっていることが分かる。電磁波の反射係数 R は、媒質が絶縁体に近いか周波数が高い場合、媒質 1（比誘電率 ϵ_1 ）から媒質 2（比誘電率 ϵ_2 ）に垂直に入射する時、

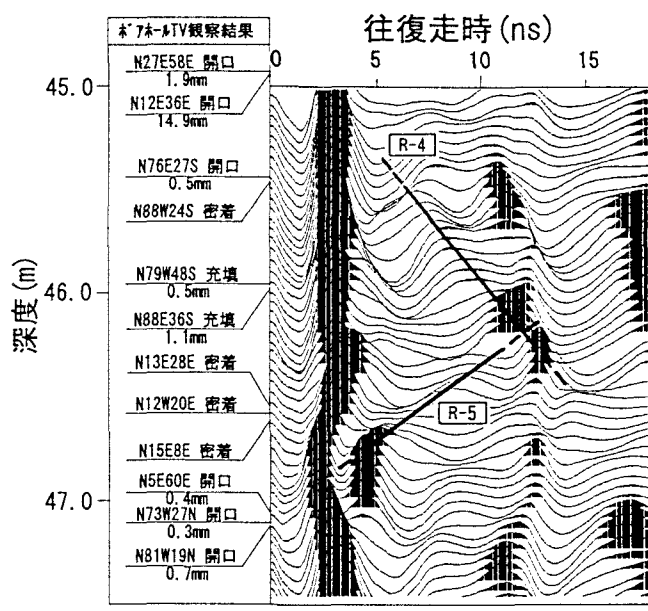
$$R = (\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}) \text{ ----- (2)}$$

で近似されることから、水（ $\epsilon_1=81$ ）と岩盤（ $\epsilon_2=5.95$ ）の境界面による反射係数 0.57 の方が、空気（ $\epsilon_1=1$ ）と岩盤（ $\epsilon_2=5.95$ ）の境界面による反射係数 -0.42 より絶対値が大きくなる。この計算結果からも、ボーリング孔内が水で満たされていた場合には水がない場合に比べ、孔壁からの反射が強くなり、また岩盤内からの反射は孔壁でより減衰することが分かる。

3.2 花崗岩サイトにおける調査結果

調査を行ったボーリング孔は孔長 50m、平均の RQD は 51% で孔口からは湧水が見られた。周辺の岩盤は非常に堅硬であるが、傾斜 $60 \sim 80^\circ$ の高角度の亀裂が発達している。図－7 に深度 45.0m から 47.5m の調査結果を示す。同じボーリング孔においてポアホール TV 測定が行われており、その観察結果も併せて示す。この図から、比較的連続した反射面として R-4、R-5 が認められる。ポアホール TV 観察結果と比較すると、R-4、R-5 の反射面の延長上には複数の開口亀裂が観察されており、この開口亀裂が反射面に相当するものと考えられる。また、ポアホール TV では密着亀裂や鉱物で充填された亀裂も検出しているがポアホールレーダーでは確認できなかった。この理由としては、開口亀裂の場合は亀裂内に水を含むため(2)式から計算されるように反射係数が大きくなり強い反射面となるが、密着亀裂では含水量が少なく反射面としての幅も薄くなるため反射は弱く、充填された亀裂では充填鉱物の比誘電率が周りの岩盤の比誘電率とほぼ同等であるため反射が弱くなることが考えられる。

調査サイトの岩石コアの比誘電率測定結果は、飽和湿潤時 40MHz で 8.16 であった。(1)式を用い伝播速度を計算すると 1.05×10^8 (m/s) となり、往復走時 10ns では孔壁からの距離が 50cm 程度と計算される。これにより反射面 R-4、R-5 の傾斜角度を求めると、それぞれ約 50° 、 35° となる。



図－7 原位置調査結果（花崗岩サイト）

ボアホール TV ではボーリング孔の孔壁における亀裂の走向傾斜は分かるが、それがどのように連続しているのかは把握できない。一方、ボアホールレーダーでは岩盤内の亀裂の連続性を把握することが可能である。

3.3 砂岩泥岩互層サイトにおける調査結果

調査を行ったボーリング孔は孔長 35m、平均の RQD は 46%で孔口からは湧水が見られ、互層の層理面は高角度に傾斜している。図-8に深度 11.5m から 12.5m と 15.5m から 17.5m の調査結果を示す。同じボーリング孔においてボアホール TV 測定が行われており、その観察結果も併せて示す。この図から、R-6 ~ R-8 の比較的連続した反射面が認められる。ボアホール TV 観察結果と比較すると、12.3m、15.5m ~ 15.9m、16.6m ~ 17.2m で直接波が強くなる異常があり、これらの部分には開口亀裂があることが分かる。R-6 ~ R-8 の反射面の延長はこれらの異常部に相当することから、これら反射面は孔壁で観察される開口亀裂と連続するものと考えられる。

調査サイトの岩石コアの比誘電率測定結果は、飽和湿潤時 40MHz で 7.49 であった。伝播速度は 1.10×10^8 (m/s) となり、往復走時 10ns の位置では孔壁からの距離が 55cm 程度と計算される。これにより反射面 R-6 ~ R-8 の傾斜角度を求めると、それぞれ約 60° 、 55° 、 65° となる。

4. おわりに

ボアホールレーダー反射法の適用性を確認するため、室内水槽試験と実際の岩盤における原位置調査を実施した。室内水槽試験の結果、伝播媒体の比誘電率により反射波の孔壁からの距離が推定できることを確認した。また、原位置の岩盤における亀裂調査の結果、(1) 反射面として特に開口亀裂については明瞭に検出できた、(2) ボアホール TV では確認できない岩盤内の亀裂の連続性を把握できた、(3) ボーリング孔を水で満たした場合、孔壁からの強い反射により岩盤内からの反射が検出できないことが分かった。

今回用いたレーダーは指向性アンテナを使っており、今後アンテナの方向を特定した測定を行うことにより亀裂の走向を求めることが可能であると考えられる。また、波形処理により亀裂からの反射波を抽出し、より詳細な亀裂の把握を行う予定である。

参考文献

- 1) 日比谷啓介・稲生道裕・升元一彦：電磁波トモグラフィによる岩盤内の含水状態評価について，第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.256 ~ 260，1993.2.
- 2) 登内正次・大沼寛・鈴木敬一・村松茂樹：反射式ボアホールレーダによる花崗岩の亀裂計測，物理探査学会第 87 回学術講演会論文集，pp.125 ~ 129，1992.10.

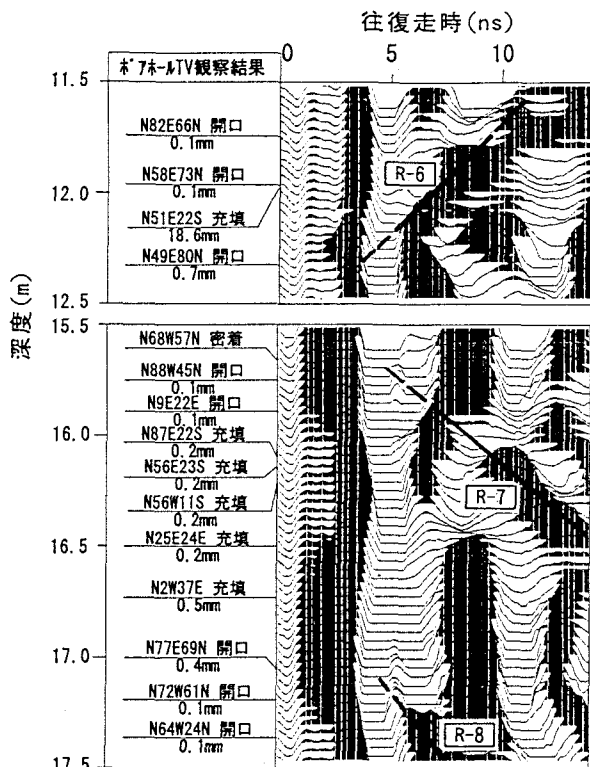


図-8 原位置調査結果 (砂岩泥岩互層サイト)