

# 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

## Study on Evaluation of Ground Water Flow in Fractures in a Rock Mass Using Ground Penetrating Radar

升元 一彦 Kazuhiko Masumoto

### 1. はじめに

割れ目を有する岩盤構造物においては、岩盤の割れ目内の地下水流動特性を評価することは重要である。特に、地下の岩盤空洞掘削時において空洞周辺に割れ目の発生、進展、応力状態の変化、間隙水圧の変化が生じる。このような変化が生じる領域を EDZ (Excavation Damaged Zone, 掘削影響領域) と呼ぶ。EDZ 内の割れ目群は、岩盤空洞の力学安定に関する問題を生じさせるとともに地下水の透水経路としての問題も生じさせる。これら坑道周辺に発達する割れ目群はトンネル湧水や湧水の浸潤による支保の劣化の原因や、石油や LPG の水封式岩盤貯蔵における水封システムのトラブルの原因となる。特に、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、これらの割れ目群が処分場の安全性に影響を与えることから、EDZ 内の水みちとしての割れ目や不飽和割れ目を調査により評価しておくことは重要である。本研究は、高レベル放射性廃棄物処分場の建設時における、①坑道周辺の EDZ 内の水みち調査、②坑道周辺の不飽和領域モニタリング、を実施するに際して、非破壊探査である地中レーダ探査手法が有効であることを示すことを目的としたものである。

坑道周辺の EDZ 内の水みちは開口割れ目であり、チャンネル状に分布する。また、不飽和領域は坑道まで連結した開口割れ目内に生じる。本研究の目的である坑道周辺における調査やモニタリングを行うには、割れ目内の地下水に関する情報を把握する必要がある。これまで地中レーダは割れ目の幾何学的な分布情報のみを捉えることが多いが、割れ目内部の状態の評価には、地中レーダの反射波形が持っている多くの情報を活用する必要がある。本研究では、反射境界面となる媒質の電磁気特性に応じて反射波形の振幅強度や卓越周波数が変化することを利用し、反射波形に着目することで、岩盤割れ目内の地下水の浸透状況を評価しようとするものである。

地中レーダの反射波形から物性値の評価を行う際には、地中レーダの特長である測定迅速性や出力波形の再現性が高いことを最大限に活用し、同じ位置における Time-Lapse 測定 (定点モニタリング測定、同じ測線でのプロファイル測定) 結果から、その波形変化により物性値の変化の評価を行うことが有効である。すなわち、割れ目のように幾何学的位置が固定されている対象に対して、その内部の流体の変化 (水の有無、溶存物質の濃度) を Time-Lapse 測定による波形変化により評価する。

- ・誘電正接  $\tan \delta$  が小さい領域では、反射係数は比誘電率  $\epsilon$  の差に影響を受ける。水の有無で比誘電率は大きく変化することから、波形変化が生じる。
- ・高導電性の流体が反射面になる時は、反射係数は導電率の差だけでなく周波数にも影響を受ける。高導電体の塩水の浸入により反射波の周波数は低下する。

これらの反射波形の変化に着目して物性値の変化を評価する点が、本研究の要点である。この評価方法の実際の適用のためには、割れ目のような薄い反射面であっても、内部の流体の電磁気特性の変化が反射波の波形変化により評価可能であることを理論的、実験的に示すことが必要である。本研究では、理論的検討と実験的検討を行った。

### 2. 理論的検討結果

初めに、理論的な検討を行った。割れ目内に存在する水や塩水が電磁波の反射波形に与える影響について、理論式による検討から、反射面となる割れ目内において比誘電率が大きく異なる水が存在する場合や、塩水のような高導電性の媒質がある場合において、反射波形が変化することが予想された。さらに、薄層を模擬した電磁波の数値シミュレーション解析による検討を実施し、その結果、割れ目内の媒質の変化が反射波形に与える影響として、以下のことが導き出された。

- ・割れ目内の水の存在の有無により、反射波形の初動の位相が逆転する。
- ・割れ目内の飽和度が大きくなるに従い、岩盤と割れ目群の比誘電率の差が大きくなり、反射波形の振幅が大きくなる。
- ・割れ目内に塩水のような高導電性の媒質が浸透すると、媒質の導電率の増加により反射波形の振幅が増加する。ただし、割れ目幅が分解能以下で導電率が小さい時、割れ目下面からの反射の影響で導電率の増加に対し振幅が減少することがある。

博士 (環境学) 東京大学大学院新領域創成科学研究科 2017 年 8 月

Dr. Environmental Science, The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences, Aug. 2017

・割れ目内の高導電性媒質の存在は、反射波形の高周波数成分の低下といった卓越周波数に影響を与える。

このことから、以上のような反射波形の振幅や卓越周波数の変化が認められた場合、この変化が割れ目内の媒質の存在の指標となることを示せた。一方、この評価方法を適用する上で留意すべき点について以下にまとめる。

- ・本評価方法は垂直入射の理論に基づいているため、斜め入射の場合は偏波の影響を考慮する必要が出てくるので、入射角が30度以上になる高角度割れ目や浅い深度の割れ目に対する適用には注意する必要がある。
- ・分解能以下の幅の割れ目においては、反射波の振幅値は下面からの反射波の影響を受けることに留意が必要である。しかし、高導電性の媒質の浸透の評価の際には、対象とする割れ目幅に応じた導電率の媒質を選択することで、割れ目内の媒質の濃度変化を反射波の振幅値で評価できる。また、対象とする割れ目幅が小さく十分導電率を大きくできない場合は、反射波の振幅値による評価でなく、反射波の周波数の変化を評価指標とすることで評価できる可能性を示した。

### 3. 実験的検討結果

次に、実験的な検討を3つの検証試験により実施した。

1つ目は、実際の岩盤割れ目で試験を行う前に理想的な状態での評価可能性を確認するため、水平な割れ目群を模擬した空隙を作成し、この空隙中の含水状態を変化させて地中レーダを用いた基礎試験を行った(Fig. 1)。この結果、割れ目内の含水量の変化や塩水の浸透状況の違いを地中レーダの反射波形で評価が可能であるとの見通しが得られた。

2つ目は、坑道内での調査を想定して、割れ目のある岩盤上にコンクリートを打設し、この上からコンクリート岩盤境界面及び岩盤内の含水状態の変化が把握可能な地中レーダの適用性の検討を行った。この結果、反射波形の差分プロファイルにより、塩水の浸透箇所の分布を2次的に評価できることが示せた。また、反射波形の卓越周波数の変化で覆工背面の水みちの評価を平面的に行うことが可能であることを示せた。

3つ目は、実際の岩盤に掘削した坑道側壁に発達した割れ目を対象として地中レーダの適用試験を行った。この結果、地中レーダの分解能程度の幅を持つ坑道周辺の開口割れ目に対して、塩水の浸透過程を地中レーダの反射波形の変化で評価することができ(Fig. 2)、実割れ目において本評価方法の適用性を検証することができた。

### 4. おわりに

本研究の結果、飽和・不飽和や塩水浸透の定量評価が十分でない点や実適用における課題は残されているものの、地中レーダを活用し岩盤内割れ目の媒質の変化を評価するための基礎的な知見が得られたと考えられる。具体的には、対象とする割れ目からの反射波に着目し、初動の大きさや後続波の変化、卓越周波数の変化をモニタリングすることで割れ目内の浸透状況を評価できると考えられる。この評価方法を利用することで、高レベル放射性廃棄物処分の処分坑道周辺の水みち調査方法の提案が可能である。さらに、本評価方法は、放射性廃棄物の地層処分分野だけでなく土木分野へも活用分野を広げることが期待できる。

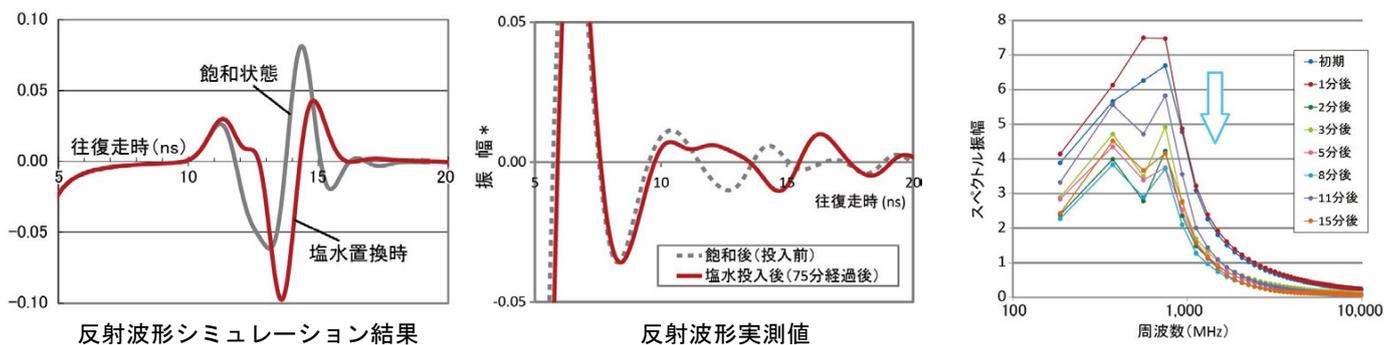


Fig. 1 水平割れ目の反射波形シミュレーション解析結果と実験結果の比較  
(飽和状態, 塩水置換状態)  
(Reflection Wave of Horizontal Fractures by Numerical Analysis and  
Experimental Results at Water Saturation and Saline Replacement)

Fig. 2 塩水注入時の反射波形の  
スペクトル解析結果  
(Spectrum Analysis of Reflection Wave  
after Saline Water Injection)

キーワード: 地中レーダ, 地下水流動, 岩盤割れ目, スペクトル解析

Keywords : Ground Penetrating Radar, groundwater, rock fracture, spectrum analysis