

電磁波シミュレーション解析を用いた薄層の物性値の違いによる地中レーダ反射波形の評価

鹿島建設(株) 正会員 ○升元一彦

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り、その調査手法として、地中レーダは「面的」で「非破壊」な評価が可能という点で有効な手段の一つである。これまでは割れ目の幾何学的な分布が主な調査対象であったが、最近では反射波形の変化に着目することによる割れ目内の水分量やトレーサ濃度変化の評価方法の可能性についての検討が行われている¹⁾。このような状態変化を捉える調査は、地中レーダの特長である測定の迅速性や出力波形の再現性が高いことを活用した評価方法と言える。

本報では、割れ目内に水分や電磁気的特性の異なる流体が存在することによる電磁波の反射波形に与える影響についての基礎的検討を行う。具体的には、地中レーダ探査で得られる垂直入射の反射波形の変化が、割れ目内の水分の有無や流体の溶存物質の濃度変化を評価する指標となりうることを、反射波形の数値シミュレーション解析に基づき検討を行ったので報告する。

2. 反射波形変化の数値シミュレーションの検討方法

本検討においては、電磁気学的物性値の異なる割れ目と基質部の境界での電磁波の反射特性について論じる。実際の測定には送受信一体型の高周波数のパルスレーダを使用することが多く、送受信アンテナ間の距離は比較的小さいため、電磁波の垂直入射を想定した検討を行うこととした。また、今回評価対象とする割れ目は単一の割れ目ではなく、空隙率が増加した水みちとしての割れ目群を想定した(写真-1)。このため割れ目幅としては、数mmから数十mmのゾーンとして設定した。発信の中心周波数が800MHzの場合、分解能は誘電率12でReyleighの1/4波長則により27mmになることから、割れ目幅を分解能以上の50mmに固定し、薄層内の媒質を変化させ、主に割れ目上面からの反射波形による評価を行うこととした。

本検討では、図-1に示す三層モデルにおいて、FDTD法による電磁界解析プログラムGPRMax2D/3Dを用いた波形数値シミュレーション³⁾による評価を行った。シミュレーションのモデルは、図-1に示すように比誘電率、導電率が小さい岩盤を模擬したブロック内に、割れ目群を模擬した50mmの薄層が挟在するモデルとし、この薄層が岩盤表面から0.25m下に水平に分布するものとした。発受信については、岩盤表面から10mm上方に直線発信源を設定し、反射波形を発信源直下の表面で受信することとした。発信源は中心周波数800MHzのリッカー波とした。また、メッシュサイズは1mmとし、側方境界からの反射波の影響を無視できるように、モデル周辺の境界条件は仮想的な吸収媒質を設置して入射波を減衰させるPLM(Perfectly Matched Layer)吸収境界とした。



写真-1 坑道底盤の開口割れ目の例²⁾

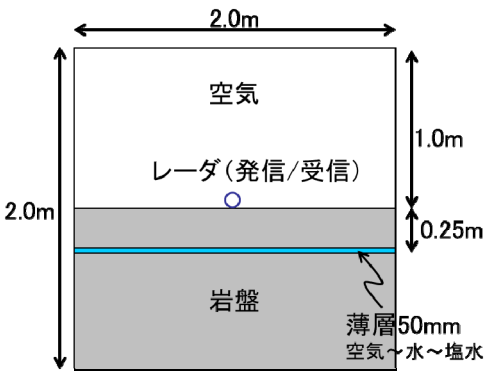


図-1 解析に用いた三層モデル

表-1 解析ケース

CASE	薄層物性	比誘電率	導電率(S/m)
CASE1	空気	1	0
CASE2	割れ目群(不飽和)	5	0
CASE3	割れ目群(飽和)	20	0.01
CASE4	水	81	0.01
CASE5	割れ目群(塩水)	20	2.0
岩盤		12	0

キーワード：地中レーダ、電磁波シミュレーション、割れ目、物理探査

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 090-2524-4478

3. 数値シミュレーション解析結果

割れ目群を模擬した薄層内における水や高電導性の媒質の存在が反射波形へ与える影響を評価するため、比誘電率と導電率を変化させ、表-1 に示す 5 つのケースについて反射波形のシミュレーションを行った。

基質部である岩盤の比誘電率 12、導電率 0 (S/m) とした。割れ目群のモデル化としては、実際の不均質な空隙が連続した状態を想定して、薄層の比誘電率を不飽和時 1、飽和時 81 の中間の値とした。すなわち割れ目群の不飽和状態 (CASE2) で比誘電率 5、導電率 0 (S/m)、飽和状態 (CASE3) で比誘電率 20、導電率 0.01 S/m と設定した。一方、極端な場合として、薄層が空気のみである状態 (CASE1)、薄層が完全に水で満たされた状態 (CASE4) を、各々比誘電率 1、導電率 0 (S/m)、比誘電率 81、導電率 0.01 S/m と設定した。さらに、割れ目群へ高導電率の塩水が浸透することを想定して (CASE5)、薄層の比誘電率は CASE3 と同じ 20 であるが、導電率を 2.0 S/m と大きくして反射波形のシミュレーションを行った。

CASE1~4 における反射波形の計算結果を図-2 に示す。0.25m 下の薄層からの反射波の初動は、基質部の比誘電率

12 が場合、電磁波の伝搬速度は 0.087m/ns となることから、往復走時 5.8ns に現れる。図-2 に示すように各ケースで 5.8ns で反射波形が見られ、これが初動の波形である。薄層の比誘電率が基質部の値である 12 より小さい乾燥時の場合 (CASE1、CASE2) と、それより大きい含水時の場合 (CASE3、CASE4) を比べると、初動の波形の位相が逆転していることが分かる。また、基質部と薄層の比誘電率の差が大きくなるほど、反射波形の振幅が大きくなることが分かる。すなわち、割れ目内の飽和の程度が大きくなるに従い、反射波形の振幅が大きくなることを示している。往復走時 7.5ns 以降に見られるのは薄層下面からの反射波である。

次に CASE3 と CASE5 の反射波形の計算結果を図-3 に示す。薄層の導電率が増加すると往復走時 5.8ns の反射波形の初動の振幅が増加することが分かる。さらに、反射波形の卓越周波数が低波周に変化していることが分かる。これは高導電率の媒質が反射境界になる場合、反射波形は低周波数帯域の反射強度が大きくなり高周波数帯域の反射強度は低周波数帯域に対して相対的に小さくなることが影響したものと考えられる。また、CASE3 には往復走時 7.5ns 付近に薄層の下面から反射してきた波が認められたが、CASE5 では同じ往復走時付近で薄層下面からの反射波は認められなかった。これは薄層部の導電率が大きいため薄層の上端での反射の程度が大きく、また薄層を透過する間に電磁波が大きく減衰したためと考えられる。

4. おわりに

割れ目群を模擬したモデルで電磁波の数値シミュレーション解析を行った結果、割れ目内の媒質の変化が反射波形の位相の反転や振幅、卓越周波数に影響を与えることが分かった。これは経時的な計測により反射波形の変化を捉えられれば、割れ目内の浸透状況の評価が可能であることを示しており、今後、実際のフィールドにおけるレーダによる連続計測結果の解釈に展開していく予定である。

参考文献

- 1) 尾西・六川：地中レーダ観測記録の周波数変調による高導電率領域の判定，物理探査学会第 111 回学術講演会論文集，P9，pp.233-236，2004。
- 2) Emsley S., Olsson, O., Stenberg, L., Alheid, H. and Falls, S.: ZEDEX - A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring, SKB TR97-30, p.198, 1997.
- 3) Giannopoulos, A: Modelling ground penetrating radar by GprMax, Construction and Building Materials, Vol.19, pp.755-762, 2005.

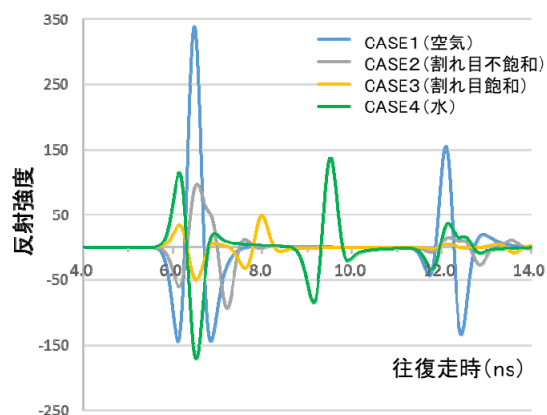


図-2 解析結果 (飽和/不飽和)

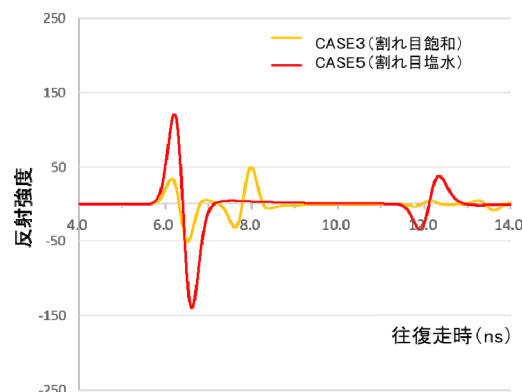


図-3 解析結果 (塩水浸透)