

(104) 岩盤斜面内亀裂探査への地下レーダーの適用性について

建設省土木研究所 ○笹原 克夫
綱木 亮介
(株) パスコ 下村 博之
応用地質 (株) 土田 康夫

Application of the Ground probing radar to the investigation of the crack in rocky slope

Katsuo SASAHARA, Ryousuke TSUNAKI Public Works Research Institute, MOC
Hiroyuki SHIMOMURA PASCO Coporation
Yasuo TSUTIDA OYO Coporation

Abstract

Ground probing radar, which is a high resolvable and non-destructive method, was proved to be very useful in a investigation of cracks in rock slope by the previous study of us.

Next, in this study, we examine the relationship between the clearness of reflect wave from a crack and the condition of the crack. For the purpose of this, we carried out 2 types of experiments. One is on a actual rock slope, and the other is using crack model in a rock block. In the analysis of these experiments, we derive the reflectivity of a crack from the reflected amplitude, and examine the relationship between the reflectivity of a crack and condition of the crack(aperture, crack-filling material). As a result, following facts are found out.

- 1) As the aperture of a crack is larger, reflectivity of the crack also becomes larger.
- 2) The relationship curve between the aperture of a crack and the reflectivity of the crack differs with the inductivity of the crack-filling material.

1. はじめに

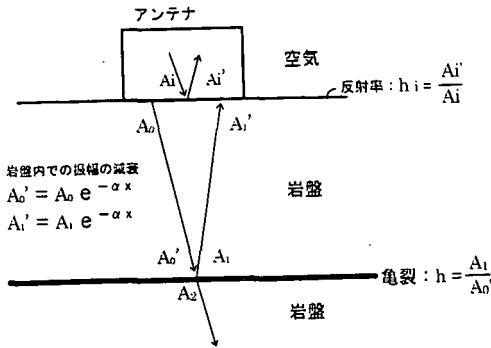
落石や岩盤崩壊の発生に関する要因として岩盤内の亀裂等の不連続面の分布や性状が重要であると考えられる。そのための非破壊的な調査手法として筆者らは地下レーダーに着目し、ある岩盤斜面の地下レーダーによる岩盤斜面内亀裂分布探査の結果が、壁面観察やボーリング調査より推定された岩盤斜面内の亀裂分布を良好に再現するという結果を得た¹⁾。本報ではそれに引き続き、探査可能な亀裂条件(開口幅、湧水、充填物)の限界について、またそれらの亀裂条件と地下レーダー反射波の明瞭さの関係について検討する。そのために亀裂からの反射波の反射係数に着目し、①現場実験と②室内模型実験によって種々の亀裂条件と反射係数の関係を求めた。

2. 現場実験

2.1 実験方法

実験斜面は先の研究¹⁾でも用いた福島県白河市広谷地内の採石場跡の岩盤斜面である。この斜面は固結度の高い熔結凝灰岩からなり、垂直方向にやや不規則な節理が発達している。また壁面は垂直かつ平坦な面となっている。

実験斜面上には長さ30mの調査測線を設定し、その上で周波数500MHzのアンテナを用いてプロファイル



記録波形例

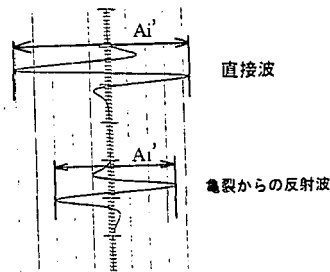


図-1 電磁波の伝播及び反射

測定を行い、亀裂からの反射波を記録した。またワイドアングル測定により電磁波伝播速度を測定した。次に岩盤斜面内の亀裂の分布・性状を把握するために、壁面観察と9本の水平ボーリングを行った。またボアホールビデオによる撮影も行った。これらの詳細は参考文献1)を参照されたい。

2.2 解析方法

①減衰定数の算出

地下レーダにより明瞭な記録の得られた7本の亀裂上で、各々何点かずつ反射振幅と岩盤内伝播距離（岩盤表面から亀裂上の測定点までの最短距離）の関係を読みとった。それらを横軸に岩盤内伝播距離、縦軸に反射振幅（対数表示）の半対数グラフ上で整理し、その回帰直線の傾きから減衰定数を決定した。反射波振幅の減衰は式(1)で表される²⁾。

$$E_x = E_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad \dots (1)$$

E_x : 距離 x (m) での電界強度振幅 E_0 : 入力される電界強度振幅 α : 減衰定数 (1/m) x : 距離 (m)
反射係数の算定には以上の手続きで求めた各亀裂の減衰定数の平均値 (0.28) を用いることとする。

②反射率の算定

図-1を参考に亀裂での反射係数の算定方法について述べる。

まず岩盤への入射振幅を求める必要がある。送信アンテナからの出力(A_i)電磁波は空気と岩盤の境界面で反射する。異なる伝播媒質の境界面での反射係数は以下の式で与えられる²⁾。

$$h = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad \dots (2)$$

ϵ_1, ϵ_2 : 媒体 1, 2 の比誘電率

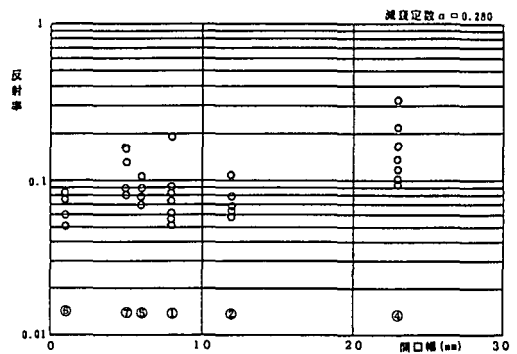


図-2 亀裂の開口幅と反射係数（現場実験）

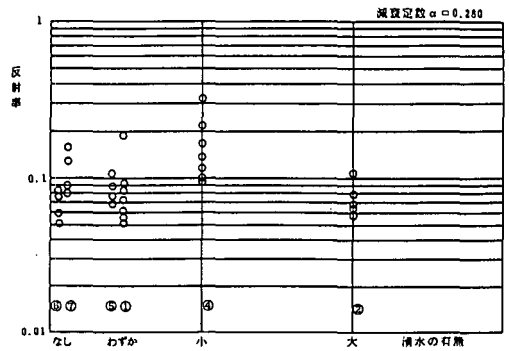


図-3 湧水の有無と反射係数（現場実験）

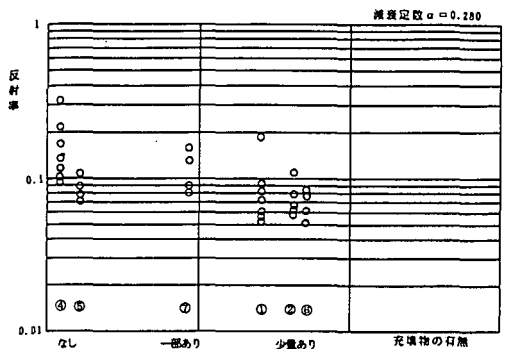


図-4 充填物の有無と反射係数（現場実験）

ワイドアングル測定より、空気及び実験斜面（熔結凝灰岩）の比誘電率は各々1、14.8であるので、空気と岩盤の境界面の反射係数は $h=0.59$ である。この値と岩盤表面に鉄板を設置して電磁波を全反射させたときの振幅（42.3）より岩盤への入射振幅（ A_0 ）は $A_0=42.3 \times 0.59=17.3$ と求められる。

次に亀裂での反射係数は以下の式で求められる。

$$h = \frac{A_1}{A_0'} = \frac{A_1'}{A_0} e^{2\alpha x} \dots\dots(3)$$

α ：減衰定数(0.28) x ：往復距離(m)

この式(3)により岩盤斜面内の各亀裂上で、反射振幅を読み取った点における反射係数を求めた。

2.3 解析結果

以上の方法により求めた亀裂の条件と反射係数について整理したものが図-2～4である。各々開口幅、湧水の有無、充填物の有無と反射係数との関係である。なお亀裂性状については同一の亀裂では壁面観察結果と孔内での観察結果がほぼ一致することから、同一の亀裂については性状は一定と考えた。

図-2は亀裂の開口幅と反射率の関係である。開口幅が2mm以上の亀裂からの反射波が捕らえられていること、そして幅2～25mmの範囲では開口幅が大きいほど反射率も大きくなる傾向が認められることがわかる。図-3を見ると湧水の有無と反射率の間には特別な関係は認められなかったが、充填物についてはその量が多いほど反射係数が小さくなる傾向が図-4より認められる。

3. 室内模型実験

現実斜面での実験では、岩盤斜面内部での亀裂の分布・性状をボーリングという点の調査により推定しているので、その正確な把握が困難であること、また亀裂の条件も開口幅、湧水、充填物の条件が複雑に関係合っていることより、上記の解析結果の信頼性は低いと考えられる。よって亀裂の条件を単純化して、任意にかつ厳密にコントロールできる室内模型実験を行った。

3.1 実験及び解析方法

岩盤模型及び地下レーダーの測定方法について図-5に示す。測

定には900MHzのアンテナを用いた。岩盤模型は稲田花崗岩で作成した。実験で検討する亀裂の開口幅及び充填物の条件を表-1に示す。また実験で使用する岩盤と充填物の伝播特性に関わる物性値を表-2に示す。

亀裂からの反射波の反射係数の算出方法は以下の通りである（図-6）。まず種々の条件に設定された亀裂からの反射波の最大振幅を読みとる。それを亀裂に金属板をはさんで電磁波を全反射させた時の反射波の最大振幅で正規化した値を反射係数とする。

3.2 解析結果

以上の方法で求めた亀裂の開口幅と反射係数の関係を図-7に示す。(a)は亀裂内の充填物がない場合、(b)は充填物が飽和珪砂の場合、(c)は亀裂内が水で満たされている場合である。(b)については亀裂内に粘土が存在する場合をモデル化した。

亀裂内の充填物がない場合や充填物が飽和珪砂である場合は、基本的には開口幅が大きくなるほど反射係数は大きくなっている。しかし亀裂内に水が充填されている場合は、開口幅が10mm程度までは開口幅の増大と共に反射係数も大きくなるが、それ以上

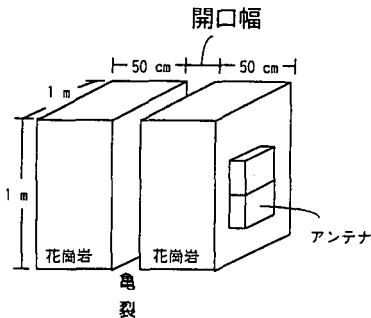


図-5 岩盤模型と地下レーダーによる測定

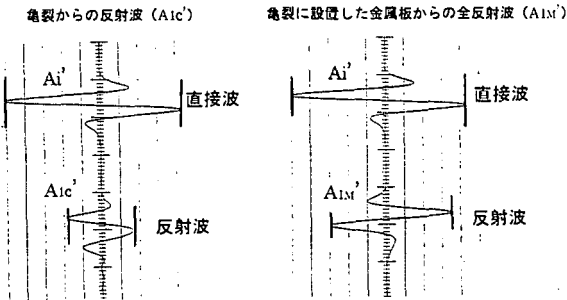


図-6 反射係数の算出方法

になると逆に開口幅の増大と共に反射係数は小さくなる。つまり開口幅10mmで反射係数がピーク値をとるような曲線となる。亀裂内に飽和珪砂を充填した場合も、開口幅が10mmを越えると反射係数の変化が小さくなるが、これも亀裂内に水が充填されている場合と同様な現象で、さらに開口幅が大きくなると反射係数がピーク値となった後に減少していくものと考えられる。

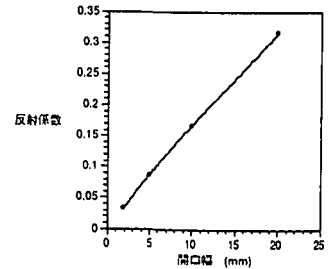
また全体的に反射係数は充填物がない場合（空気）、充填物が飽和珪砂、充填物が水の順に大きくなっている。これらの充填物の比誘電率を考えると、比誘電率が大きいほど反射係数が大きくなる傾向があるといえる。ここで式(2)より各充填物の反射係数の理論値を求めると、空気0.418、飽和珪砂0.344、水0.542となり、反射係数は飽和珪砂、空気、水の順に大きくなることによって、実験結果と一致しない。また充填物がない（空気）の場合は実験での実測値が理論値より小さいものの、飽和珪砂と水の場合は実測値が理論値を超えてしまう。これらについてはさらなる検討が必要である。

表-1 実験条件

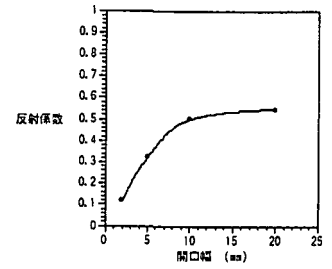
開口幅	2、5、10、20 (mm)
充填物	無し（空気）、珪砂、水

表-2 岩盤及び充填物の物性値

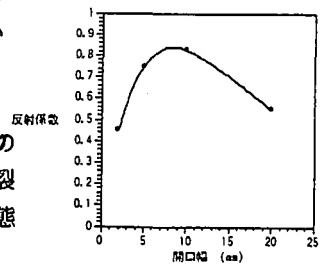
	種類	比誘電率: ϵ_r (電磁波速度 [注1] : v (cm/nsec))	比抵抗: R (Ωm)
岩	稲田花崗岩	$\epsilon_r = 5.9$ ($V=12.3$ cm/nsec)	30,000
充 填 物	空気	$\epsilon_r = 1$ ($V=30$ cm/nsec)	—
	珪砂 [注2]	$\epsilon_r = 25$ ($V=6.0$ cm/nsec)	130
	水	$\epsilon_r = 81$ ($V=3.3$ cm/nsec)	35



(a) 充填物がない



(b) 充填物が飽和珪砂



(c) 充填物が水

図-7 亀裂の開口幅と反射係数 (模型実験)

4. 考察

以上現場斜面での実験及び室内模型実験から亀裂性状、特に開口幅及び充填物の種類と、反射係数との関係について考察する。

まず開口幅と反射係数の関係について現場斜面での実験結果（図-2）と、室内模型実験結果（図-7）を比較する。現地実験と室内模型実験でも亀裂充填物が空気や飽和珪砂の場合は、開口幅が大きくなるほど反射係数も大きくなる関係が認められる。しかし充填物が水の場合は、開口幅の小さい範囲では開口幅の増大と共に反射係数が増加するものの、開口幅10mmで反射係数がピーク値をとり、その後は開口幅の増加と共に反射係数が小さくなる。また現地実験の反射係数は、室内模型実験に比較して小さい。これはボーリング調査等では確認できない充填物が亀裂に含まれているためと考えられる。充填物として例えば飽和珪砂の比誘電率を考えると25であり、それと現場斜面の熔結凝灰岩の比誘電率（14.8）から、式(2)を用いて反射係数の理論値を求めると、0.13と非常に小さい値となる。つまり比誘電率が岩盤に近い充填物が亀裂内に存在するため、コントラストが小さくなったと考えられる。

また現場斜面での実験で、充填物が存在すると反射係数が小さくなるのも、同様に岩盤と充填物の比誘電率が近いためと考えられる。つまり亀裂内の充填物が多くなるとそれだけ亀裂の開口幅が小さくなったような状態になり、そのために反射係数も小さくなったと考えられる。

次に図-8に室内模型実験における開口幅、充填物の比誘電率、そして反射係数の3次元的な関係を表す。この図によると、充填物の比誘電率が小さい場合は、開口幅が大きくなるにつれて反射係数も増加し、この時の反射係数と開口幅の増分比（＝反射係数増分／開口幅増分）はほぼ一定である。しかし比誘電率が大きくなると増分比は開口幅が大きくなるにつれて減少するようになり、さらには比誘電率が81になると開口幅が10mmを越えると反射係数が減少していくようになる。つまり開口幅と反射係数との関係も、亀裂充填物の

比誘電率が変化すると共に、変化していくということである。

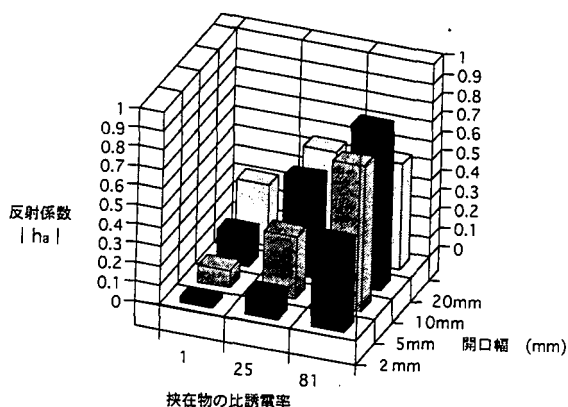


図-8 開口幅、充填物の比誘電率と
反射係数の関係

5. おわりに

以上岩盤斜面内の亀裂の性状と反射波の反射係数との関係について、現場斜面での実験と室内模型実験により検討した。これにより亀裂からの反射波の反射係数は、亀裂の開口幅や充填物の比誘電率が影響しあって決定されるので、亀裂性状と反射係数との関係は例えば図-8に示すような複雑な関係となることが判明した。今後は岩盤材料（の比誘電率）を幾つか変化させて実験的検討を進めると共に、理論的・解析的研究も行いつつものである。

参考文献

- 1) 笹原克夫他：岩盤斜面内亀裂調査への地下レーダの適用に関する検討，土木技術資料，36-6，pp. 46～51，1994
- 2) 土質工学会編：岩の調査と試験，p. 164，1989.9