

(5) ボアホール型岩盤レーダーによる探査結果について

株式会社 間組 向上拡美・株式会社 間組 ○北村孝海
株式会社 間組 塩崎 功・川崎地質株式会社 登内正治

1. まえがき 筆者らは、地盤探査技術として、ボーリング孔に挿入できる透過法・反射法両用のボアホール型岩盤レーダーの開発を行ってきた。開発に当っては、レーダーを現場で利用する場合の適用性の把握と問題点の抽出を行うため、現地実験を中心に進めてきた。その方法として、まず平板型のアンテナを用いた予備実験¹⁾を行い、岩盤レーダーの基本性能を確認したのち、ボアホール型岩盤レーダーの開発を進め、この装置を用いた現地実験を行った。本文は、ボアホール型岩盤レーダーによる現地実験結果について述べ、若干の考察を加える。

2. 現地実験場所および方法 実験場所は、宮城県伊具郡丸森町の福島県宮松ケ房ダム(施工中)洪水吐横の実験サイトである(写真-1)。実験サイトにはφ66mm、深さ30mのボーリング孔3本を設け、このうちボーリング孔間距離が10mのBr.2とBr.3を用いて透過法の実験を行った(図-1参照)。実験では、深度2~5m間を0.5mピッチで発信・受信ノズルを昇降し、図-2に示すような探査ラインについてデータを収録した。また、実験サイト横の掘削面では、亀裂の分布、走向・傾斜、開口幅、挟在物等の調査を行った。

3. 地質概要 当地域は阿武隈山地北部に位置し、阿武隈帯と呼ばれる花 岩類および広域変成岩類によって構成されている。このうち、実験サイトは白亜紀後半の花 閃緑岩からなっている。実験サイト横の亀裂観察およびボーリングコア観察(写真-2)の結果から岩盤等級はC_M~C_I級、RQDは平均40%程度で亀裂頻度は5~10本/m(図-3)と全体に亀裂がよく発達している。亀裂の走向傾斜は、N10~20W 60~70NEおよびN40~50W 70~80SWに集中し、これらの亀裂は一部に粘土を挟み、また、地下水の経路となっている部分があり、幅2~10mm程度の鉄分や他の有色鉱物の集積のため黒

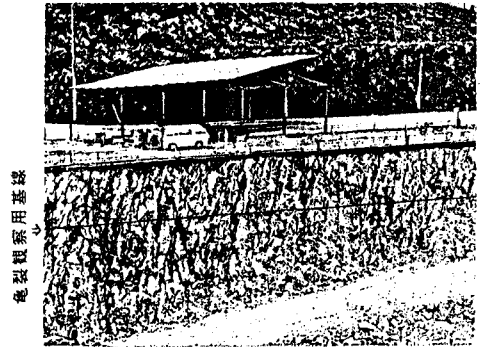


写真-1 実験サイト全景

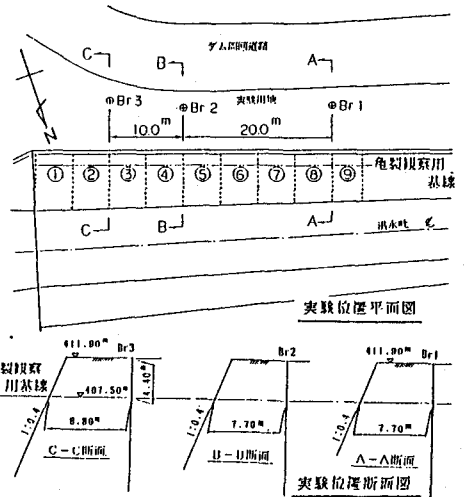


図-1 実験サイトの平面・断面図



写真-2 ボーリングコアの状況 (上: Br.2, 下: Br.3)

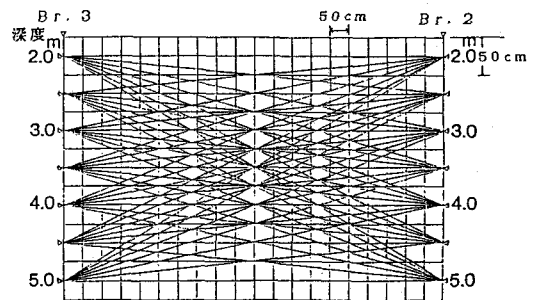


図-2 透過法による探査ライン

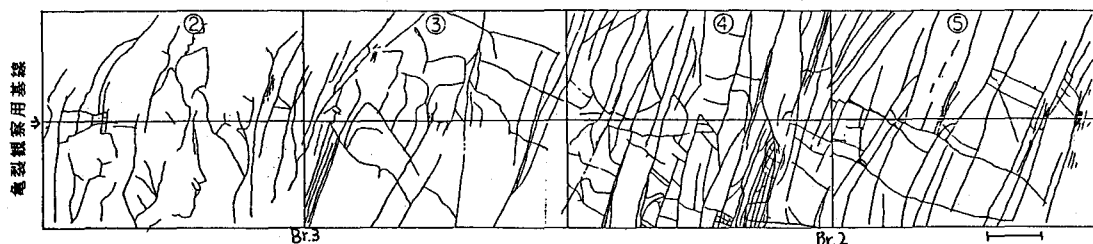


図-3 亀裂調査結果の一部(図-1の②~⑤ゾーン)

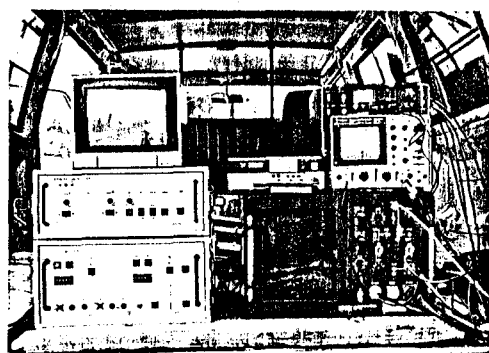


写真-4 制御装置および記録装置

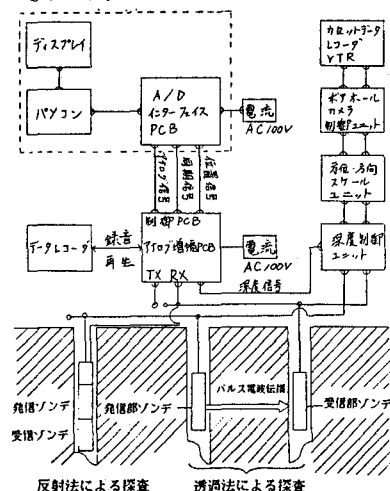


図-4 本装置のブロックダイアグラム

色化した部分が認められる。

4. 岩盤レーダー探査装置 実験に用いた装置のブロックダイアグラムを図-4、ボアホール型ソンド(BHTVカメラ拡大写真含む)および制御装置、記録装置を写真-3, 4に示す。使用アンテナの発信中心周波数は、150MHzと75MHzの2種である。本装置の特徴は、①ボアホール型(外径60mm)で透過法、反射法に利用でき、②周波数の異なる複数のアンテナを内蔵できるソンド構造で、③アンテナを回転させながら上昇・下降でき、④BHTVも装着できるソンド構造などである。

5. 実験結果

①孔間距離10mでの透過法の実験では、150MHzのアンテナを用いた場合は受信波がノイズに埋れて判読不能であったが、75MHzのアンテナを用いた場合は受信波の検出が可能であった。

②受信波形(75MHzの場合)は、図-5に示すように、やや立上りのシャープさは欠けるものの明瞭な正弦波が得られた。

③岩盤中の電磁波速度は、平均値で $6.87 \times 10^7 \text{m/sec}$ であった。

6. 考察

(1)岩盤の比誘電率の分布 図-2に示した全探査ラインについて得られた電磁波伝播時間からレーダートモグラフィ法の一つであるART法によって、スローネス(=電磁波伝播速度の逆数)を算定し、得られた電磁波伝播速度 v から、 $v = c_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ (c_0 :真空中の電磁波伝播速度、 ϵ_r :岩盤の比誘電率)として比誘電率の分布を求めた(図-6)。得られた比誘電率は、平均値 $x = 19.13$ 、



写真-3 ボアホール型ソンド
(150MHz アンテナ内蔵)

標準偏差 $\sigma=1.493$ となった。比誘電率は、Br.2からBr.3へ左下がりであり高底部が互層で現われる分布を示しており、図-3に示した亀裂調査の傾斜と比較してやや緩い傾斜であるが、傾向はよく一致している。また、Br.2の深度4m付近とBr.3の深度4.5m付近のボーリングコアの亀裂群とトモグラフィーの高誘電率部分がよく対応しており、相対的ではあるが岩盤の硬軟が比誘電率に反映されている。

(2) 孔間弾性波探査結果との比較 同一ボーリング孔を使った孔間弾性波探査のトモグラフィー結果²⁾を図-7に示す。この結果は、深度10~20m間を1mピッチで探査したものを示しており、弾性波速度構造は高・低速度帯が互層に表われ、左下がりの分布となっている。探査深度は異なるものの、図-6に示したレーダートモグラフィー結果は、この弾性波探査結果とも類似した傾向を示している。

(3) 不均質混合体の比誘電率について 不均質二成分系混合体の比誘電率と各成分の比誘電率の関係は、経験的に数多くの実験式が提案されている。横山³⁾は、実験によりLichteneckerの実験式の $f(\varepsilon)=\log \varepsilon$ が実測値とよく一致することを確かめ、さらに、多成分系に拡張した式(1)によって、岩石(鉱物と空隙の混合体)の比誘電率が求められることを示した。ただし、水分あるいは導電性鉱物が存在する場合は適用できないとしている。

$$\log \varepsilon = \sum \delta_i \cdot \log \varepsilon_i, \quad \sum \delta_i = 1 \quad (1)$$

ここで、 ε は混合体の比誘電率、 ε_i は各成分の比誘電率、 δ_i は各成分の容積比を表す。

また、横山⁴⁾は岩石試料を用いた実験(ただし、試料寸法 $\phi 25\text{mm}$ 、厚さ 3mm)で、ある含水率を越えると急激

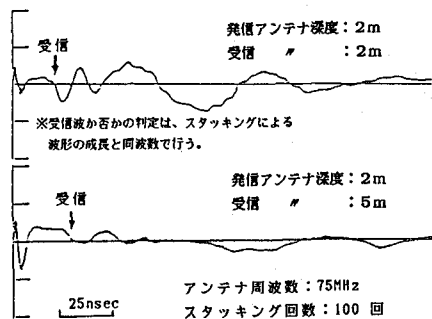


図-5 受信波形例

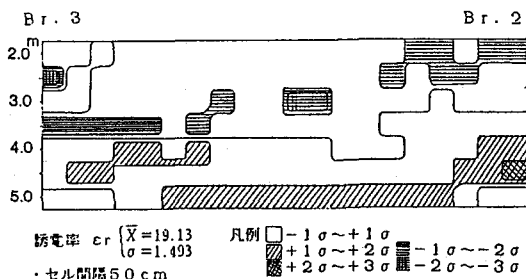


図-6 トモグラフィーによる比誘電率の分布

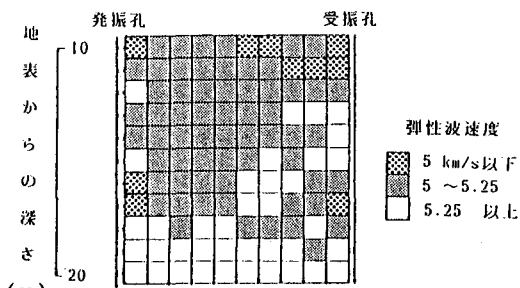


図-7 弾性波探査によるトモグラフィー

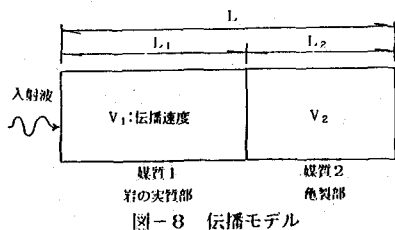
に誘電率が増加し、その値は80以上になることを示し、この理由を岩石中の水はイオンを溶解した電解質溶液として作用し界面分極を起こしたものと推定している。

いま、筆者らの実験を簡単に岩の実質部と亀裂部の二成分系混合体として考える。亀裂調査結果から、亀裂部の容積比が0.01の場合とその10倍の0.1の場合について、式(1)により岩盤全体の比誘電率を算定する。

岩の実質部の $\varepsilon_1=10$ 、亀裂部は全て水で満たされているとして $\varepsilon_2=80$ として求めた結果は、 $\varepsilon=10.2$ ($\delta_2=0.01$)、 12.3 ($\delta_2=0.1$) となり、実測値の平均 $\varepsilon=19.13$ に比較していずれも小さな値である。これは現地の実験条件が、①探査地点の地下水位が高く含水率が高かったこと (Br.2では探査位置の半分は地下水面下であった)、②岩盤の亀裂が多かったこと、③亀裂の一部に粘土を挟在していたこと、④地下水が鉄分の多い水質であったことなどにより、界面分極現象を生じたためと考えられる。

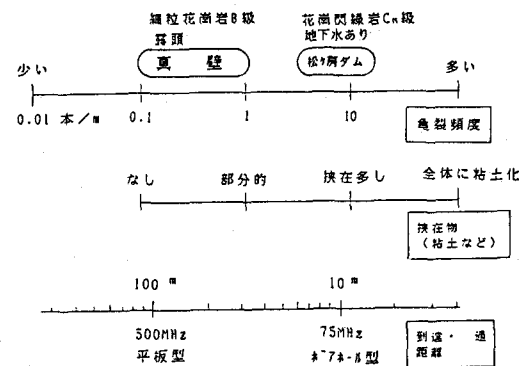
(4) 岩盤中の電磁波伝播速度 佐々⁵⁾は、水で飽和した亀裂を含む岩盤のP波速度について、現位置計測・モデル実験・数値計算を行って、P波の波長が亀裂の厚さ(幅)よりかなり長い場合(モデル実験は波長が亀裂厚さの80~800倍で実施)には時間平均式 $(L/V=L_1/V_1+L_2/V_2)$ (図-8参照)が適用できず、測定される

P波速度は時間平均速度より遅くなることを確認し、この理由として、測定されるP波の波形が亀裂で多重反射し、遅れて到達する多くの波の重畳によって形成されるためであるとしている。P波速度の遅れの程度は、途中の亀裂数が増えるにつれて大きくなるが、亀裂数がある程度以上になるとほぼ一定となることを示している(モデル実験では、亀裂数が10本程度でほぼ一定となり、そのときP波速度は亀裂が無い場合に比べ約30%低下している)。



筆者らの実験に対し、いま仮に時間平均式が成立つとして、岩実質部速度 $V_1=9.48 \times 10^7 \text{ m/sec}$ 、亀裂部速度 $V_2=3.35 \times 10^7 \text{ m/sec}$ (各々 $\epsilon_r=10, 80$ (飽和)として $V=C_0/\sqrt{\epsilon_r}$ より逆算)、 $L_1=9\text{m}$ 、 9.9m ($L_2=1\text{m}$ 、 0.1m)を用いて平均速度を算定すると、 $V=8.01 \sim 9.31 \times 10^7 \text{ m/sec}$ となり、実測の $V=6.87 \times 10^7 \text{ m/sec}$ よりいずれも大きい。

今回の実験条件が、波長が約1m(発信周波数75MHz)、亀裂厚さ1mm程度で、電磁波の波長は亀裂厚さの約1000倍となり、また、発受信点間の亀裂数は50~100本程度となることから、電磁波が伝播する場合においても、亀裂による重複反射によって時間平均式が成立しないものと考えられる。



注) 岩盤区分は電中研方式によった。

図-9 岩盤レーダーの概略性能

(5) 探査可能距離の検討 本実験結果および文献1)の予備実験結果から岩盤レーダーによる探査可能距離と岩質(亀裂頻度、挟在物の有無)の関係を図-9に示す。この図から、亀裂が少なく堅硬な岩盤では、発信周波数が500MHzと高い場合でも100m程度の探査が可能であり、亀裂が多く挟在物があり含水率も高ければ(水質にもよるが)、75MHzの低い発信周波数を用いて10m程度の探査が可能であることがわかる。

7. あとがき

ボアホール型岩盤レーダー装置の開発と併行して現地実験を行い、岩盤構造(硬軟、断層等)の推定に適用できる目処が得られた。ただし、含水率が高い場合の界面分極現象、電磁波の亀裂による重複反射など解決すべき課題も多い。今後、電磁波伝播特性と岩種・岩質、含水率および力学物性との関係についての実験、減衰率あるいは反射法に関するトモグラフィの検討、装置の改良を進め、より定量的に岩盤構造・物性を推定できる技術に高め、適用分野を広めたいと考えている。

ボアホール型岩盤レーダーの現地実験に際しては福島県ならびに間組・竹中土木・住友建設共同企業体の関係者の方々に多大な御協力・御援助をいただいた。ここに、深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鈴木 務, 荒井郁男, 小林秀男, 向上拡美, 北村孝海, 登内正治, 結城則行: 電磁波検層開発に関する岩盤基礎実験(その1), 第19回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.106~110, 1987.2
- 2) 世一英俊, 蓮井昭則: 原位置岩盤における孔間弾性波測定結果とその処理について、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1987
- 3) 横山秀吉, 堀津多三郎: 岩石の誘電率の算定について—岩石の誘電的性質に関する研究(第2報)、日本鉱業会誌/94 1083, pp.317~322, 1978.5
- 4) 横山秀吉: 300Hz~1MHz周波数領域における岩石の誘電率について—岩石の誘電的性質に関する研究(第1報)、日本鉱業会誌/93 1071, pp.347~352, 1977.5
- 5) 佐々宏一, 劉 明治, 杉本卓司: 水で飽和した亀裂を含む岩盤のP波伝播特性、第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.163~168, 1984

(5) FIELD EXPLORATION RESULTS BY BOREHOLE RADAR

by

Takaomi KITAMURA, Hiromi KOJO, Isao SHIOZAKI

(HAZAMA-GUMI, LTD)

Shoji TONOUCHI

(Kawasaki Geological Engineering Co., LTD)

SUMMARY

For surveying the structure of the strata, buried objects, etc., borehole radar system using electromagnetic waves has been developed. This system can use both crosshole transmission method and reflection method.

The results of the fundamental field tests were shown that explorative distances were estimated 80m in the massive and little water content rock mass of granite (transmitting frequency: 500MHz), and 10m in the cracky, high water content rock mass of granodiorite (transmitting frequency: 75MHz).

The distributions of dielectric constant estimated by radar tomography matched the results of crack survey, and this explorative method using electromagnetic waves was confirmed to be the favorable method.