

地中レーダによる地下空洞近傍の 亀裂性岩盤内の地下水浸透状況調査

升元 一彦^{1*}・栗原 啓丞¹

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

*E-mail: masumotk@kajima.com

岩盤空洞掘削時において空洞周辺に生じる亀裂群は、岩盤空洞の力学安定に関する問題を生じさせると共に地下水の透水経路としての問題も生じる。具体的には、水封式岩盤貯蔵や放射性廃棄物地層処分などの地下水管理やトンネル背面の湧水対策において、空洞周辺の地下水状態を把握しておくことは重要である。これに対し、現在、著者らは亀裂性岩盤内の地下水挙動を非破壊的に把握する方法として、地中レーダを用いて評価する手法の開発を進めている。今回、本手法の検証試験として、岩盤上に打設したコンクリート上面からレーダ計測を行い、得られた反射波形の変化やスペクトル解析を行うことにより、コンクリート背面の岩盤内の地下水状態の評価を行った結果について報告する。

Key Words : GPR, ground water, fractured rock, spectrum analysis, rock cavern

1. はじめに

岩盤空洞掘削時において空洞周辺に生じる亀裂群は、岩盤空洞の力学安定に関する問題を生じさせると共に地下水の透水経路としての問題も生じさせる。具体的には、水封式岩盤貯蔵の地下水管理や放射性廃棄物地層処分における安全評価、トンネル背面の湧水対策等において、空洞周辺の地下水状態を把握しておくことは重要である。これに対し、ボーリング孔を利用した調査では、調査時に水理場が乱れる可能性があり、また面的な評価に限界がある。

筆者らは、岩盤空洞周辺の亀裂内の地下水状況の面的な評価を非破壊的に行う方法として、地中レーダを用いる手法の開発を進めている¹⁾。これまで、模擬地盤を対象とした基礎試験により、反射波形、反射強度の変化をレーダで測定することにより、亀裂内へ水の飽和状態、塩水の浸透状況を把握できる可能性を示している²⁾。今回、地中レーダを用いた調査手法の検証試験として、覆工のある地下空洞内からの調査を想定し岩盤上に打設したコンクリート上面からレーダ測定を行った。水道水や塩水の岩盤内への浸透に伴う反射波形の変化の測定及びスペクトル解析を行うことにより、コンクリート背面の岩盤内の地下水の浸透状況を評価できる結果が得られたので報告する。

2. 地中レーダを用いた手法の検証試験方法

岩盤空洞周辺を想定した検証試験として、新鮮な花崗岩の表面にコンクリートを30cm程度の厚さで打設し、注水孔を用いて岩盤内や岩盤とコンクリートの境界面の地下水状態を変化させ、異なる地下水状態でコンクリート上面からのレーダ計測を行った。試験概念図及び試験サイトの写真を図-1に示す。岩盤内の亀裂への浸透に伴う反射波形の変化を測定するため、比較的連続性のあるNE走向の亀裂①~③を亀裂観察結果から抽出し、この内亀裂②を注水対象亀裂として、これに交差するよう注水孔を1m深さで5本配置した（図-2）。亀裂②は75度の北向き傾斜を示し、部分的に開口しており、一部では数cm幅の軟質部を伴う。亀裂①、③は白色脈を一部挟在し、傾斜は各々90度、60度北向きであった。この亀裂群を含む3.0×3.5m範囲にコンクリートを水平に打設した。岩盤面の不陸のため、試験サイト内では図-3のコンターに示すように最大で45cm、最小で10cm程度と厚さに違いが生じている。注水孔に自然地下水は観測されず、地下水面は岩盤表面より1m以下にあった。

検証試験は800MHzのパルスレーダを用い、図-3に示す2m、3測線でプロファイル測定を行った。地下水状態として、(1)初期状態、(2)全ての注水孔を水道水で孔口まで満水にした状態、(3)全ての注水孔を塩水に置換した状態（塩水の電気伝導度1.7S/m）の3状態で測定を行

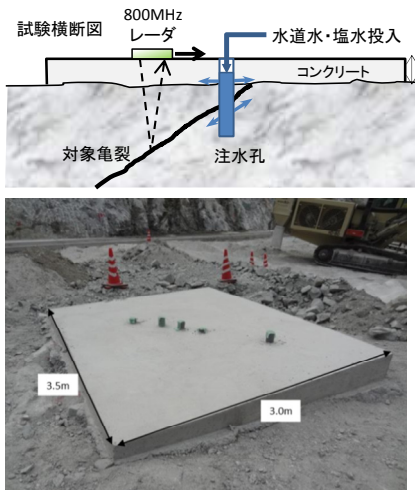


図-1 試験概念図

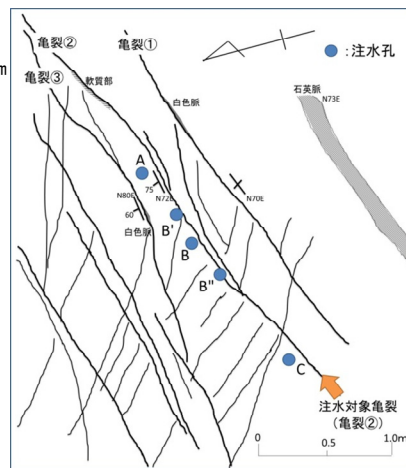


図-2 岩盤面亀裂観察結果

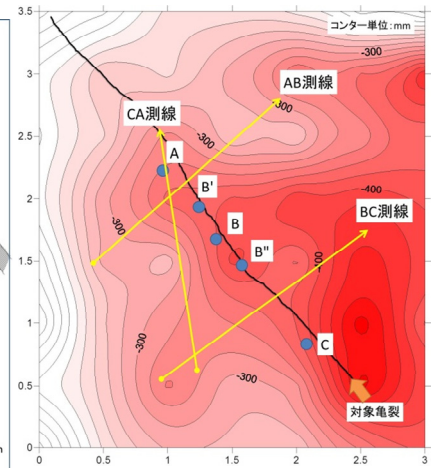


図-3 プロファイル計測測線
及び コンクリート厚さ分布図

った。プロファイル測定は各発受信の位置で200回程度スタックを行い、2.5cmピッチで測定を実施した。

以上の検証試験に加えて、

- ① コンクリート厚さを評価するためのCMP測定（1測線、塩水置換後）
- ② 注水孔への塩水投入に伴う反射波形の変化をモニタリングするための定点測定（1点）

を行った。CMP測定は図-4に示す測線で、50~500MHzの連続波レーダを用い10cmピッチで60cmから200cmまでオフセット距離を広げて測定を行った。定点測定は、図-4に示す位置で800MHzのパルスレーダを用いて、B'孔に投入した塩水がB孔へ浸透していく過程を連続的にモニタリングした。塩水投入後1分ピッチの計測間隔で、電磁波の反射波形を測定した。なお、B孔では孔底に電気伝導度計を設置し、電気伝導度の変化により塩水の破過状態を計測した。

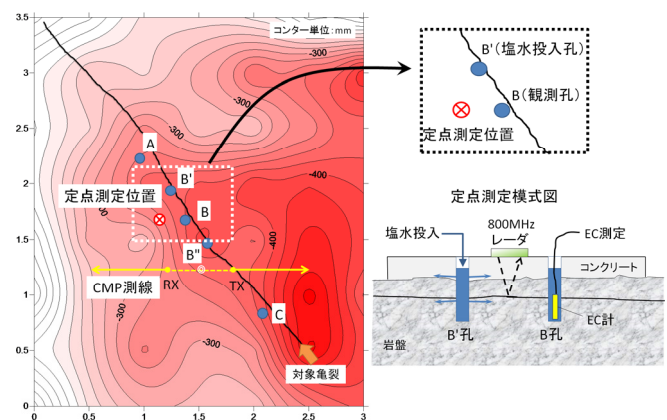


図-4 CMP 測線 及び 定点測定位置図

3. 試験結果

(1) CMP測定結果

CMP測定結果を図-5に示す。光速 $C=3.1 \times 10^8 \text{m/sec}$ を示す直達波の波形に遅れて反射波形が確認できた。直達波がオフセット距離ゼロと交差した走時を往復走時ゼロ点として、この反射波形を理論双曲線に近似させると、深度29cmの反射面からの反射で、この反射面までの電磁波の伝搬速度は $1.2 \times 10^8 \text{m/sec}$ であると計算できた。計算で求められた反射面の深度は、CMP測線中央のコンクリート厚さである36cmよりやや浅い深度を示している。一方、伝搬速度 $1.2 \times 10^8 \text{m/sec}$ は比誘電率6.3に相当し、乾燥状態のコンクリートの比誘電率4~10とほぼ一致している³⁾。CMP測定の共通反射面はコンクリートと岩盤の境

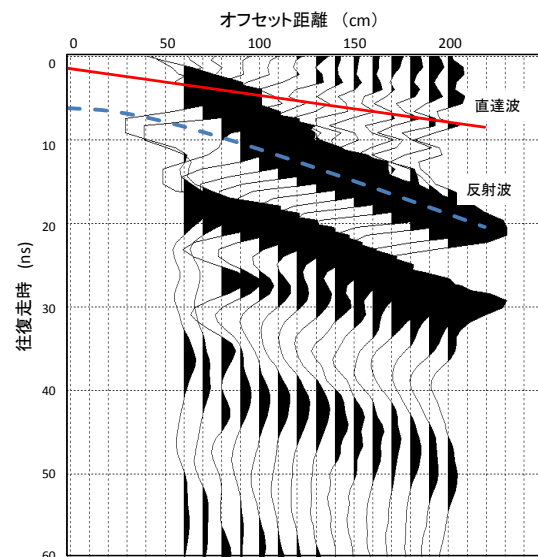


図-5 CMP 測定結果

界面よりやや浅い位置であることから、境界面に浸透した塩水がコンクリート内部に浸潤し、コンクリート内に飽和毛管帯が形成され、この飽和毛管帯の上面からの反

射波をCMP測定では捉えている可能性を示している。
また、今回のCMP測定により得られた伝搬速度から、
プロファイル測定時においてはコンクリートと岩盤の境
界面に浸透した塩水の反射波は、往復走時5ns前後に確
認できると推定できた。

(2) 定点測定結果

定点測定時におけるB'孔への塩水投入後のB孔にお
ける電気伝導度の変化を図-6に示す。投入開始7分後にB
孔に破過し、35分後には投入した塩水の電気伝導度であ
る1.7S/mに到達したことが分かる。この浸透過程の定点
における反射波形の測定結果を図-7に示す。この図は塩
水投入直前の波形を基準波形として、時間経過後の波形
の基準波形に対する振幅値の差分を計算した結果である。
投入後5分経過後から往復走時2~3nsの直達波に相当する
差分振幅が大きくなると共に、5~6nsの差分振幅も増加
していることが分かる。CMP測定結果により5ns前後に
コンクリート岩盤境界面への浸透による反射波が確認で
きると推定されたことから、この差分振幅の増加は境界
面に塩水が浸透したことによる反射強度の増加を示して
いると考えられる。このことから塩水の主な浸透深度が
コンクリート岩盤境界面であると評価できた。また、7
分経過後にB孔に破過する前の5分経過後から差分振幅
が増加し始めていることは、この5分経過の時点で定点
測定位置直下に塩水が到達していたことを示している。
このことから、反射波形の変化により塩水の浸透速度を
捉えることができることが分かった。

(3) 検証試験結果

a) 差分プロファイルによる評価

各状態のプロファイル測定結果の内、AB測線及びBC
測線の塩水置換時の結果を図-8に示す。CMP測定結果か
ら推定したように岩盤とコンクリートの境界面は往復走
時で5ns付近に見られるはずであるが、直達波の影響が
強く、確認できない。また、亀裂からの反射も明瞭では
ない。そのため、注水状態を基準として、塩水置換状態
のプロファイルの差分を計算した。図-9に差分処理後の

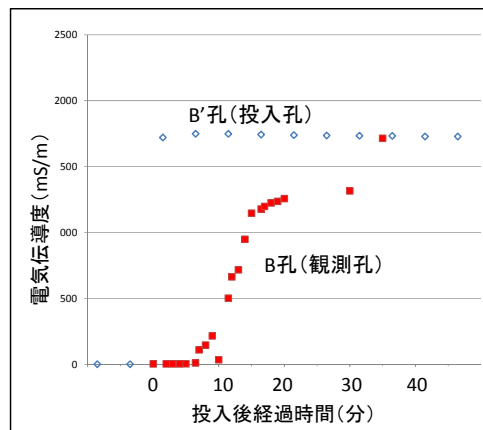


図-6 塩水投入後の電気伝導度経時変化

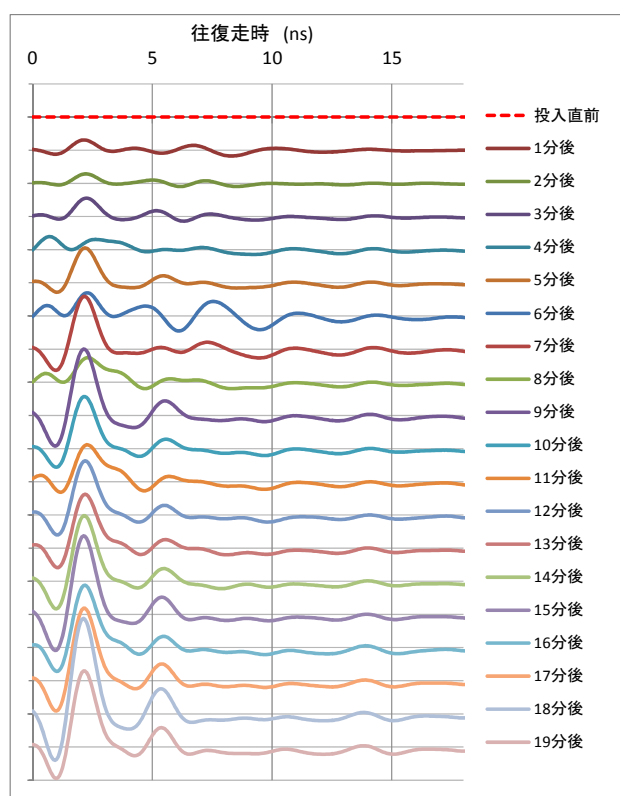
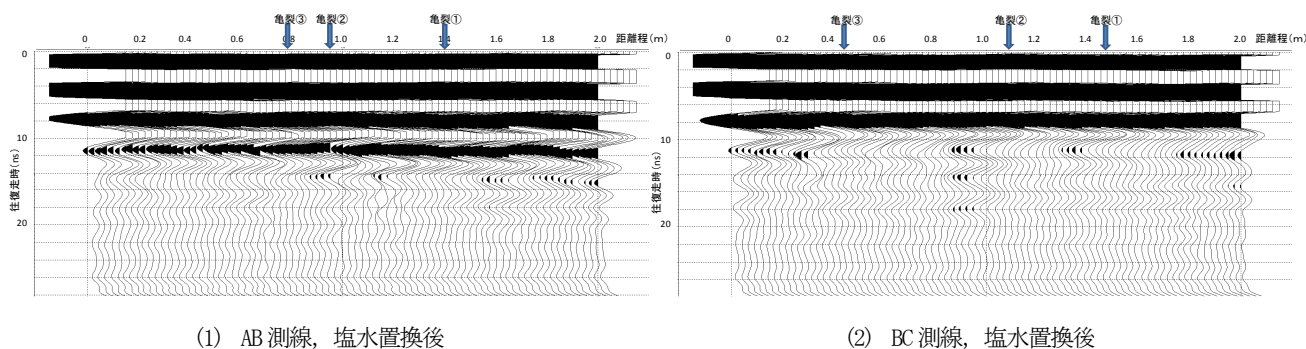


図-7 定点測定結果

(塩水投入直前の波形を基準波形とした差分振幅)



(1) AB 測線、塩水置換後

(2) BC 測線、塩水置換後

図-8 プロファイル測定結果

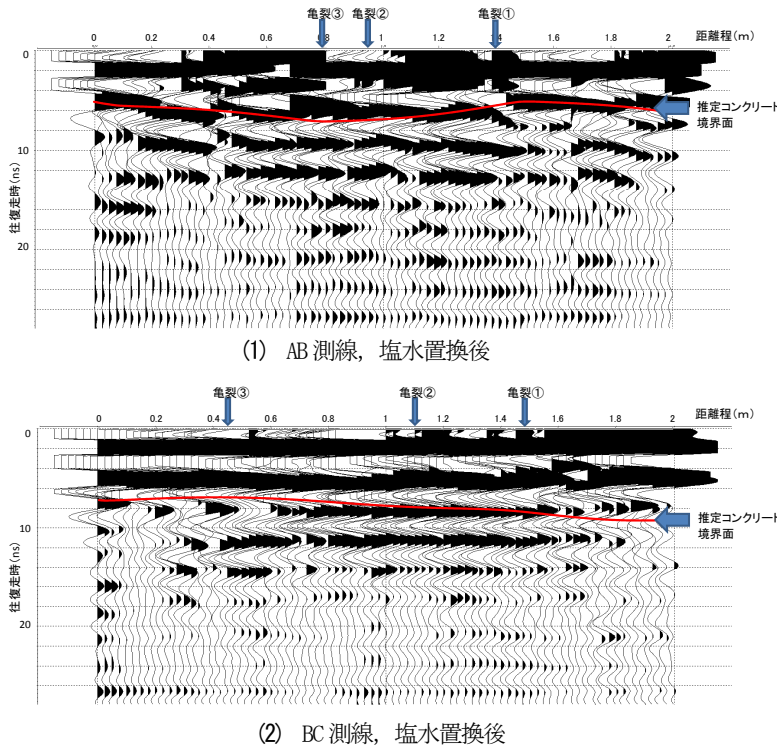


図-9 差分プロファイル計算結果

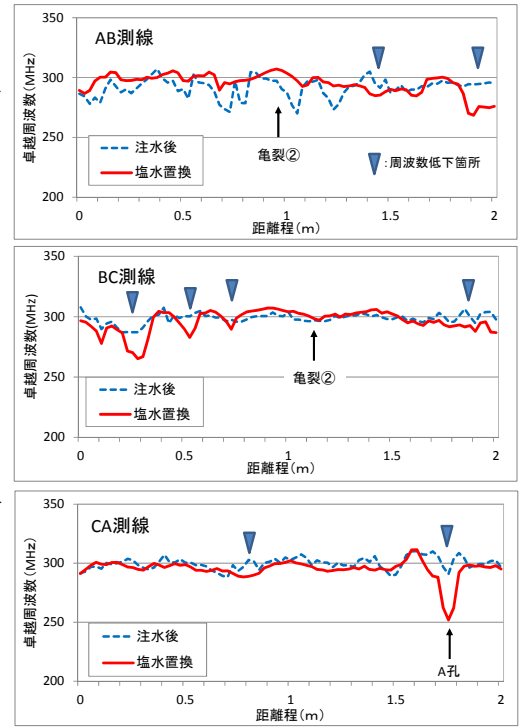


図-10 スペクトル解析結果

プロファイル結果を示す。この図から5~6ns付近に差分振幅の強い波形が見られ、これはコンクリート岩盤境界面と判断できた。差分により振幅に変化が見られたことは、注水した塩水が境界面に沿って流れたことを示す。一方、境界面以下の深度でも亀裂②~③に相当する距離程付近で反射波が見られる。これは投入した塩水が境界面や亀裂ネットワークを介して亀裂に浸透したことを捉えている可能性を示している。

b) スペクトル解析による評価

電磁波の反射波に関して、媒体1と媒体2間の反射係数 R は、媒体の導電率が低い場合、

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

ここで、 ε_1 、 ε_2 ：各々媒体1、媒体2の誘電率(F/m)

で近似される。一方、導電率が高くなると垂直入射反射係数 R は、

$$R = \frac{\mu_1 k z_1 - \mu_2 k z_2}{\mu_1 k z_1 + \mu_2 k z_2} \quad (2)$$

ここで、

$$k z_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \right)^2} + 1 \right)}$$

$$k z_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{\omega \varepsilon_2} \right)^2} + 1 \right)}$$

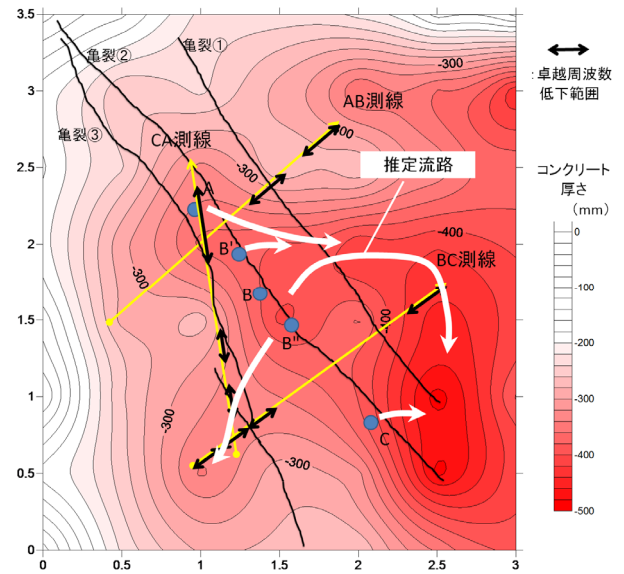


図-11 周波数低下範囲と推定流路

ω ：電磁波の角周波数

μ_1 、 μ_2 ：各々媒体1、媒体2の透磁率(H/m)

σ_1 、 σ_2 ：各々媒体1、媒体2の導電率(S/m)

で表され、導電率の差による反射の影響が無視できなくなる。例えば塩水を含む高導電率の媒体が反射面となる場合は、反射波の高周波数成分が低下することが示されている⁴⁾。このことから塩水が浸透した範囲の反射波は

高周波数帯域の減衰が大きくなることが予想されるので、スペクトル解析により卓越周波数が低下した範囲を把握し、塩水の浸透範囲を評価することを行った。

図-10に各測線の注水後と塩水置換後の波形に対し、4ns～20nsの範囲でスペクトル解析を実施し、反射波形毎に卓越周波数を求めた結果を示す。レーダの特性から各波形は300MHz付近の卓越周波数を示すが、塩水置換後に周波数が低下する範囲が認められた。A孔上では低下が顕著に見られたが、亀裂②の位置ではそれほど大きな低下は認められない。このことから、周波数の低下は亀裂面ではなくコンクリート境界面からの反射の影響と考えられる。測線沿いの低下範囲を平面的に示したのが図-11である。この図からコンクリートの厚い箇所、すなわち岩盤面の低い箇所が周波数低下域に対応しており、注水孔から投入された塩水が岩盤面の谷部を選択して塩水が浸透していると評価できる。

4. おわりに

空洞周辺の亀裂内の地下水調査として、覆工背面の岩盤内の地下水浸透状況を地中レーダを用いて評価する手法の適用性について検討を行った。検証試験として、亀裂のある花崗岩内に水道水や塩水を浸透させ、岩盤表面に30cm程度の厚さでコンクリートを打設した表面から800MHzのパルスレーダを用いて2.5cmピッチでプロファイル測定を行った。さらにCMP測定や塩水投入時の定

点測定を行った。この結果、地中レーダの反射波形の変化やスペクトル解析により亀裂やコンクリート背面への塩水の浸透速度や浸透経路を非破壊的に把握できる可能性を示せた。

差分プロファイルやスペクトル解析を用いる本手法により、地下水の飽和・不飽和の状態変化や電気伝導度の異なる液体のトレーサとしての浸透挙動のモニタリングを非破壊で行うことが可能と考えられる。このことを利用し、地下空洞周辺の不飽和領域の再冠水過程のモニタリング、トレーサ試験における2次元破過過程の計測、グラウト工事におけるグラウト材の浸透範囲のモニタリングへの適用を進めて行く予定である。

参考文献

- 1) 升元一彦, 栗原啓丞: 地中レーダによる亀裂性岩盤の地下水浸透状況調査について, 平成26年度応用地質研究発表会講演論文集, pp.57-58, 2013.
- 2) 升元一彦, 栗原啓丞: 模擬亀裂を用いた地中レーダによる亀裂性岩盤の地下水浸透状況調査に関する検討, 応用地質, Vol.55, No.1, pp.17-27, 2014.
- 3) 佐藤源之, 宇野亨, 金楨浩: 電磁波による地下計測技術, 東北大学工学研究科, 東北大学東北アジア研究センター, 2001.
- 4) Onishi, K., Rokugawa, S. and Katoh, T.: Estimation of saline regions using ground-penetrating radar, *Inter. Conf. on Ground Penetrating Radar*, 10, pp.509-512, 2004.

EVALUATION OF GROUNDWATER CONDITION IN FRACTURES AROUND ROCK CAVERN USING GROUND PENETRATING RADAR

Kazuhiko MASUMOTO and Keisuke KURIHARA

The groundwater condition in fractures around the rock cavern is important for groundwater management or for planning of effective measures for seepage. The GPR (Ground Penetrating Radar) method is unique technique to survey the water condition in fractures around the rock cavern, indirectly, and with no disturbance of original groundwater condition. The authors conducted the GPR survey on the floor concrete constructed on the granitic rock with fractures. The results of the survey showed that the difference of water condition behind the floor concrete caused the change of the reflection wave form and the intense of spectrum due to the results of spectrum analysis of reflection wave.