

高分解能連続波レーダーを利用した坑道近傍ゆるみ域の評価

Investigation of the Excavation Disturbed Zone using high-resolution ground penetrating radar with modulating frequency

須山泰宏*・阿部泰典**・戸井田克***

Yasuhiro SUYAMA, Yasunori ABE, Masaru TOIDA

An investigation technique for the Excavation Disturbed Zone of High Level radioactive Waste disposal tunnel was developed using high-resolution ground penetrating radar with modulating frequency and wide-angle measurement technique. For verification, the investigation technique was applied to a model test and an in-situ test. These tests can be summarized that the investigation technique could detect underground structures with less than 10cm resolution and could monitor movement of ground water level.

Key word: high level radioactive waste, geological disposal, excavation disturbed zone,
ground penetrating radar

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の最終処分施設建設地選定に際しては、安全評価に基づく検討が必要と考えられる。その過程で、「接近シナリオ」と「地下水シナリオ」の双方において長期的な安全性確保の検討を進めることが不可欠となる。特に、多重バリアシステムにより地下水シナリオにおける安全性を考えた場合、天然バリアと人工バリアを繋ぐゆるみ域 (Excavation Disturbed Zone) は、速い物質移動が生じ得る経路であり、また、ベントナイト緩衝材中の物質移動に対する境界条件を提供する領域として考えられている (PNC, 1995)。そのため、先ず、原位置調査においてゆるみ域の広がり・分布を把握することは、重要な課題として挙げられている。従来、非破壊でのゆるみ域の広がり・分布の探査は、屈折法地震探査、弾性波トモグラフィ、電気探査、および地中レーダー等様々なものが適用されてきたが精度や探査深度等において必ずしも十分ではなかった。そこで、今回高分解能を有する地中レーダーに着目し、連続波を用いることで堆積岩においても探査深度を確保し、ワイドアングル測定を併用することにより、ゆるみ域の広がり・分布を精度よく探査できる手法を開発した。本報では、開発した手法の概要および性能確認を目的に実施した検証実験結果について報告する。

2. 調査対象とすべきゆるみ域とその探査手法

地下深部の岩盤中に空洞を掘削すると、①掘削行為による岩盤への衝撃、②空間の形成に伴う応力の再配

* 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部

** 正会員 鹿島建設(株) 東京支店 土木部

*** 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部

分、③坑道等への湧水に伴う水圧変化および坑道から岩盤への大気への侵入による岩盤と地下水の化学的特性の変化が生じると言われている (JNC, 1999)。ゆるみ域とは、一般にこれらの関連する範囲を総称して呼称されているものである。ゆるみ域は、力学的観点から掘削損傷領域、応力再配分領域、水理学的観点から間隙水圧変化領域に区分される。掘削損傷領域は①の要因により亀裂が生じ岩盤の物性値が変化する領域、応力再配分領域は②の要因により状態 (岩盤応力及び間隙水圧) が変化する領域、または新しい亀裂が生じることなく物性値が変化する領域 (既に存在していた亀裂の開口)、そして間隙水圧変化領域は③の要因により坑道への湧水が原因で間隙水圧が低下する領域 (不飽和領域を含む) と言われている (Olson and Winberg, 1996; JNC, 1999)。

地下水シナリオにおいて安全性を示すためには、ゆるみ域で速い物質移動が生じる可能性があり、その水理特性がベントナイト緩衝材中の物質移動に対する境界条件となるため、事前に評価する必要がある。そのためゆるみ域の中でも、特に透水性に影響が大きく、かつ、原位置調査においてしか評価できない「掘削損傷領域」を先ず調査することが重要である。掘削損傷領域は、結晶質岩においては亀裂が密集する領域であり、堆積岩では間隙率が大きくなる領域と考えられ、それぞれ不飽和領域に属することが想定される。そのため、ゆるみ域の探手法には、精度良く亀裂の発達した領域や不飽和領域を探索できることが望まれる。地中レーダーは、亀裂の探索が可能で、他の手法よりも高分解能であり、かつ水分量に感度を有する手法であるため、今回ゆるみ域の探手法として選定した。

地中レーダーの開発目標として、分解能はニアフィールド近傍でも天然バリア機能を期待できる範囲 (例えば、 10^{-3} m/s で 1m、須山他,2002) と機器製作側の技術レベルを考慮し 10cm と設定した。また、最大探索深度は減衰の著しい泥岩等においてもゆるみ域 (以下、掘削損傷領域のことを指す) を探索できるように 2m とした (例えば、新第三紀中新世の堆積岩を有する東濃鉱山ではゆるみ域は 1m 程度、杉原他, 1998)。

3. 開発した地中レーダーを用いたゆるみ域探手法の概要

地中レーダーとは、地表の送信アンテナから岩盤内に電磁波を送信し、地層境界面などでの反射波を地表の受信アンテナで受信し、送信から受信までの伝播時間や反射波の状況の評価することにより、地下の構造を解明するものである。地中レーダーは、岩盤の電気的性質、特に誘電率の不均質性を利用した探手法であり、岩種、亀裂および水分量の違いを探索することができる (物理探査学会, 2000)。

地中レーダーの性能は、分解能と最大探索深度の 2 種類によって特徴づけられる。分解能は波長により決定され、最大探索深度は減衰に影響を与える岩盤の電気的特性や周波数により決定される。波長を短く (周波数を高く) すれば分解能は向上するが、減衰が大きくなり最大探索深度は浅くなる。

本探手法では、分解能を維持したまま探索深度を向上させるために、連続波レーダーを採用することとした。連続波レーダーとは、パルス波レーダーとは異なり、周波数を変化させながら連続して電磁波を発受信し、信号処理でパルス波に変換し評価する手法である。特長としては、①信号処理により多数の電磁波を足し合わせることが可能なため、従来のパルス波レーダーより入力信号を大きくできる、②変化させた各周波数帯域ごとに波形を受信するため、受信時のノイズを低減できるため S/N (シグナル/ノイズ) 比を向上させることができることである。さらに、本調査手法では、測定方法において、通常のプロファイル測定に加えワイドアングル測定を併用して正確な比誘電率分布を算出し、計測結果の向上を図ることとした。プロファイル測定とは、図 3.1 に示すように発信アンテナと受信アンテナを一定間隔で移動させながら

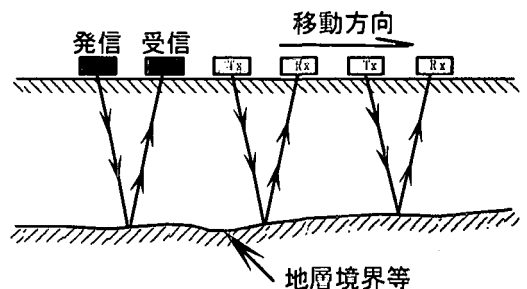


図3.1 プロファイル測定

測定するものであり、図 3.2 に示すように反射波を並べた断面を表示することにより地下の構造を推定する手法である。この場合、深度方向における出力が伝播時間（往復走時）となるため、正確な岩盤の電磁波速度を知らないと、正確な深度を求めることができないことになる。ワイドアングル測定は、この欠点を補う手法であり、図 3.3 に示すように共通反射面を通る中心を決定し、そこからそれぞれ等間隔に発信アンテナと受信アンテナを置き、順次間隔を広げながら測定していく。そして、直角三角形の各辺の長さの関係を示す式(1)を用いて、対象岩盤の電磁波速度および境界面の深度を求めることができるものである。具体的には、測定精度向上の観点から、図 3.4 に示すように複数のレーダー間隔と往復走時の関係をプロットし、それぞれの 2 乗の傾きから電磁波速度および境界面の深度を算定する方法で実施する。そのため、開発した地中レーダーでは、発信アンテナと受信アンテナを分離している。

$$(2D \text{ (深度)})^2 + X \text{ (測定間隔)}^2 = \{V \text{ (電磁波速度)} \times T \text{ (時間)}\}^2 \dots\dots\dots(1)$$
 連続波レーダーの周波数帯は、分解能 10cm を目標に設定した。分解能は波長の半分が目安とされており、波長と周波数は、 λ (波長) = V (電磁波速度) / f (周波数) の関係にある。よって、例えば比誘電率約 9 の岩盤（湿潤した砂岩等、電磁波速度 0.1m/ns）を対象とすると、周波数は上記の関係から $0.1\text{m/ns} \div (10\text{cm} \times 2 \text{ 倍}) = 500\text{MHz}$ となるため、最大を 500MHz とし、50~500MHz の帯域とした。

4. 模擬地盤と原位置における検証実験

4. 1 模擬地盤における検証実験

(1) 検証実験概要

本探査手法の性能を確認することを目的に、構造が既知の模擬地盤を探査対象とした検証実験を実施した。模擬地盤は、図 4.1 に示すように 4m (長さ) × 2m (幅) × 1m (高さ) の木製土槽枠の中に、深い位置から順にコンクリート底盤 (10cm)、一定条件で締固めた山砂 (75cm)、木製の角材 (10cm) を設置したものである。また岩盤中の地下水面探査の観点から、模擬地盤側面に水タンクを設け、地盤内の地下水面 (飽和・不飽和領域の境界) を任意に設定できるようにした。上記に示した各構造境界面がレーダー探査時の反射面になると考えられる。地下水面の位置は、模擬地盤周囲に設けたスタンドパイプと模擬地盤内に設置した水位観測孔で確認できるようにした。

検証実験は、地下水面を表面から -65cm に設定した状態でプロファイル測定 (アンテナ間隔 (以下、オフセットと呼ぶ) 40cm、計測ピッチ 10cm) とワイドアングル測定 (オフセット 40cm→270cm、計測ピッチ 10cm)

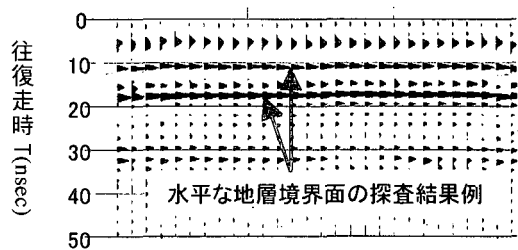


図3.2 調査結果イメージ (プロファイル測定)

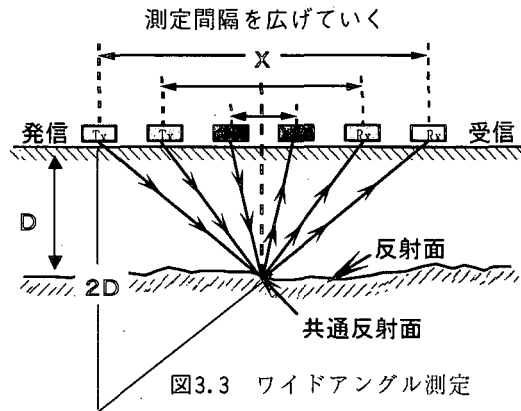


図3.3 ワイドアングル測定

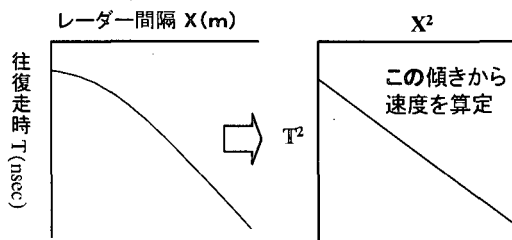


図3.4 電磁波速度の算定方法

を実施した。また、地下水面を-65cm→-38cm に変化させ、地下水面変動のモニタリング測定（オフセット 80cm、定点測定）も併せて実施した。これらの試験での具体的な検証項目は、①10cmの分解能を維持した状態で連続した構造境界面の把握、②構造境界面までの速度の推定と精度 10cm 以内で各構造境界面深度の推定、および③地下水面変動のモニタリングである。

(2)実験結果および評価結果

図 4.2、4.3 にプロファイル測定結果およびワイドアングル測定結果を示す。横軸はそれぞれ測定点の位置およびオフセット距離を示しており、縦軸はいずれも往復走時（反射波が戻ってくるまでの時間）を示している。これらの解釈においては、プロファイル波形とワイドアングル波形のそれぞれで連続する反射面に着目し、構造境界面を表す反射面を抽出した。図 4.2 より、事前に構造境界面（最小構造境界厚 10cm）であると想定された各構造境界の反射面を読み取ることができた。このことから、プロファイル測定結果から分解能 10cm 程度で岩盤中の構造境界面を検出できるということが分かる。

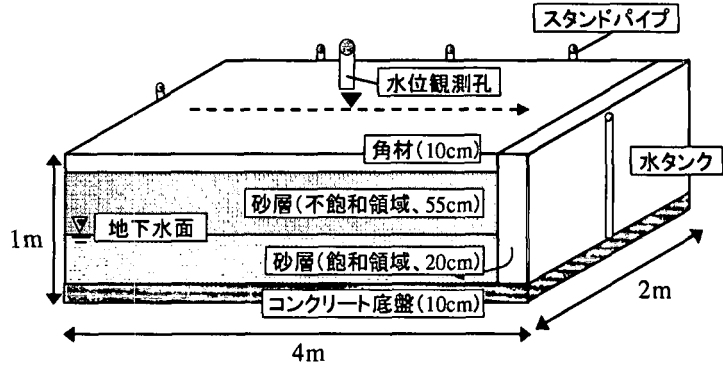


図4.1 模擬地盤の概要

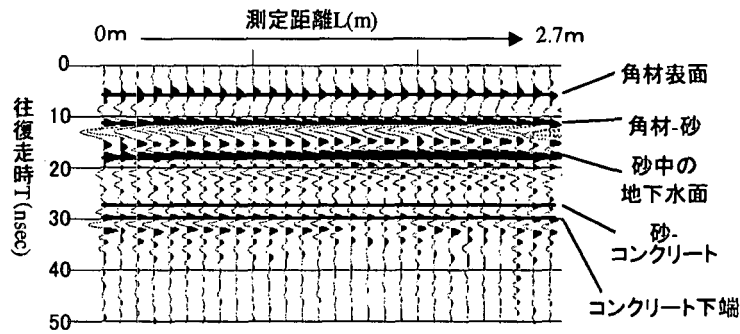


図4.2 プロファイル測定結果

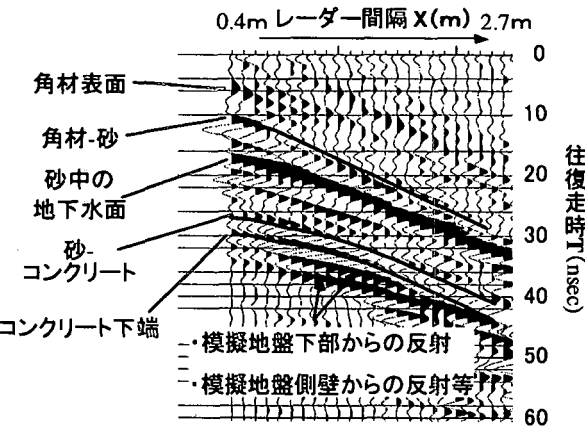


図4.3 ワイドアングル測定結果

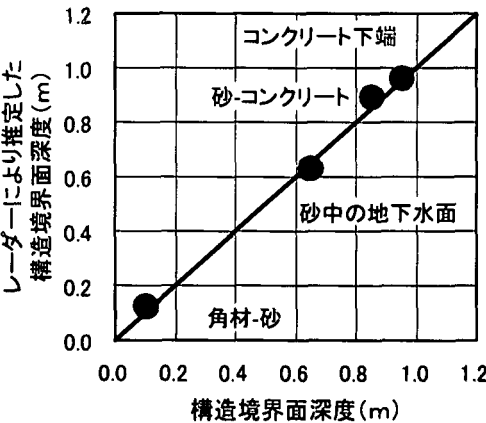


図4.4 レーダにより推定した構造境界面深度

次に、図 4.3 のワイドアングル測定結果から構造境界面までの速度を算定し、深度を推定した。深度の推定は、図 3.4 に示した手順で実施している。図 4.4 に、レーダーにより推定した各構造境界面深度を示す。同図より、実際の深度を誤差 4cm 以内で推定できていることが分かる。

図 4.5 に水位変化のモニタリング結果を示す。横軸は測定トレース（この場合は時間変化、約 2 時間程度）、縦軸は往復走時を示している。同図より、初期の地下水位-65cm の時に往復走時が 19.5nsec であったのに対し、地下水位 が-38cm まで上昇した最終時には、往復走時 17nsec 程度まで小さくなっており、地下水面の変化を捉えられたことが分かる。

4. 2 原位置検証実験

4.1 で示した模擬地盤を用いた検証実験により、1m 以浅で 10cm の分解能を維持した状態で連続した構造境界面の把握、および精度 10cm 以内で各構造境界面深度の推定が可能であることを確認した。原位置検証実験では、本探査手法の 1m 以深での性能を確認するため、主にワイドアングル測定により、1m 以深での物性値の変化を探査可能かという観点で実施した。

(1) 原位置検証実験の概要

原位置検証実験は、図 4.6 に示すように 1m 程度 (0.8~1.2m) 掘削し、基盤である堆積岩を確認した上で、砂を埋め戻したサイトにて 3ヶ所ワイドアングル測定を実施し、堆積岩基盤面の深度の探査を実施した。また、1m 以深でのワイドアングル測定における岩盤の物性値（電磁波速度）の探査性能確認のため、ワイドアングル測定の共通反射面近傍にボーリング孔を削孔し堆積岩中に水を注水し、その注水前後で測定を行い、電磁波速度の変化の測定が可能か確認を行った。

(2) 原位置検証実験結果

図 4.7 にワイドアングル測定による堆積岩基盤面深度の推定結果（3ヶ所）を示す。同図に示すように、1ヶ所、誤差が大きくなっているが、基本的には 5cm 以内で堆積岩基盤面深度を推定することができた。1ヶ所において誤差が大きな理由は、ワイドアングル測定の測線上の堆積岩基盤面が凹状態であったためと考えられる。また、図 4.8 には、注水前後においてワイドアングル測定により推定した電磁波速度を示す。一般に岩盤等に注水すると空隙が地下水で満たされるため比誘電率が増加し、電磁波速度が低下する。同図より、1m 以深においてもこの状況を計測できることを確認できた。このことは、1m 以深においても本探査手法を用いて構造境界面の深度の探査に適用できることを意味していると考えられる。

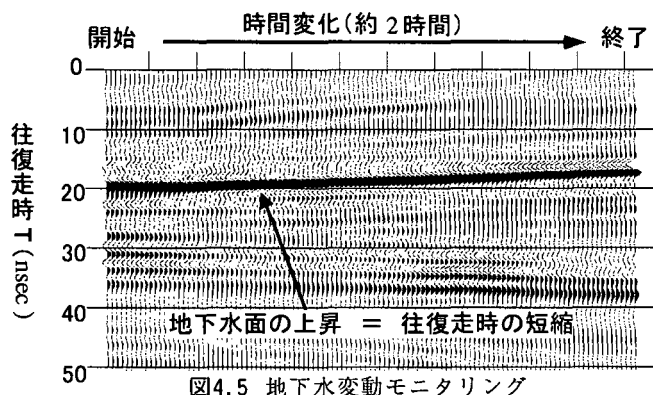


図4.5 地下水変動モニタリング

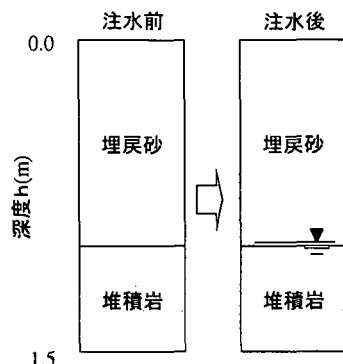


図4.6 原位置検証実験対象サイト
(注水前および注水後)

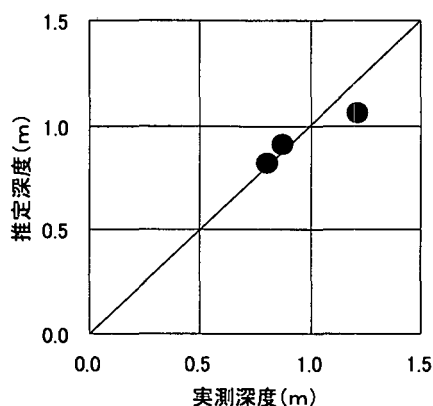


図4.7 堆積岩基盤面深度の推定結果

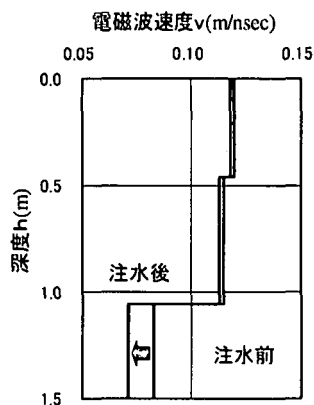


図4.8 電磁波速度の推定結果
(注水前および注水後)

6. まとめ

今回高分解能を有する地中レーダーに着目し、連続波を用いることで堆積岩においても探査深度を確保し、ワイドアングル測定を併用することにより、ゆるみ域の広がり・分布を精度よく探査できる手法を開発した。そして、本探査手法の模擬地盤と原位置における検証実験を実施し、性能確認を行った。その結果、本探査手法は、①10cmの分解能を維持した状態で連続した構造境界面の把握、②精度 10cm 以内で各構造境界面深度の推定、および③地下水面変動のモニタリングが可能であることを確認できた。しかし、本手法は物理探査手法であるため、解釈方法にはまだ課題が残されている。今後、本手法の適用を増やし、波形の処理方法 (S/N 比) の向上と、結果の評価方法の向上を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 物理探査学会 (2000) : 物理探査適用の手引き (とくに土木分野への利用)
- 動力炉・核燃料開発事業団 (1995) : "Putting HLW Performance Assessment Results in Perspective" (Nagra Bulletin No.25), 高レベル放射性廃棄物処分に関する性能評価結果の比較 (全訳), PNC TN1510 95-004.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999) : 釜石原位置試験総括報告書, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TN7410 99-001.
- Olson and Winberg (1996) : Current understanding of extent and properties of the excavation disturbed zone and its dependence of excavation method, EDZ workshop, International conference on deep geological disposal of radioactive waste, 101-112.
- 杉原弘造・亀村勝美・二宮康郎 : 堆積軟岩での発破による掘削影響の現場計測に基づく検討, 土木学会論文集, No.589/Ⅲ-42, 239-251.
- 須山泰宏・戸井田克・升元一彦・高瀬博康 : 地質構造・水理地質構造推定における不確実性評価の試み, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集.