

## モンテリ FE 試験におけるオパリナス粘土岩内含水量モニタリング用 TDR プローブの開発

Nagra 正会員 ◯榎 利博, Tobias Vogt, Herwig Müller  
Solexperts 非会員 Holger Wörsching, Miroslav Vrzba

### 1. 目的

Nagra ではスイス北西部に位置するモンテリ地下研究所において図1に示す Full Emplacement (FE) 試験を実施している。同試験は、スイスの高レベル放射性廃棄物および使用済燃料処分施設の母岩となるオパリナス粘土岩および人工バリアにおける熱-水-力学挙動の実規模での把握および施工技術等の実証を目的としている。廃棄体を模擬した3体のヒーターの始動後10年以上の期間における挙動のモニタリングを予定しており、そのために数百もの様々な計測機器を設置している。本論では、そのうち岩盤内の含水量モニタリングのために開発した Time Domain Reflectometry (TDR) プローブについて述べる。

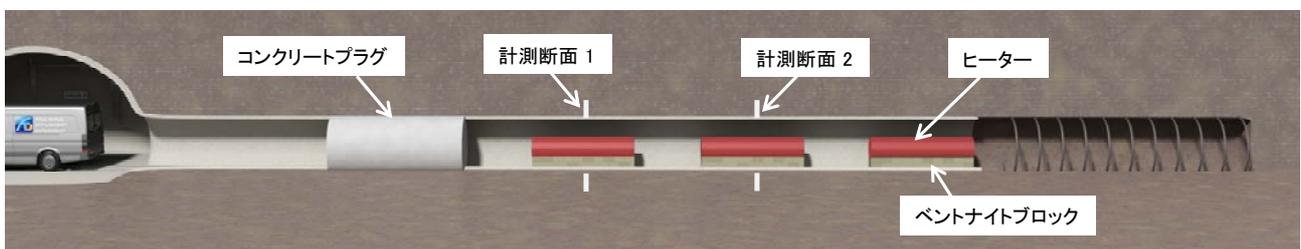


図1 FE 試験概要. 坑道全長 45 m, 直径 3 m, ベントナイトブロック上に3体のヒーターを設置し粒度などを管理したベントナイトで埋戻し後にコンクリートプラグを設置

### 2. 試験対象岩盤

オパリナス粘土岩は約1億7500万年前に堆積した層でFE試験の実施地点では、粘土含有量60-70%、空隙率は17%程度である。水分を含むと膨潤し掘削に伴って発生した亀裂などは自己修復する特性を持ち合わせるとともに透水性が非常に低い ( $\sim 10^{-13}$  m/s)。そのため、原位置における間隙水は堆積当時の海水がそのままに近い状態で封印されている。

### 3. 含水量測定手法の選定

FE試験は前述のとおり10年以上の長期モニタリングを計画している。含水量測定は予備解析結果をうけて坑道から約1.1 mまでの範囲を対象とした。ヒーターの始動後には坑道壁面付近での岩盤温度は80°Cまで上昇することを想定した。また計測機器のケーブル類は壁面に沿って配線するため、センサー本体およびケーブルには長期間に渡って止水性や耐熱性が要求される。最近では土壌水分を計測するための誘電センサーが多数開発されているが、そのほとんどはセンサー本体になんらかの電子回路を含むもので、前述のような厳しい環境下での使用に対しての耐用性については全く不明である。一方TDR法では、センサー部は2~3本の金属電極および同軸ケーブルからなる非常にシンプルな構造でありTDR本体からの電磁波パルスを計測対象物質内を伝播させるためのガイドとしての機能を果たすのみである。そのため長期モニタリングに最も耐用性があると考えられ、ヒーターを含む断面(図1中の断面1および2)における岩盤内含水量測定にはTDR法を採用することとした。

### 4. TDR プローブの設計

図2にFE試験で開発・設置したTDRプローブを示す。全長約1.2 m、直径99 mmの円柱状のゾンデの4箇所毎に30 cm間隔で電極2本タイプのTDRプローブ、そして隣り合うプローブの中間地点の3箇所毎に温度センサーを組み込んだ様式である。電極は幅5 mmの銅の薄板を中心間隔5 cmでポリフッ化ビニリデン(PVDF)の表面に貼りつけ、これらを温度センサー部等と合わせて1本のゾンデを組み立てた。これを合計6本作成しFE坑道の2断面に各3本ずつ設置し、合計24箇所の含水量を計測できるようにした。



図2 FE試験で開発したTDRゾンデ. 各孔につき30 cm間隔で4計測点とした.

TDR法をオパリナス粘土岩に適用するためには次の課題がある. 1) 電極と岩盤の接地では隙間が発生しないようにしなければならない, 2) 粘土含有量が多く間隙水も塩分を含むため電磁波パルスの伝播時に減衰が大きい, 3) FE試験では計測断面からデータ取得システムまで最大でケーブル長が31 m程度とTDRとしては例外的に大きな距離となる. まず, TDR電極と岩盤の接地に関しては同FE試験でヒーターのない低温区間に設置した市販のゾンデ様式の水計にて適用経験のあるグラウト法(Sakaki et al., 2013)を採用した. 次にパルスの減衰の影響を低減させるために電極を厚さ0.5 mmのフッ素ポリマーフィルム(FEP)でコーティングした. 最後のケーブル長に関しては, 低損失同軸ケーブル(H-155)を採用し, 予備試験で31 mのケーブル長で飽和に近いオパリナス粘土にてデータが取得できることを確認した.

### 5. 設置および初期データ

坑道の各計測断面においては層理に平行, 直角および鉛直上向きの3方向(逆Y字型)になるよう配置し, 直径101 mm, 深度約1.2 mのボーリング孔を6孔掘削した(BFEB017~022). 孔底は平らになるように仕上げた. 各計測孔において吹付コンクリート厚や岩盤の状況が若干異なるため, 孔内の状態を確認した上で最終的な設置深度を決定した. その結果, 6孔中5孔で最も坑壁に近いプローブは吹付コンクリート内に位置することとなった. ゾンデを孔内の所定の深度まで挿入して仮固定した後にグラウト(セメント, オパリナス粘土粉末, 水)を充填した. グラウトがゾンデ周辺にできるだけ均一に分布するようにゾンデ表面のFEPコーティングがない部分の表面には厚さ1 mmの突起状のスペーサが多数配置されている. グラウト注入時にはゾンデを若干ねじりながら, 最終的には図3に示すように孔口においてゾンデの全周から十分なグラウトのリターンを確認し空気が出なくなった時点で終了した. グラウトの前後でTDR波形データを記録し, 全てのプローブにおいてほぼ同様かつスムーズな出力変化が見られていることで局所的な空気の残留などの影響もないことを確認した. 現在はグラウトの固化を確認し, データを継続して取得している.



図3 グラウトリターンの確認状況

### 6. まとめ

モンテリ地下試験場にて実施中の実スケール実証試験であるFE試験において, オパリナス粘土岩中の含水量の長期モニタリングのためTDRゾンデを開発・設置した. グラウト方式により電極部と岩盤の接地を確保した. 電極をフィルムでコーティングして高導電性岩盤内でのパルスの減衰を低減させ, 低損失同軸ケーブルを用いることで31 mというTDR法としては極めて大きなケーブル長を実現した. 全てのプローブで現在はデータを取得中で, 併行してキャリブレーションを実施中である. 2014年末までにヒーターを始動させる予定であるので, その後の経時変化などについては追って報告していく予定である.

キーワード 高レベル放射性廃棄物, オパリナス粘土岩, FE試験, 岩盤内含水量, TDR

連絡先 Nagra 〒5430 Hardstrasse 73 Wettingen, Switzerland, Phone: +41-56-437-1337

### 参考文献

・Sakaki, T., T. Vogt, M. Komatsu and H. R. Müller (2013), Monitoring water content in Opalinus Clay in the FE-experiment: Test application of a dielectric water content sensor, The 46th AGU annual Fall Meeting, San Francisco.