

# グリムゼル試験場における 熱一水一応力連成原位置試験の解析

操上広志<sup>1</sup>・千々松正和<sup>2</sup>・小林晃<sup>3</sup>・杉田裕<sup>4</sup>・大西有三<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 京都大学 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kurikami@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 ハザマ 技術・環境本部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学助教授 農学研究科地域環境科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

<sup>4</sup>正会員 核燃料サイクル開発機構 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

<sup>5</sup>正会員 PhD 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において処分場付近で生じると考えられる熱一水一応力連成現象を解明するために、スイスのグリムゼル試験場において実規模原位置試験(FEBEX原位置試験)が行われている。この試験は、スペインの処分方式に則って廃棄体を横置きとし、緩衝材にスペイン産のFEBEXベントナイトを用いている。本研究は、これまで釜石における熱負荷試験等で検証されてきた既往の熱一水一応力連成モデルをFEBEX原位置試験に適用し、処分方式や緩衝材、岩盤の違いによる解析結果への影響について考察した。特に不飽和領域における水分移動の物理的意味を考慮する上で、水分拡散係数を適切に同定することが非常に重要であることがわかった。

**Key Words :** FEBEX in situ test, high level radioactive waste, geological disposal, coupled analysis

## 1. はじめに

核燃料サイクルにおいて、再処理工場等から発生する高レベルの放射性廃液は、ガラス固化された後、金属のオーバーバックで覆われた廃棄体として、最終的に地下数百メートルの安定な岩盤中に地層処分される。岩盤と廃棄体間の隙間は、応力緩衝性や化学緩衝性、低透水性を有するベントナイト主体の緩衝材で充填される。このような多重バリアシステムと呼ばれる処分形態は、日本だけでなく、欧州のほとんどの地域で検討が進められているものである。埋め戻し後の廃棄体周辺では、廃棄体の発熱、緩衝材への地下水の浸潤および浸潤に伴う緩衝材の膨潤圧の発生、岩盤内の地下水流動、地圧の作用という複数の現象が相互に作用し合って生じることが予想され、そのような熱一水一応力連成現象の解明は地層処分における重要な課題の一つである<sup>1)</sup>。

このような連成現象の解明のために、これまで各国で試験およびモデル化が行われてきた。例えば、原位置における連成試験は、諸外国では本論文で取り上げるFEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment) プロジェクト<sup>2)</sup>の他、スウェーデンのSTRIPAプロジェクトにおける

バッファマステスト<sup>3)</sup>、ベルギーのモル試験場でのBACCHUS試験<sup>4)</sup>、カナダのURLでのバッファ/コンテナ試験<sup>5)</sup>等が実施されており、また、国内では釜石原位置試験場において粘土充填・熱負荷試験<sup>6)</sup>が行われている。これらの試験のうち、釜石における試験およびFEBEX試験は比較的最近実施されたものであり、計測技術や解析モデルの発展と共に豊富な観測データが得られているため、連成モデルの開発・検証を目的とした国際共同研究プロジェクトDECOVALEX (International co-operative project for the Development of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation)<sup>7,8)</sup>の中で取り上げられ、目下解析的研究が進められている。DECOVALEXは現在フェーズIIIが行われており、この中のタスクとしてFEBEX原位置試験の評価に対する研究が行われている。一方、釜石における試験はフェーズIIにおいて評価が行われており、文献<sup>6,9)</sup>に詳細がまとめられている。

釜石での試験は廃棄体縦置き方式で原位置締め固めにより設置され、緩衝材は日本産のクニゲルOTが用いられているのに対し、FEBEX原位置試験は廃棄体横置き方式で工場において締め固められた緩衝材ブロックを原位置

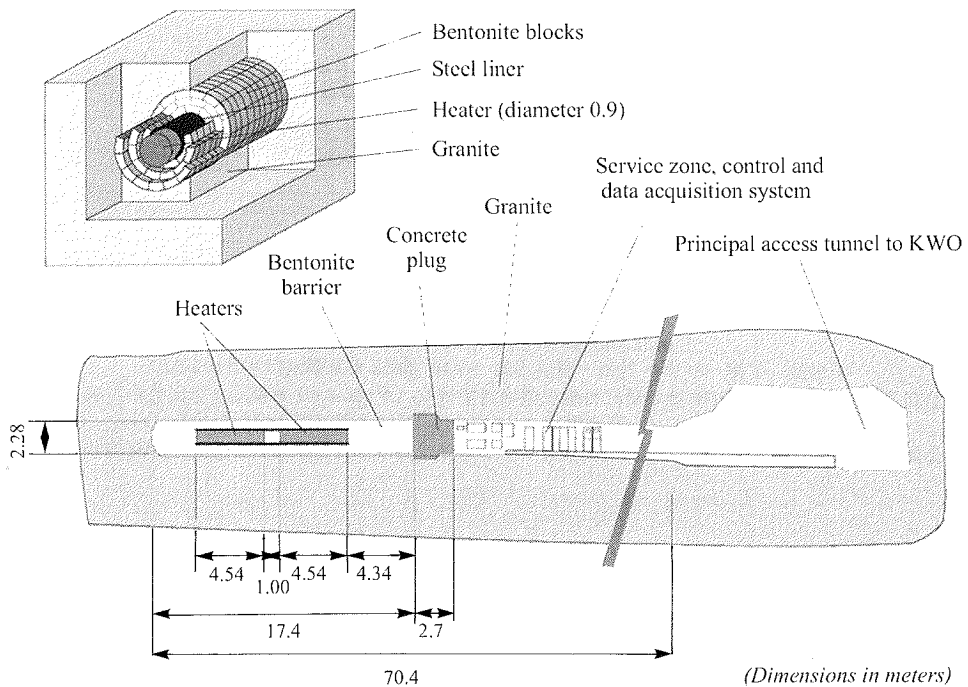


図-1 FEBEX原位置試験の概要図<sup>2)</sup>

で組み立てるブロック方式が採用され、緩衝材はスペイン産のFEBEXベントナイトが使用されている。このように処分方式や緩衝材が異なる場合にも有効な連成解析モデルの構築は不可欠であるため、本論文は、釜石での評価のために日本で開発されてきた連成解析モデルをFEBEX原位置試験に適用し、モデルのさらなる検証および原位置試験の解析に対する新たな知見を得ることを目的としている。本研究はDECOVALEXの一環として行われているものである。ただし、各国のモデル化との比較はこのプロジェクトの中で進行中であり、詳細は今後まとめられる予定である。FEBEXプロジェクトは、スペイン放射性廃棄物管理会社(ENRESA)およびスイス放射性廃棄物処分共同組合(NAGRA)のもと3カ国(スペイン、フランス、ドイツ)、7機関により実施されているプロジェクトである。

## 2. FEBEX原位置試験の概要

### (1) グリムゼル試験場およびFEBEX坑道の概要<sup>1)</sup>

FEBEX原位置試験が行われているグリムゼル試験場はスイスのアルプス山脈の海拔1,725mに位置し、NAGRAによって管理されている。試験場は複数の試験用の坑道と地下水力発電所へのメインアクセス坑道に連

結する坑道から成る。試験場はメインアクセス坑道の入り口から1.02kmの地点から始まり、地表面からの深度は約400mである。FEBEX坑道の入り口は、TBM等重量の大きい設備の搬入が容易になるよう、メインアクセストンネルに近い場所に配置されている。FEBEX坑道の直径は平均2.28m、長さは70.4mであり、自然排水のため1%の上り勾配となっている。連成試験のための領域は坑道のうち、奥から17.4mまでである。

図-1はFEBEX原位置試験の概要図<sup>2)</sup>であり、廃棄体を模したヒーター、ベントナイト緩衝材ブロック、コンクリートプラグ等の位置関係を示す。試験構造緒言はスペインの結晶質岩における処分形態に則って実施されている。すなわち、キャニスターを坑道内に水平に定置し、キャニスターの周囲に緩衝材として高密度に圧縮されたベントナイトブロックで埋め戻す。ENRESAの示している本試験の目的<sup>2)</sup>は、(1)人工バリアシステムの実現性のデモンストレーション、(2)ニア・フィールド(処分場近傍)における熱-水-応力連成現象の研究、(3)ニア・フィールドにおける熱-水-地球化学連成現象の研究である。試験においてヒーターは2本設置されており、鋼製のライナーで支持されている。ヒーターは実際のキャニスターと同サイズである。ヒーターの仕様は以下の通りである。

・材質：炭素鋼

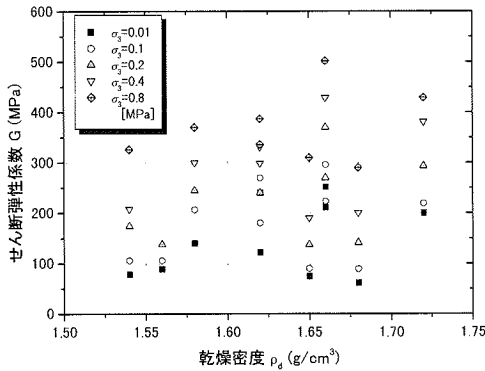


図-2 室内試験によるせん断弾性係数(乾燥密度に対してプロット)

- ・外径：0.90m
- ・長さ：4.54m
- ・重量：11ton

緩衝材としては高密度に圧縮されたベントナイトが用いられている。ベントナイトブロックは平均含水比14.4%、平均乾燥密度 $1.70\text{g/cm}^3$ で製作されている。本仕様の下では、ブロック間の隙間充填後の緩衝材全体の乾燥密度は $1.60\text{g/cm}^3$ となる。

試験は緩衝材の最高温度が $100^\circ\text{C}$ となるように制御され実施されている。人工バリア内および周辺岩盤内には計632個の計測機器により、応力、水圧、水分量、温度等が取得されている。

試験ゾーンはコンクリートでプラグされ、ベントナイトの膨潤圧に耐えるように設計されている。しかし、水圧やガス圧に対しては特に考慮した設計とはなっていない。コンクリートは無筋であり、2000tonの力に耐えるように設計されている。これはベントナイトの膨潤圧5MPaに対応している。

試験は下記の通りに実施されている。

- ・最初の20日間は1本のヒーターあたり1200Wの定出力で加熱を行う。
- ・その後の33日間は1本のヒーターあたりの出力を2000Wに上昇して加熱を行う。
- ・53日以降は温度固定( $100^\circ\text{C}$ )となるようにヒーターの出力を制御し試験を継続する。

## (2) FEBEXベントナイトの特性<sup>2)</sup>

ENRESAの下、エネルギー環境技術中央研究所(CIEMAT)およびカタルーニャ工科大学(UPC-DIT)において、FEBEXの解析に資するためにベントナイトの物理特性の取得を行っている。ENRESAでは主として2種類のベントナイトに関してその基本特性を整理している。1つはベントナイトS-2と呼ばれるもので、これはFEBEXプロジェクトが始まる前に研究が進められていたベント

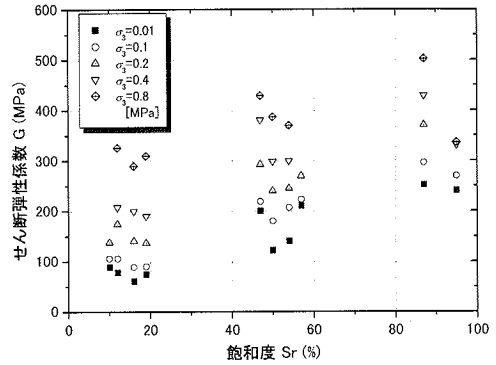


図-3 室内試験によるせん断弾性係数(飽和度に対してプロット)

ナイトである。その後、新たなベントナイトが選択され、これがFEBEXプロジェクトに使用されることとなった。このベントナイトはFEBEXベントナイトと呼ばれている。これら2種類のベントナイトは、同じサイトから採取されており、その物性値はおおよそ同じである。また透水試験は、蒸留水、地下水(granitic water)、塩水の3種類の水を用いて実施されている。ベントナイトS-2およびFEBEXベントナイトの物性試験は、プロジェクトに関わる多くの機関によって行われてきたが、ここでは、これらの物性値のうち、解析に用いるものについて述べる。

### a) 膨潤応力

蒸留水を用いたFEBEXベントナイトの膨潤応力が測定されている。膨潤応力は異なる乾燥密度の供試体について測定され、回帰曲線は以下のように与えられている。

$$P_{s\max} = \exp(6.77\rho_d - 9.07) \quad (1)$$

ここで、 $P_{s\max}$ は飽和時の膨潤応力[MPa]、 $\rho_d$ は乾燥密度 $[\text{g/cm}^3]$ である。

### b) せん断弾性係数

FEBEXベントナイトに対して、乾燥密度、飽和度および側圧を変えて10個の供試体を用いた試験を行い、せん断弾性係数が測定されている。試験結果を乾燥密度および飽和度に対してプロットしたものを図-2、図-3に示す。これらの試験結果では、せん断弾性係数は乾燥密度に対してはあまり依存せず、飽和度に対して線形的に増加する傾向が見られる。また、側圧によりせん断弾性係数が増加する傾向も確認することができる。

### c) 飽和透水係数

従来の透水試験から、FEBEXベントナイトの飽和透水係数 $k[\text{m/s}]$ が乾燥密度の関数として以下のように得られている。

表-1 異なる試験結果から同定された $n$ の比較<sup>2)</sup>

試験	$n$ の値
浸潤試験 (CIEMAT)	4.64
浸潤試験 (UPC-DIT)	3.50
熱-水連成試験 1	3.06
熱-水連成試験 2	1.10
熱-水連成試験 3	1.68

表-2 浸潤過程におけるVGパラメータ<sup>2)</sup>

パラメータ	低サクシオン領域	高サクシオン領域
$P_0$ [MPa]	30	35
$\lambda$	0.32	0.30
$S_{min}$	0.10	0.01
$S_{max}$	1.00	1.00
$P_s$ [MPa]	-	4000
$\lambda_s$	-	1.5

$$\log k = -6.00\rho_d - 4.09 \quad (2)$$

(乾燥密度1.30g/cm<sup>3</sup>から1.47g/cm<sup>3</sup>)

$$\log k = -2.96\rho_d - 8.57 \quad (2)'$$

(乾燥密度1.47g/cm<sup>3</sup>から1.84g/cm<sup>3</sup>)

間隙水の違い、圧縮方向に対する方向の違いの影響を調べるために条件を変えた試験が行われているが、塩水を用いた試験以外はほぼ同程度の透水係数が得られている。塩水を用いた試験では透水性がわずかに高くなる傾向が確認されている。

#### d) 比透水係数

FEDEXベントナイトの不飽和透水係数は、比透水係数と飽和透水係数の積として与えられ、比透水係数 $r_k$ は飽和度 $S_r$ を用いて、

$$r_k = S_r^n \quad (3)$$

で表現されると仮定されている。CIEMATおよびUPC-DITにおける浸潤試験、温度勾配下浸潤試験(後述)によって同定されたパラメータ $n$ を表-1<sup>2)</sup>に示す。パラメータ $n$ は各試験により、かなりのばらつきがあることがわかる。

#### e) 水分特性曲線

緩衝材は体積がほぼ一定の状態で膨潤が生じることから、定体積膨潤試験が行われている。CIEMATは、サクシオン制御の可能な圧密試験装置を用い、加圧により体積変化が生じないようにして試験を実施している。UPC-DITは、焼結フィルター製の容器に供試体を入れ、

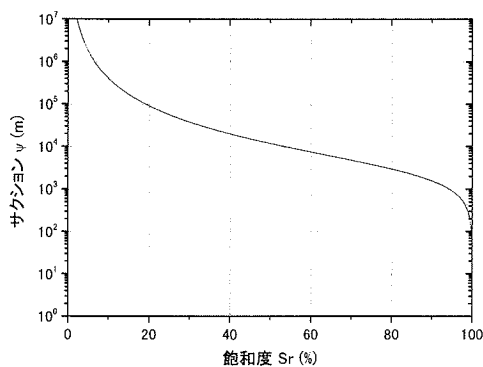


図-4 浸潤過程における水分特性曲線<sup>2)</sup>

体積変化が生じないようにして試験を実施した。どちらも蒸気圧法により試験を実施している。

水分特性曲線は次式で示すVan Genuchten(VG)式の係数を同定することにより求められている。

$$\frac{S_r - S_{rmin}}{S_{rmax} - S_{rmin}} = \left[ 1 + (s/P_0)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (4)$$

また、次式に示す修正VG式はサクシオンの値が大きい場合に有効とされている。

$$\frac{S_r - S_{rmin}}{S_{rmax} - S_{rmin}} = \left[ 1 + (s/P_0)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} [1 - s/P_s]^{\lambda_s} \quad (4)'$$

ここで、 $s$ はサクシオン[MPa]、 $S_{min}$ 、 $S_{max}$ は最小および最大飽和度、 $P_0$ 、 $P_s$ 、 $\lambda$ 、 $\lambda_s$ は材料パラメータである。図-4<sup>2)</sup>に浸潤過程において測定されたサクシオンと飽和度の関係から同定された水分特性を示す。VGパラメータは表-2<sup>2)</sup>のように得られている。

#### f) 比熱

比熱はベントナイトS-2に対してのみ測定されている。比熱容量は温度の関数として設定されており、45°Cから150°Cの間で次式により関数化されている。

$$C_s = 1.38T + 732.5 \quad (5)$$

ここで、 $C_s$ は固相の比熱容量[J/kgK]、 $T$ は温度[°C]である。緩衝材全体の比熱( $\rho C_m$ )は固相と液相の体積比率から次式のように設定する。

表-3 線膨張試験結果<sup>2)</sup>

供試体	初期乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 (%)	温度変化 (°C)	線膨張係数 (1/°C)
1	1.68	14.42	22.6 → 14.8	5 × 10 <sup>-5</sup>
2	1.68	14.42	16.6 → 41	8 × 10 <sup>-5</sup>
3	1.71	12.53	31 → 51	21 × 10 <sup>-5</sup>
4	1.71	12.53	51 → 41	6 × 10 <sup>-5</sup>

$$(\rho C)_m = (1 - \phi) \rho_s C_s + \phi S_r \rho_w C_w \quad (6)$$

ここで、 $C_w$ は水の比熱容量、 $\phi$ は間隙率、 $\rho_s$ は固相の密度、 $\rho_w$ は水の密度である。下付の $m$ は熱的な局所平衡状態を意味する。なお、FEBEXベントナイトの比熱に関しては測定されていないため、この計測値を解析に用いる。

### g) 熱伝導率

FEBEXベントナイトの熱伝導率 $\lambda_m$ は乾燥密度が1.6g/cm<sup>3</sup>あるいは1.7g/cm<sup>3</sup>の供試体に関していくつかの含水比状態において取得されている。測定された熱伝導率の回帰曲線は以下ようになる<sup>1)</sup>。

$$\lambda_m = 1.28 + \frac{0.57 - 1.28}{1 + \exp\left(\frac{S_r - 0.65}{0.10}\right)} \quad (7)$$

比熱および熱伝導率の飽和度依存性を図-5に示す。飽和度と共に上昇していることがわかる。

### h) 線膨張係数

直径38mm、高さ78mmの円筒形の圧縮ベントナイト供試体を防水し、温度14°Cから50°Cに制御した恒温水の中で暖め、その時のひずみ量から線膨張係数 $\alpha_s$ を求めている。表-3<sup>2)</sup>に試験結果を示す。線膨張係数の平均値は、 $1.0 \times 10^{-4}/°C$ となっている。

### i) 熱-水連成試験

温度勾配下の水分移動挙動を観測するために、UPC-DITにおいて円筒形(直径38mm、長さ76mm)の供試体を用いた熱-水連成試験が行われている。供試体の片端に一定の熱量が与えられ、反対の端面の温度が固定されている。供試体の周囲には5.5cmの厚さの断熱材が巻いてある。また、供試体への熱量の負荷を確実にするために、2つの供試体がヒーターを挟んで上下対称に設置されている。試験では2.6Wの一定熱量が負荷され、供試体の熱負荷側の温度は70~80°Cで一定となった。低温側は、循環水により30°Cに固定している。試験中は供試体の両端および供試体内部の3点で温度の経時変化が計測されている。試験終了後、供試体を6分割し、各部分の含水比が得られている。供試体の乾燥密度は1.68g/cm<sup>3</sup>で、含

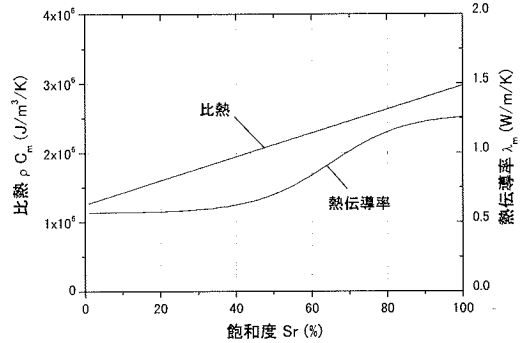


図-5 比熱・熱伝導率の飽和度依存性

水比は15.3, 16.9, 17.1%の3種類に対して試験が実施されている。温度は試験開始から約10時間後にはほぼ定常となっている。

## 3. 解析手法

### (1) 概要

これまで日本では、熱-水-応力連成現象を対象とした解析コードとして、THAMESが開発されてきた。THAMESは、Ohnishi et al.<sup>10)</sup>によって岩盤を対象とした連成解析コードとして構築され、その後、Chijimatsu et al.<sup>11)</sup>によって緩衝材の水分移動が表現できるように拡張されてきた。本コードは、釜石における粘土充填・熱負荷試験の解析に用いられた経緯があるが<sup>11)</sup>、緩衝材の種類等の試験条件が異なる場合にも、有意な評価が可能であるかどうかを検討しておく必要がある。

釜石での試験とFEBEX原位置試験の条件の中で最も大きな違いは、緩衝材の種類である。前者では、日本産のベントナイト・クニゲルOTが使用されていたのに対し、後者では、スペイン産のFEBEXベントナイトが使用されている。緩衝材の違いによる物理化学現象の本質的な違いはないが、各国の連成モデルの概念の違いから、緩衝材に対して行われる物性試験やその評価手法が異なっている。このような場合に、使用する連成モデルに対応する物性値を同定することが要求される。実際の処分には、緩衝材は様々なものが使用されると考えられるが、同じ条件で試験が行われるとは考えにくく、異

なる試験で得られた物性値を同じ基準で評価することは、緩衝材近傍の長期的な現象を予測する上でも重要である。本章では、釜石での試験で用いられた連成モデルを FEBEX 原位置試験に適用する過程を示す。

## (2) THAMES の支配方程式

### a) 運動量保存式

運動量保存式は、静的条件を仮定すると、以下の増分形の力のつりあい条件式となる。

$$\Delta\sigma_{ij,j} = 0 \quad (8)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{ij}$  は全応力テンソルの増分である。ただし、外力は一定と仮定している。弾性体を仮定すると、 $\Delta\sigma_{ij}$  は以下のように記述できる。

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{1}{2} C_{ijkl} (\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}) + S_r \Delta p \delta_{ij} - \Delta P_s \delta_{ij} - \beta \Delta T \delta_{ij} \quad (9)$$

ここで、 $C_{ijkl}$  は弾性係数テンソル、 $u_i$  は変位ベクトル、 $\beta$  は熱応力に関するパラメータ、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。膨潤応力  $P_s$  の項は膨潤性の材料のときに発生する。また、 $p$  は間隙水圧で、不飽和領域では負の値となる。本モデルの未知パラメータである全水頭  $h$  と間隙水圧  $p$  の関係は、

$$p = \rho_w g (h - z) \quad (10)$$

である。ただし、 $\rho_w$  は水の基準密度、 $g$  は重力加速度、 $z$  は鉛直上向きを正とする。

膨潤応力の増分  $\Delta P_s$  は、サクシヨンの増分  $\Delta s$  によって与えられる。

$$\Delta P_s = -F \Delta s \quad (11)$$

ここで、 $F$  は不飽和領域の膨潤応力を規定するパラメータである。

### b) 水の質量保存式

水の質量保存式は、以下のように記述される。

$$\frac{\partial \theta \rho_w}{\partial t} + q_{i,i} + Q = 0 \quad (12)$$

ここで、 $\theta$  は体積含水率 (=  $S_r \cdot \phi$ )、 $q_i$  は流束ベクトル、 $Q$  は

湧き出し項、 $t$  は時間である。流束ベクトルは、水分ポテンシャルが体積含水率および温度の関数とする Philip and de Vries<sup>12)</sup> の考え方にに基づき、以下のように表現される。

$$q_i = -\rho_w [(D_\theta)_{ij} \theta_{,j} + (D_T)_{ij} T_{,j}] \quad (13)$$

ただし、 $\rho_w$  は水の密度、 $(D_\theta)_{ij}$  は水分拡散係数テンソル、 $(D_T)_{ij}$  は温度勾配水分拡散係数テンソルである。

### c) エネルギー保存式

エネルギー保存式は、以下のように記述される。

$$\frac{\partial \{(\rho C)_m T\}}{\partial t} + q_i^h + Q^h = 0 \quad (14)$$

ここで、 $(\rho C)_m$  は材料の平均の比熱、 $q_i^h$  は熱流束ベクトル、 $Q^h$  は発熱である。熱流束は、以下のように表される。

$$q_i^h = v_i \rho_w C_w T - \lambda_m T_{,i} \quad (15)$$

ここで、 $v_i$  は液状水のダルシー流速ベクトルである。第1項は移流を、第2項は拡散を表す。ただし、間隙水の蒸発および凝結に伴う熱交換は考慮しない。

## (3) ベントナイトの物性値の取扱い

連成解析コード THAMES によって解析をする際に、上記の支配方程式に含まれるパラメータを同定する必要がある。

同定が必要なパラメータは、水分拡散係数  $D_\theta$ 、温度勾配水分拡散係数  $D_T$  および不飽和領域での膨潤応力に関するパラメータ  $F$  である。そのほか、せん断弾性係数は、CIEMAT によって行われている試験 (2Qb) から設定した。

### a) 不飽和水分拡散

不飽和領域での水分移動は、THAMES では式 (14) で与えられているが、一般的には、比透水係数を用いてダルシー則を不飽和領域に拡張した以下の式が使用されることが多い。

$$q_i = -r_k \frac{\rho_w \rho_w g K_{ij}}{\mu_w} h_{,j} \quad (16)$$

ここで、 $\mu_w$  は水の粘性係数である。

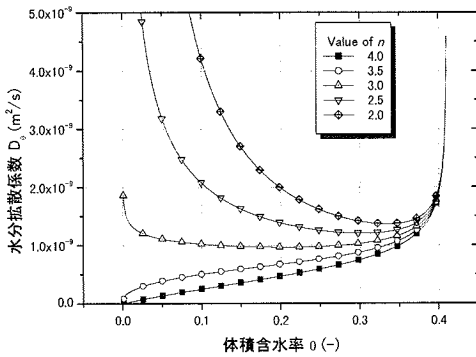


図-6 水分拡散係数とnの値の関係

FEBEXベントナイトに対しても、この式に基づき比透水係数 $r_k$ が同定されている。しかし、比透水係数は、2(2)d)に示されたように試験条件によってかなりばらつきがある。これは、ベントナイトのような非常に透水性の低い材料の中で、さらに温度勾配のある条件においては、水分移動が液状水としてだけでなく、蒸気として生じる割合も多く、そのような複雑な水分移動を式(16)ではうまく表現できていないことが原因と考えられる。

一方、THAMESの水分移動に関する支配方程式(13)において、水分拡散係数 $D_\theta$ は、体積含水率に対してプロットすると、U字型になるといわれている。これは、水分の少ない領域では蒸気としての水分移動が卓越し、一方、水分の多い領域では液状水としての水分移動が卓越するという物理的意味に基づいている<sup>13)</sup>。式(13)と式(16)より、等温状態を仮定したときの水分拡散係数は、以下のようになる。

$$(D_\theta)_{ij} = r_k \frac{\rho_{w0} g K_{ij}}{\mu_w} \frac{\partial s}{\partial \theta} \quad (17)$$

比透水係数 $r_k$ を与える式(3)中のパラメータ $n$ を変化させたときの水分拡散係数を図-6)に示す。 $n$ の値が大きいと水分の少ない領域で蒸気としての水分移動が強調され、逆に小さいと蒸気としての水分移動が表現できていない。この結果から、 $n=3.0$ を妥当な値と見なした。

一方、温度勾配水分拡散係数 $D_T$ は、2(2))で記した熱一水連成試験から同定した。図-7)に試験結果と、同定した $D_T$ を用いた解析結果を示す。このとき、 $D_T$ の値は以下のように決定された。

$$D_T = 2.0 \times 10^{-11} \text{ [m}^2\text{/sK]} \quad (18)$$

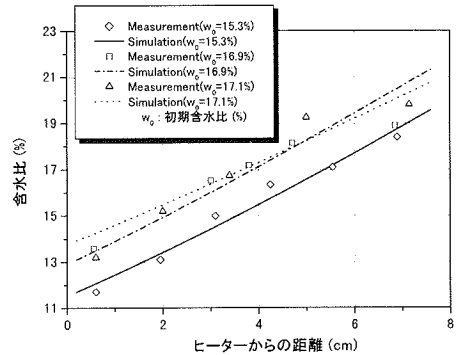


図-7 熱一水連成試験からの $D_T$ の同定

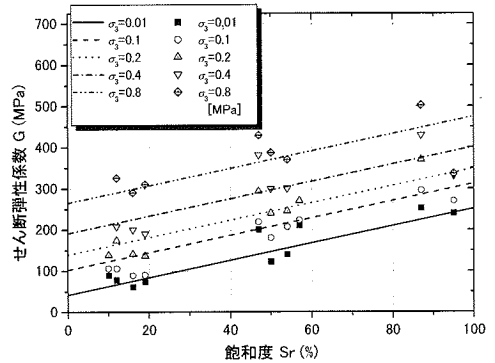


図-8 熱一水連成試験からの $D_T$ の同定

## b) 膨潤応力

不飽和領域における膨潤応力に関しては、同定するための室内試験が行われていないことから、原位置試験の結果に基づいて算定した。原位置試験では、膨潤応力の増分が飽和度の増分に比例する傾向が確認されたことから、式(11)を変形して、

$$\Delta P_s = -F \Delta s = -F \frac{\partial s}{\partial S_r} \Delta S_r = F' \Delta S_r \quad (19)$$

とし、 $F$ をフィッティングにより $2.1 \times 10^7$ (Pa)と決定した。

## c) 弾性係数テンソル

FEBEXベントナイトのせん断弾性係数については、2(2)b)に記述したように、乾燥密度、飽和度および側圧を変化させた試験が実施されている。せん断弾性係数は、乾燥密度に依存すると一般的に考えられているが、CIEMATによる試験では乾燥密度にはあまり依存しない結果となっている。一方、試験では飽和度および側圧に依存する結果が得られているため、これらを考慮してせん断弾性係数を以下の式で与えることとした。

表-4 緩衝材以外の物性値

	岩盤	コンクリート	ヒーター
単位体積重量 [kg/m <sup>3</sup> ]	2640	2300	7000
ヤング係数 [MPa]	3200	2500	剛体
ポアソン比 [-]	0.25	0.1667	
透水係数 [m/s]	1.0×10 <sup>-12</sup>	1.0×10 <sup>-12</sup>	不透水
VG パラメータ	$\theta_s$ [-]	1.6×10 <sup>2</sup>	
$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha \cdot s)^n]^m$ ただし、 $m = 1 - 1/n$	$\theta_r$ [-]	0	
	$\alpha$ [1/m]	8.0×10 <sup>-3</sup>	
	$n$ [-]	1.6	
比透水係数 [-]	Mualem モデル <sup>14)</sup> $S_e^{1/2} \left( 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right)^2$		
温度勾配水分拡散係数 [m <sup>2</sup> /s/K]	考慮しない		
熱伝導率 [W/m/K]	3.3	1.88	200
比熱容量 [kJ/kg/K]	0.92	0.75	0.4
線膨張係数 [1/K]	2.5×10 <sup>-5</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>	1.0×10 <sup>-5</sup>

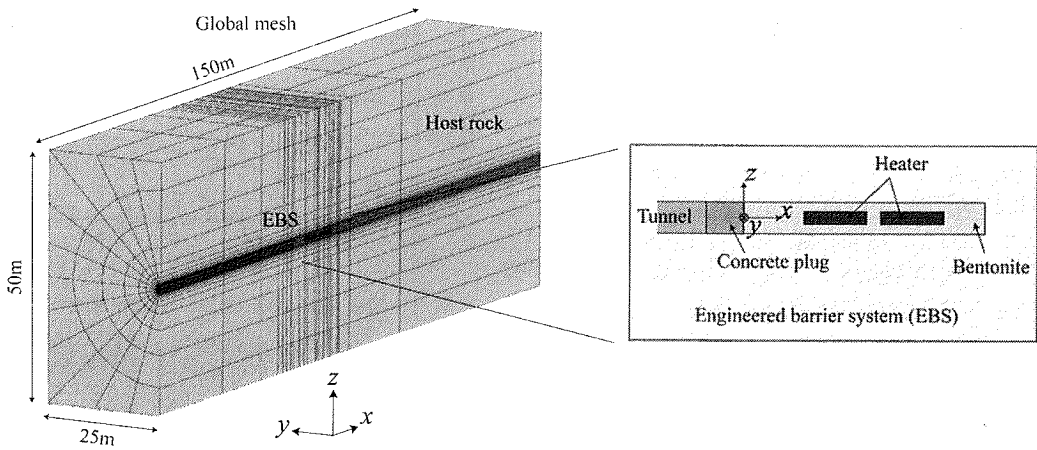


図-9 FEBEX原位置試験の解析メッシュ

$$G = a + b \cdot S_r + c \sqrt{\sigma_3} \quad (20)$$

ただし、それぞれの単位は、 $G$ [MPa]、 $S_r$ [%]、 $\sigma_3$ [MPa]である。係数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ は、最小二乗フィッティングにより、以下のように決定された。

$$\begin{aligned} a &= 13.28 \\ b &= 2.10 \\ c &= 281.3 \end{aligned} \quad (21)$$

同定された係数を与えたときの実験値との比較を図-8に示す。

一方、弾性係数テンソルを決定するためのもう一つのパラメータとして、文献<sup>1)</sup>を参考に、ポアソン比を0.25とした。

## 4. 解析条件および解析結果

### (1) 解析条件

FEBEX原位置試験のシミュレーションのための解析メッシュを図-9に示す。廃棄体を模擬したヒーターとそれを囲む緩衝材の人工バリアを中心に、影響範囲を考慮して岩盤部を処分坑道から十分遠くまでモデル化した。要素数は5760、2次要素で節点数は26401とした。岩盤を均質モデルとしたため、坑道を中心に左右対称と見なし、片側(y軸正の方向)のみを解析範囲とした。

解析の開始は人工バリア設置および坑道埋め戻し直後とし、周囲の境界で全水頭100m、坑道部分で圧力水頭0mを与えた定常解析を行った結果を初期条件とした。また、緩衝材には含水比14.4%に相当する圧力水頭-8381.5mを与えた。また、全領域で温度を10°Cとした。

境界条件は、 $y=0$ の面以外で、温度および全水頭を固



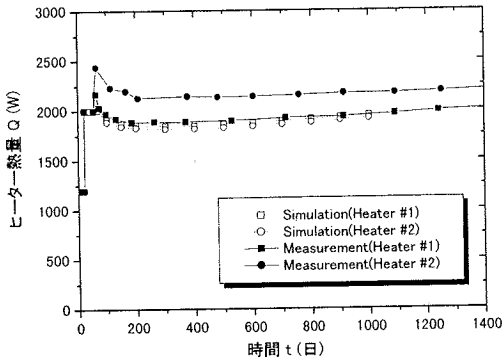


図-10 ヒーター出力の経時変化

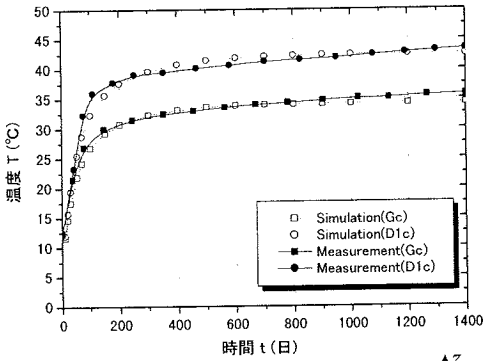
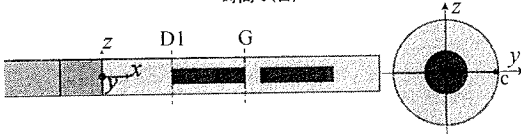


図-11 温度の経時変化



定した。ヒーターからの熱量は試験と同様に、20日まで1本辺り1200W、その後20日間を2000Wとし、53日以降ヒーターの温度を100°Cに固定した。

時間ステップは、変化の大きい初期の段階では10日程度とし、200日を越えないように徐々に大きくなるように設定した。

### (2) 物性値

緩衝材の物性値は、第2章、第3章で述べたとおりである。緩衝材以外の解析に用いた各物性値を表-4に示す。岩盤は等方均質と仮定した。ヒーター部分は剛体、不透水とし、温度解析のみ行っている。物性値は文献<sup>15)</sup>を参考にしている。

### (3) 解析結果

解析結果を図-10から図-13に示す。図-10はヒーターからの熱量の経時変化である。53日までは、境界条件として熱量が与えられており、それ以降は、ヒーターが

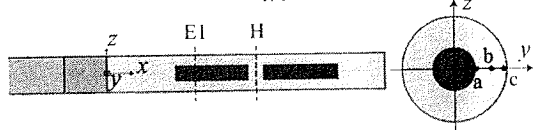
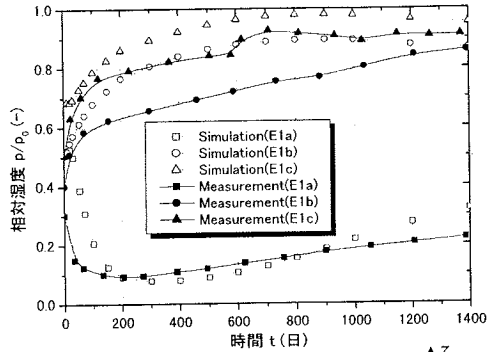
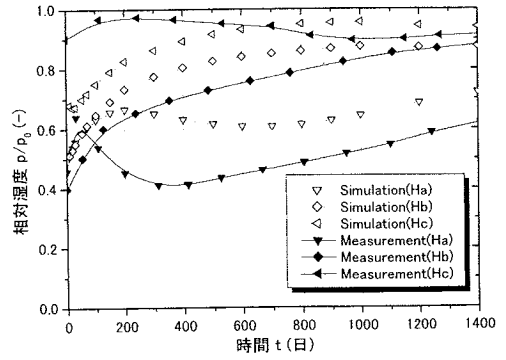


図-12 相対湿度の経時変化

100°Cで一定になるように調整されており、この時の熱量を表している。実測値では二つのヒーターの出力は異なる値となっているが、解析ではほぼ同じ熱量となっている。これは岩盤を等方均質に設定したことに起因すると考えられるが、実測値と計算値はよく一致していると言える。

図-11は観測点における温度の経時変化を示したものである。観測点は、同図下に示す断面D1およびGにおける点cである。観測点は断面D1における点cをD1cのように表している。熱量と同様、計算値と実測値はよく一致している。

図-12は観測点における相対湿度の経時変化を示している。観測点は、断面E1およびHにおける点a, b, cである。点aが最もヒーターに近く、点cが最も岩盤側である。相対湿度は、サクションと温度を用いて、以下の式で表される。

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(\frac{s}{RT}\right) \quad (22)$$

ここで、 $p/p_0$ は相対湿度、 $R$ は気体定数で、水蒸気では $47.06\text{m}^3/\text{C}$ である。

相対湿度の経時変化は、熱量や温度に比べると計算値と実測値のずれは大きいものとなっている。これは、第一に不飽和の緩衝材中の水分移動が非常に複雑な非線形性を示すことが原因である。さらに、相対湿度の計測も非常に困難であることや、岩盤の透水性の不均質性を考慮しなかったことも原因の一部と考えられる。しかし、全体的な浸潤プロセスやヒーター近傍の乾燥プロセスなどの傾向は、良く表現されていると言える。

図-13は、観測点E2dにおける半径方向の応力の経時変化を表している。3(3)b)で記したように、不飽和領域における膨潤応力のパラメータを本解析によって同定したために、実測値と計算値は良く一致している。しかし、膨潤応力は相対湿度と大きく関連することから、相対湿度の経時変化の信頼性をさらに向上させることが本質的な課題であると考えられる。

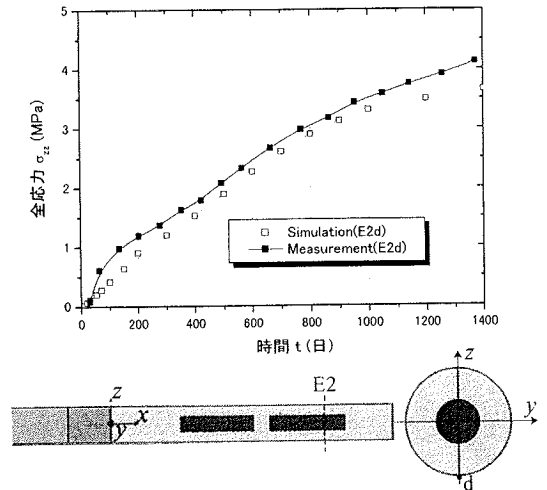


図-13 観測点E2dにおける応力の経時変化

## 5. おわりに

FEBEX原位置試験のための基礎データを用いて、原位置試験のシミュレーションを行い、以下の知見を得た。

- 1) 不飽和の緩衝材中の水分移動を表現するモデルとして比透水係数を用いる場合でも、水分拡散係数を算定し、物理的意味を考慮してパラメータを設定する必要がある。
- 2) 温度勾配下の水分移動を表現するためのパラメータは、熱-水連成試験により同定する必要がある。
- 3) 日本産ベントナイトを用いた釜石原位置試験場での粘土充填・熱付加試験で評価するために開発された熱-水-応力連成モデルを、スペイン産ベントナイトを用いたFEBEX原位置試験に適用するプロセスを示すことで、ベントナイトの種類や試験条件に関わらず、本モデルが妥当であることを示した。
- 4) 温度の経時変化は、解析的に精度良く評価することができる。
- 5) 相対湿度(飽和度)の経時変化は、非線形性が強く、解析による構成度の表現は難しいが、全体的な浸潤プロセスやヒーター近傍の乾燥プロセスなどの傾向は良く表現できる。

本論では主に緩衝材を対象に解析を行ったが、周辺岩盤の透水係数の分布や水圧分布の影響や、緩衝材中の連成現象の周辺岩盤に対する影響は無視できない。今後、岩盤をより詳細にモデル化し、より高度な評価を行うこ

と、また、より長期的な挙動を解析によって評価することが課題である。

## 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ、JNC TN1400 99-020, 1999.
- 2) ENRESA : FEBEX project final report, Publicaciones tecnica I/2000, 2000.
- 3) Pusch, R. and Borgesson, L. : Final report of the buffer mass test - volume II, SKB Technical report 85-12, 1985.
- 4) Neerdael, B., Meyndonckx, P. and Voet, M. : The Bacchus backfill experiment at the Hades underground research facility at Mol, Belgium, Final Report, EUR 14155, 1992.
- 5) Kjartanson, B. H., Chandler, N. A., Wan, A. W. L., Radhakrishna, H. S. and Lau, K.-C. : In situ assessment of bentonite/sand buffer material, Joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering, pp.747-755, 1993.
- 6) Chijimatsu, M., Fujita, T., Sugita, Y., Amemiya, K. and Kobayashi, A. : Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38, pp.67-78, 2001.
- 7) Jing, L., Stephansson, O., Tsang, C-F. and Kautsky, F. : DECOVALEX - Mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories, Executive Summary for Phases I, II and III, 1996.
- 8) Jing, L., Stephansson, O., Borgesson, L., Chijimatsu, M., Kautsky, F. and Tsang, C-F. : DECOVALEX II project Technical report - Task 2C, SKI report, 99/23, 1999.
- 9) Rutqvist, J., Borgesson, L., Chijimatsu, M., Nguyen, T.S., Jing, L., Noorishad, J. and Tsang, C-F. : Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine - comparison of field results to predictions of four finite element codes, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38, pp.129-142, 2001.
- 10) Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A. : Development of finite element code for the analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behavior of a saturated-unsaturated medium. In: Tsang, C-F. editor, *Coupled processes associated with nuclear waste repositories*, Academic Press, Orlando, pp.551-557, 1987.
- 11) Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M. : Experiment

- and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 24, pp.403-424, 2000.
- 12) Philip, J.R. and de Vries, D.A. : Moisture movement in porous materials under temperature gradient, *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 38(2), pp. 229-237, 1957.
- 13) 中野政詩 : 土の物質移動学, 東京大学出版会, 1991.
- 14) Mualem, Y : A conceptual model of hysteresis, *Water Resour. Res.*, Vol.10(3), pp.514-520, 1976.
- 15) Amiguet, J.L. : Grimsel Test Site, Felskennwerte von intaktem Granit. Zusammenstellung felsmechanischer Laborresultate diverser granitischer Gesteine, NAGRA, NIB 85-08, 1985.

(2003. 1. 20 受付)

## ANALYSES OF COUPLED THERMAL HYDRAULIC AND MECHANICAL EXPERIMENT AT GRIMSEL TEST SITE IN SWITZERLAND

Hiroshi KURIKAMI, Masakazu CHIJIMATSU, Akira KOBAYASHI, Yutaka SUGITA  
and Yuzo OHNISHI

The real scale coupled thermal, hydraulic and mechanical experiment (FEBEX in situ test) has been performed at Grimsel test site in Switzerland in order to evaluate the coupling processes on high-level radioactive waste disposal. The heaters as waste canisters were put horizontally based on the Spanish disposal strategy. In this paper, the existing coupling model which has been validated with the coupled experiment at Kamaishi mine was applied to FEBEX in situ test and the effects of the disposal strategy and bentonite materials were clarified. Especially, the identification of water diffusivity coefficient in non-isothermal unsaturated area is very important because it is based on the physical considerations.