

# 原位置試験場における 熱-水-応力連成試験結果および解析評価

千々松正和<sup>1</sup>・杉田裕<sup>1</sup>・藤田朝雄<sup>1</sup>・雨宮清<sup>2</sup>・小林晃<sup>3</sup>・大西有三<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 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>2</sup>正会員 学術博 ハザマ 原子力部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>3</sup>正会員 工博 岩手大学助教授 (〒020-8550 岩手県盛岡市上田3-18-8)

<sup>4</sup>正会員 工博 京都大学教授 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

高レベル放射性廃棄物を地層処分すると廃棄体からの放熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧の発生などの現象が相互に影響することが予想される。このような、熱-水-応力連成現象を評価することを目的に、地下原位置試験場において連成試験を実施した。試験坑道床盤に掘削した試験孔にベントナイトおよびヒーターを設置し、ヒーターによる加熱および試験坑道床盤に設置したブルによる地下水の浸潤により実岩盤条件下での連成現象を再現し、温度、含水比、間隙水圧、応力、ひずみ等のデータを取得した。また、熱-水-応力連成解析モデルにより試験結果を解析的に評価した結果、温度分布、緩衝材内の含水比変化等に関しては試験結果と解析結果でほぼ良い一致が得られた。

**Key Words** : *coupled thermo-hydro-mechanical process, high-level radioactive waste, geological disposal, buffer material, in-situ experiment*

## 1. はじめに

わが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分概念は、「安定な地質環境に、性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する」ことを基本としている。この多重バリアシステムのうち人工バリアは、工学的対策が施された障壁であり、その構成要素としては、放射性廃棄物であるガラス固化体、廃棄物を格納する容器（オーバーパック）、オーバーパックと岩盤との間に充填される緩衝材がある。このうち、緩衝材としては、低透水性であるため、地下水流動を抑制する働きが見込まれる粘土（ベントナイト）が候補として考えられている<sup>1)</sup>。人工バリア定置後のニアフィールドでは、廃棄体からの放熱、周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧の発生などの現象が相互に影響する（熱-水-応力連成現象<sup>2)</sup>、以下、連成現象という。）ことが予想される。このような、連成現象を評価することは、ニアフィールド環境の明確化の観点から重要な課題の一つである。特に定置直後の緩衝材は不飽和状態であり、不飽和粘土内の連成現象の把握が重要となってくる。

ベントナイトの諸特性については個々の現象のメカニズムを明らかにするため、これまでに不飽和ベ

ントナイトの伝熱特性、浸潤特性、膨潤特性等に関する各種要素試験が実施されている<sup>3)・4)</sup>。しかし、個々の要素試験で得られたデータは、環境条件を制御した閉じられた系でのものである。これに対し、地下深部では上述した連成現象の中での挙動となり、実岩盤中で起こる現象を、要素試験で得られた関係式等で適切に表現できるかを確認することは重要なことである。そのためには、実岩盤で起こりうる実規模での連成現象に関するデータを取得することが不可欠である。

実岩盤における連成現象の試験は諸外国でも実施されており、小型の試験としてスウェーデンのSTRIPA PROJECTにおけるバッファマスタスト<sup>5)</sup>、ベルギーのモル試験場でのBACCHUS試験<sup>6)</sup>、実規模の試験としてカナダのURLでのバッファ/コンテナ試験<sup>7)</sup>、スイスのグリムゼルでのFEBEX試験<sup>8)</sup>等の実績がある。一方、国内での試験は実規模ではあるもののコンクリートで製作された人工岩盤内での緩衝材大型試験<sup>9)</sup>及び実岩盤ではあるが小型の連成試験<sup>10)</sup>以外行われていなかった。そこで、日本の岩盤及び国産のベントナイトを対象とした実規模での連成現象に関するデータを取得することを目的として、釜石原位置試験場において熱-水-応力連成試験を実施した。

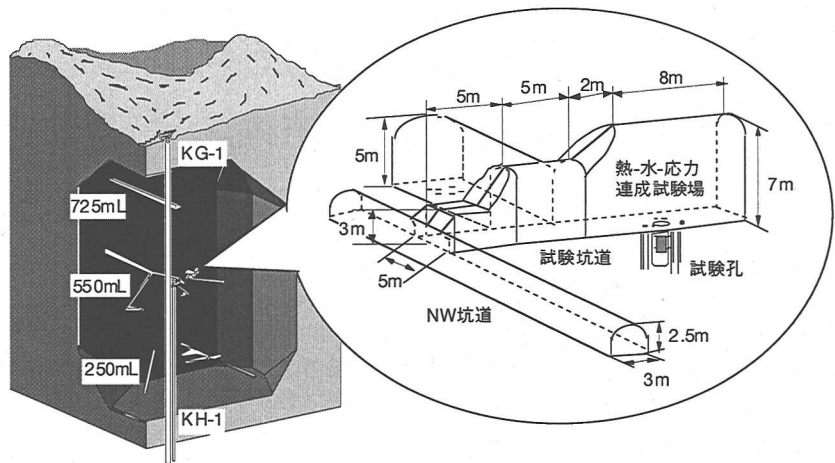


図-1 釜石原位置試験場および試験坑道位置図

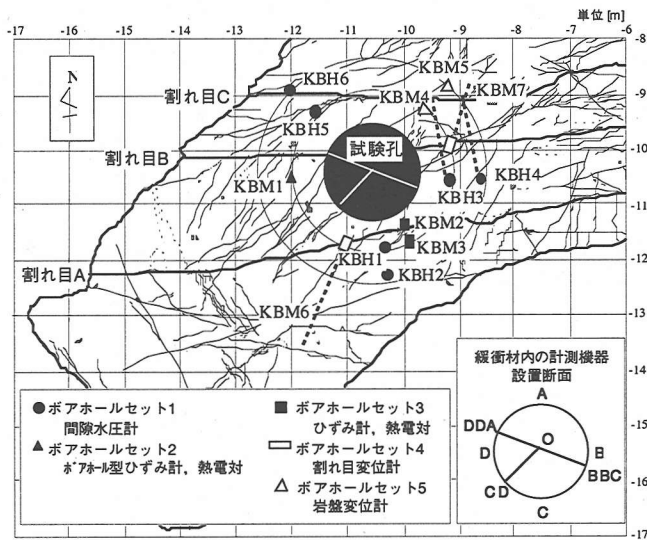


図-2 坑道床盤における亀裂調査結果および岩盤内の計測機器の配置

## 2. 試験場所

釜石原位置試験場<sup>11)・12)</sup>は図-1に示すように岩手県釜石市にある釜石鉱山の坑道の一部を利用したものである。試験を実施するために、原位置試験場の既存坑道である550mL坑道(海拔550m)のNW坑道から新規に“ト”の字型の試験坑道を掘削した。試験区域の母岩は栗橋花崗閃緑岩、土被りは約300mである。坑道掘削後に実施した坑道床面の割れ目調査では長さ50cm以上の割れ目が399本観察された。図-2に坑道床盤における割れ目調査結果を示す。本試験では、図-2に示す割れ目A, B, Cに着目し、試験孔を割れ目Bに交わり、割れ目A, Cに挟まれるように配置した。これらの割れ目に着目することにより、試験孔内の連成挙動が割れ目に与える影響を観察するとともに、連成挙動の周辺岩盤への伝達が割れ目

の存在によりどのように影響を受けるかを観察した。

## 3. 計測機器の設置

本試験では、岩盤内及び緩衝材内の連成現象を把握するため、種々の計測機器を設置した。図-2には岩盤内の計測機器の配置を示す。また、緩衝材内の計測機器の配置は、試験孔を掘削した後に実施した試験孔壁面からの湧水量分布測定結果を考慮して決定した。図-3に測定結果を示す。測定は25cm×30cmの大きさの吸収材を試験孔壁面に所定時間張り付けることにより実施した。また、試験坑道床盤には地下水の浸潤を促進するために一定水位で水を張った。図-3より湧水は主に亀裂に沿って生じていることが分かる。計測機器を配置したのは、O-BBC, O-CD, O-DDAの3断面である(図-2参照)。計測

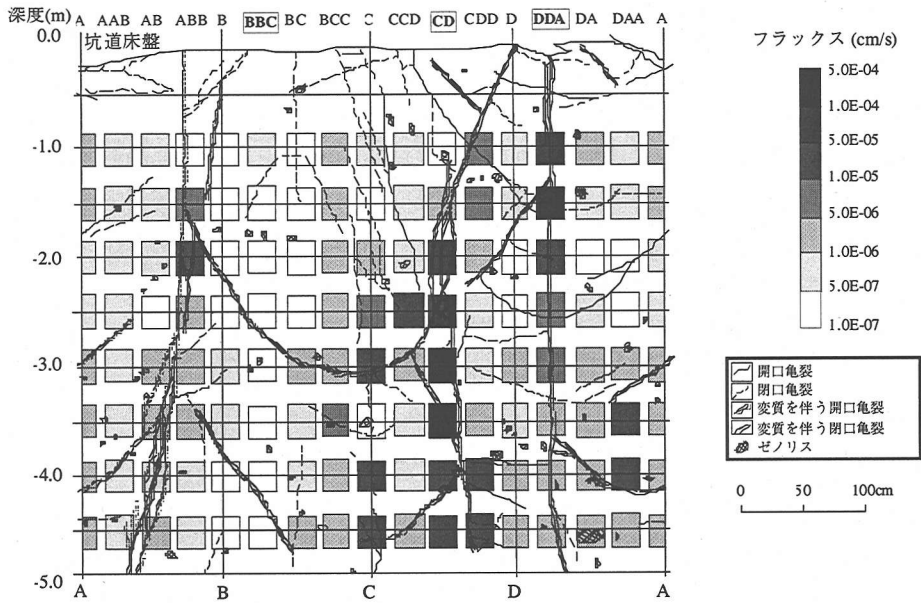


図-3 試験孔壁面への湧水量分布測定結果

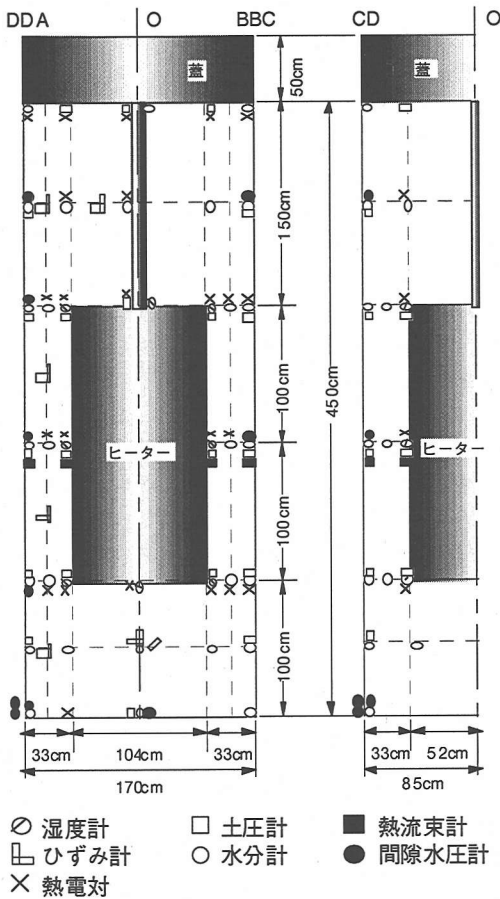


図-4 緩衝材内の計測機器設置断面上におけるセンサーの配置

断面BBCは測線上に割れ目が無く湧水量が少ない、計測断面CDは測線上に割れ目があり湧水量が多い、計測断面DDAは測線上に割れ目があり湧水量もある程度ある、という特徴がある。このように計測機器を配置することにより、周辺岩盤からの湧水量の差が緩衝材内の連成挙動に対してどのように影響するかを観察できる。

図-4には緩衝材内の各断面における計測機器の配置を示す。計測機器は各計測断面および各高さにおける緩衝材内側部（ヒーター近傍）、緩衝材外側部（岩盤近傍）、緩衝材中央部（ヒーターと岩盤との間、緩衝材厚さ33cm（ヒーター側部）における中心部分）の3点に設置した。

岩盤内には間隙水圧計、熱電対、ひずみ計、ボアホール型ひずみ計、割れ目変位計及び岩盤変位計を設置した。緩衝材内には間隙水圧計、水分計、湿度計、熱電対、熱流束計、ひずみ計及び土圧計を設置した。これらの計測機器は水分計を除いてデータロガーに接続し、データを蓄積した。

#### 4. 試験孔の掘削

粘土充填のため、直径1.7m、深さ5.0mの試験孔を試験坑道床盤から鉛直方向に掘削した。掘削方法は大口径削孔機を用いたショットボーリング工法<sup>13)</sup>とした。本工法を用いた理由は、作業空間が狭いので全断面掘削が困難であるため、また、掘削に伴い発生する掘削影響領域の範囲をできる限り小さくするためである。ショットボーリング工法とは、ショット

トと呼ばれる直径2-3 mmの鉄球の稜角を利用して岩盤を掘削するものである。鉄球の稜角は、回転するケーシングパイプの先端に取り付けたクラウン部が鉄球をすり砕いた時に現れる。この工法では、摩耗した分の鉄球を補充することにより一つのケーシングパイプで掘り進むことができ、歯そのものが摩耗するビット掘削のように交換の必要がない。今回掘削する5.0mの深度を一気に掘り進むことは、クラウン及びケーシングパイプと岩盤との摩擦抵抗に対する機械の能力上、不可能であった。そこで、50cmショットボーリングで削孔した後一旦ケーシングパイプを引上げ、その部分について削岩機で内部の岩盤を破碎した。ここで、削岩を容易にするため、試験孔予定箇所の割れ目の分布を考慮して、事前に試験孔内部に直径24.5cmのボーリング孔を5本削孔しておいた。この5孔を利用することで削岩を効率良く行なえた。掘削した試験孔の岩盤壁面は滑らかであった。

## 5. 粘土の充填

### (1) 粘土充填法

膨潤性粘土であるベントナイトの膨潤性能はその充填密度と密接な関係があり、適切な充填技術に裏付けられたものでなければならない。粘土の充填方法としては、ブロック定置方式<sup>5)</sup>-<sup>10)</sup>及び現場締固め方式(まきだし転圧工法<sup>14)</sup>と吹付け工法<sup>15)</sup>)等がある。ブロック定置方式は、充填した粘土の品質が緩衝材の製作技術あるいはハンドリング方法等の定置技術に大きく依存するため、坑道の形状等から導入機械に制限のある本試験において採用するメリットは少ない。一方、現場締固め方式は、施工性や品質に関して施工場所の環境の影響が大きいが、現場施工を実施することにより技術的な課題を確認することができると考えられる。これらを考慮して、本試験では現場締固め方式のまきだし転圧工法を実施した。この工法はまきだされた粘土を打撃機によって締固めるもので、粘土と岩盤及びヒーターとの境界部にすきまなく粘土を充填することができる。試験孔内への湧水量は1日あたり数リットル程度と微量であったことから、粘土の充填にあたりポンプアップ等の処置は施さなかった。

試験に使用した粘土はベントナイトOT-9607(以下、単に粘土という)である。これはベントナイト、クニゲルV1を最終粉碎工程前に回収した粘土でクニゲルV1に比べ粒径が大きいという特徴がある。最大粒径は4.75mmで、均等係数は4~5である。試験孔内に均等にまきだした粘土は電動タンピングランマー(以下ランマーという)で締固めた。ラン

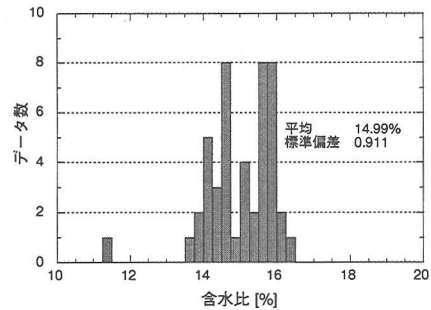


図-5 含水比のヒストグラム

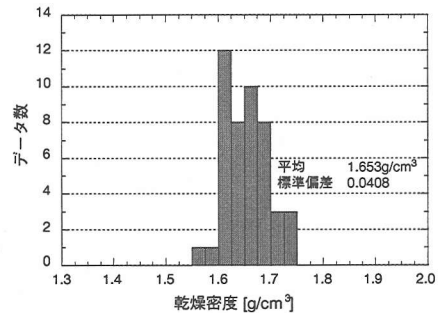


図-6 乾燥密度のヒストグラム

マーは質量48kg、打撃力750-850 N/回、打撃数650-750/分である。粘土の締固めはランマーを基本としたが、岩盤との境界部及びヒーター近傍等、ランマーでは締固めが充分にできないところではランマーより小型のエアースンドタンパー(以下タンパーという)を使用した。タンパーは質量16.7kg、打撃数750/分である。粘土充填の予備試験の結果、充填可能な密度は1.65g/cm<sup>3</sup>、適切な1層当たりの厚さは10cmであったことから、本試験でもそれに倣って試験孔下側から粘土を充填した。なお、充填密度の管理値は1.60-1.70g/cm<sup>3</sup>とした。また、予備試験での粘土の最適含水比は15%であったことから、本試験で用いる粘土の初期含水比は15%に調整した。粘土の充填密度は、締固め時の高さを測定する出来形測定で確認した。粘土の充填は、粘土の含水比の確認、まきだし、締固め及び出来形測定に要する時間を考慮して、原則1日1層とした。既に充填された粘土層の上に、翌日、次の層を充填すると、打継目が弱部となることが予想された。そこで、層と層の密着性、一体化をより確実にするために、次の層を充填する前に前段階の層の表面にリップングを施した。これは、層の表面にランダムに引掻き傷を付けるものである。

### (2) 粘土充填結果

粘土の全面充填の場合1層当たりの材料の投入量

はおよそ420kgであり、20kg詰めの試料を21袋使用する（ヒーター側面部では270kg）こととなる。このため、各袋ごとに含水比を測定し、平均値をその層の含水比とした。図-5に含水比のヒストグラムを示す。全層の平均値は14.99%、標準偏差は0.911であり、層ごとのばらつきは小さくすることができた。図-6には乾燥密度のヒストグラムを示す。全層の平均値は1.653 g/cm<sup>3</sup>、標準偏差は0.0408であり、層ごとのばらつきは非常に小さくすることができた。

## 6. 熱-水-応力連成試験

岩盤及び緩衝材内において連成現象に関する試験条件を整えたうえで、試験を開始した。加熱・浸潤試験期間は平成8年12月17日から平成9年9月1日まで実施した。その後、温度が下降する状態での連成現象を把握するため、加熱を停止した減熱・浸潤試験を平成9年9月1日から平成10年3月10日まで実施した。

### (1) 試験条件

本試験では、実際の地層処分条件において起こりうる連成現象を試験区域内で再現するために、以下のような処置を施した。

#### a) 熱的作用

本試験区域における岩盤の温度は年間を通じてほぼ12℃で安定している。そこで、地層処分における廃棄体からの発熱の影響を与える手段として人為的に加熱するヒーターを試験孔内に組み込み、緩衝材側から加熱した。加熱・浸潤試験時の温度の制御点は、図-7に示すヒーター表面の下端部中心とした。この地点が100℃の一定値になるようにヒーターの温度を調節した。電気ヒーターは潤滑オイルを充たしたヒーター内に収めた。加熱された潤滑オイルはエアア及び循環用羽根車にて常に攪拌され、ヒーター表面を均一に加熱できるようにした。緩衝材材料であるベントナイトは、温度が100℃以下の場合には緩衝材としての性能を損なうような変質は生じないと考えられているため、加熱時の設定温度は緩衝材と接するヒーター表面で100℃とした。

#### b) 水的作用

試験孔内（緩衝材内）への地下水の浸潤を促進するため、また、解析評価の際の境界条件設定のために、図-7に示すように試験区域を覆うように試験坑道床盤にプールを設置した。これにより、試験区域床盤にためられた地下水は岩盤内を通じて試験孔に浸透していくことが期待される。プールは試験孔の中心部に常に床盤上に40cmの水位となるように制御した。供給した地下水は鉱山内の湧水であり、年間

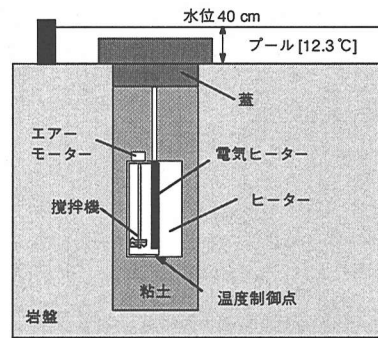


図-7 熱-水-応力連成試験環境条件

を通じてほぼ一定温度であることから温度境界を兼ねさせた。プールを設置したときの試験孔壁面からの湧水量の測定は粘土充填を行なう前に実施された。その結果、湧水量は1日あたり約200リットルであった<sup>16)</sup>。

#### c) 応力の作用

地下深部に掘削された坑道の周辺岩盤には地圧が作用している。また、温度が上がるため熱応力が作用し、地下水を吸収した緩衝材は膨潤するため膨潤圧が発生する。前者は試験場に作用する地圧により、また、後者の熱応力および膨潤圧は、上記a)、b)の作用を与えることにより、ある程度再現することができる。

### (2) 試験結果

計測データのうち、連成現象の各作用ごとに代表的な測定点の挙動について以下に示す。

#### a) 熱的作用

試験期間における温度の経時変化を図-8に示す。図には、ヒーター中心高さとなる深度-3.0mの各点の値を示した。加熱開始後、緩衝材内側部は直ちに温度が上昇し、ヒーターからの距離が遠くなるに従い、温度の立ち上がりに時間を要している。岩盤内のボーリング孔KBH5、6においては100日程度ではほぼ定常に達した。定常後の温度は緩衝材内側部で100℃、緩衝材外側部で55℃であった。図では断面BBC及びDDAの温度を示しているが、断面による差はなく緩衝材内における温度分布は均一であることがわかった。試験開始から180日程度経過後の一時的な温度の下降は停電による加熱の停止によるものである。復電後は加熱開始時と同様にヒーター表面から順次定常状態に戻った。

加熱停止後、温度は徐々に低下し150日程度で定常に達した。定常後の温度は、試験開始時と同じ12℃程度であった。360日目あたりで緩衝材内側部（○●印）に温度低下が見られるが、この原因は不

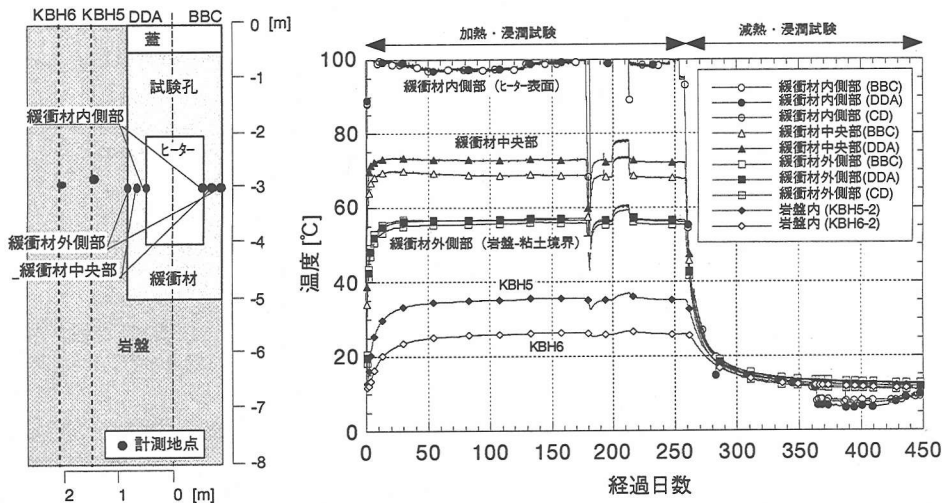


図-8 温度の経時変化

明である。しかし、ほかの計測点における変化が見られないことから、電気的なノイズ等と考えられる。

#### b) 水の作用

緩衝材内に設置した水分センサーにより測定されるのは湿度計による湿度、水分計による水分ポテンシャルである。緩衝材内の含水比はこれらの値から温度を考慮し換算して求めた値であり、この換算式は事前に実施した室内試験から得たものである。この換算式の妥当性を確認するため、緩衝材のサンプリングを実施した。緩衝材のサンプリングは、加熱・浸潤試験終了時及び減熱・浸潤試験の終了時の2回で、加熱・浸潤試験終了時は計測断面BBCの値と比較し、減熱・浸潤試験終了時は計測断面CDの値と比較した。図-9に示すように一測線あたり6本のサンプリング孔を掘削し、緩衝材のサンプリングを実施した。取得したサンプルは24時間110℃炉乾燥で乾燥させた後、含水比を求めた。サンプリングにより得られた含水比と水分センサーにより計測された含水比の比較も図-9に示す。グラフから、水分センサーによる計測とサンプリングによる含水比はよく一致しており、含水比の換算式が妥当であることがわかった。

水分センサーにより計測された緩衝材内の含水比の経時変化を代表的な5点について図-10に示す。5点の計測位置は、ヒーター表面（緩衝材内側部）2点、緩衝材内部（緩衝材中央部）1点及び岩盤との境界部（緩衝材外側部）2点である。緩衝材内側部（□■印）では加熱開始後から含水比が低下し始め、150日程度で定常に達した。これは、加熱による温度の影響でヒーター表面近傍にあった緩衝材内の水分が岩盤側へ移動したものと考えられる。これに対応するように緩衝材中央部（△印）の含水比は

加熱開始と同時に一旦上昇し、その後低下している。また、緩衝材外側部（○●印）の含水比は加熱後上昇し、飽和に近い値で推移した。これより、緩衝材内部のセンサー部分と岩盤との間に浸潤面が形成されたことを示していると考えられる。加熱停止後は、緩衝材内側部において含水比が上昇した。上昇は緩やかであり、試験終了時においても定常には達しなかった。緩衝材外側部では、含水比が若干低かった●部で含水比の上昇があった。これは熱の影響が小さくなったために岩盤からの水の浸潤がすすんだものと考えられる。

岩盤内に設置した間隙水圧計に関しては試験開始直後に若干値が低下する傾向が見られたが全体的に大きな変化は生じなかった。しかし、試験中に幾つかの計測点で間隙水圧が突然上昇するという現象が生じた。その際には、水圧上昇直後にその地点の温度は低下した。この圧力の上昇は加熱中に限られ、各点の間隙水圧は、それによって深度相当の静水圧に近づいている。これは、加熱の影響によってき裂の性状が変化し、岩盤から試験孔の計測区間に地下水が浸入したものと考えられる。また、緩衝材-岩盤境界部の間隙水圧計は、一時的に負圧側に変動した。これは、緩衝材の高いサクションにより試験孔壁面近傍の岩盤内の地下水が緩衝材内に吸引され、この部分が一時的に不飽和になったためであると考えられる。

#### c) 応力の作用

図-11には緩衝材内に設置した土圧計による圧力の測定結果を示す。土圧計は、試験終了後回収し、センサーの線形性および絶対値の確認を行ない、信頼のおけるデータのみ図に示した。図-11に示す圧力の測定結果はヒーター表面に設置した土圧計によ

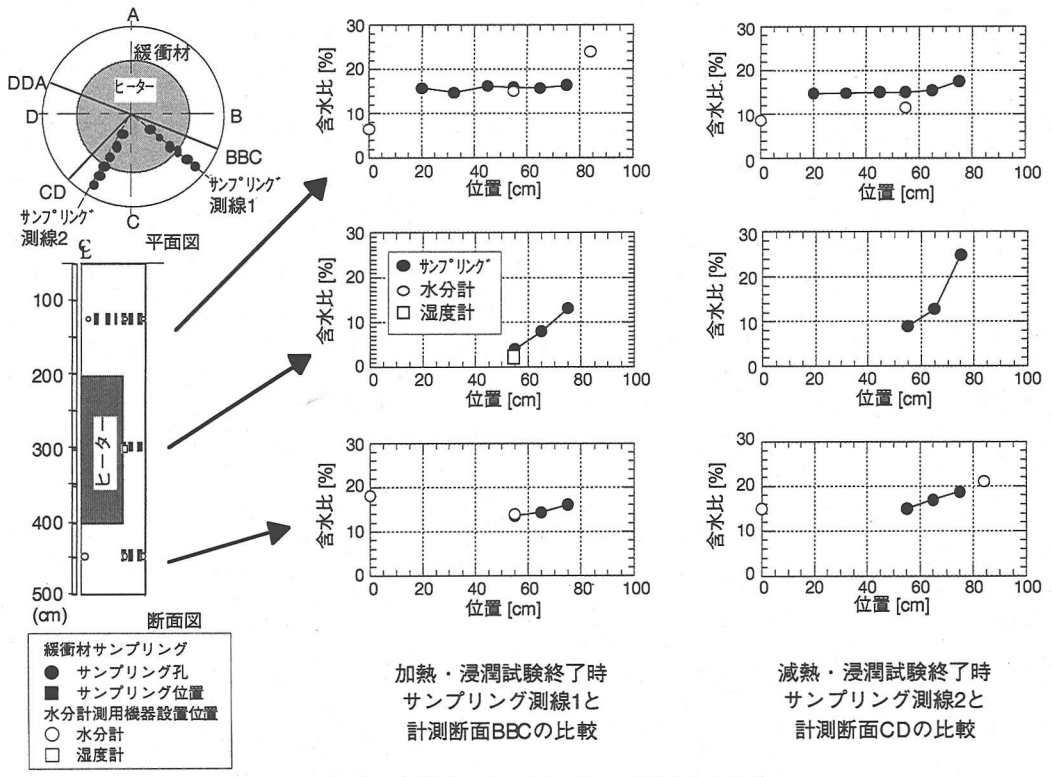


図-9 計測データとサンプリング結果との比較

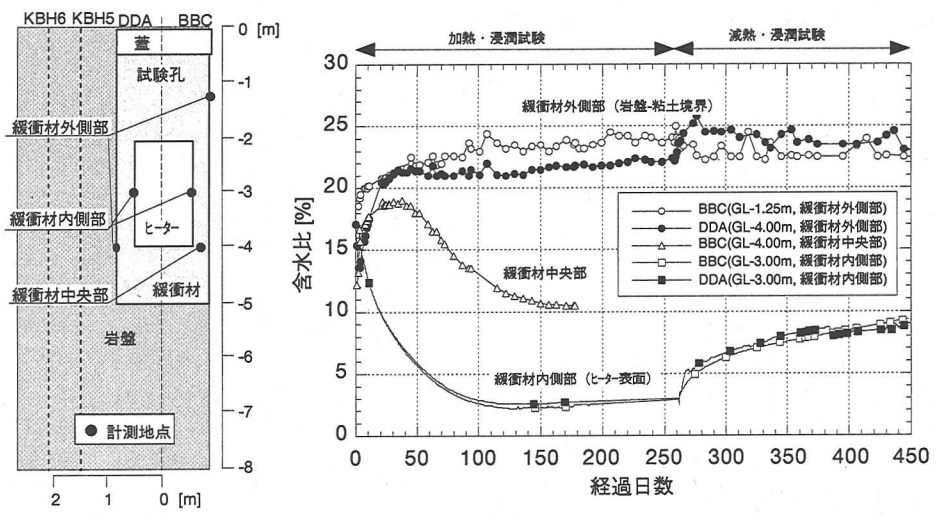


図-10 緩衝材内の含水比の経時変化

るものである。試験孔壁面に設置した土圧計に関しては今回十分な計測が実施できなかった。これは、今回使用した土圧計が直径25mmと小型であるため、岩盤表面の凸凹の影響により十分に機能しなかったものと考えられる。一方、ヒーター表面に設置した土圧計は全て同様な傾向を示している。加熱試験開始とともに、計測値は上昇しており、ヒーターの停止後には値は低下している。減熱試験時の値は緩衝

材の膨潤によるものが主であると考えられるため、加熱試験時は加熱による膨張が支配的となっていると推察される。ヒーターを停止した時点でデータがドリフトし、値が負になっているものがあるため、減熱時の計測値を一概に膨潤圧の値とすることはできないが、膨潤圧の値は概ね0.5MPa以下であると思われる。また、図-12には緩衝材内および岩盤内のひずみの経時変化を示す。緩衝材内のひずみは、埋

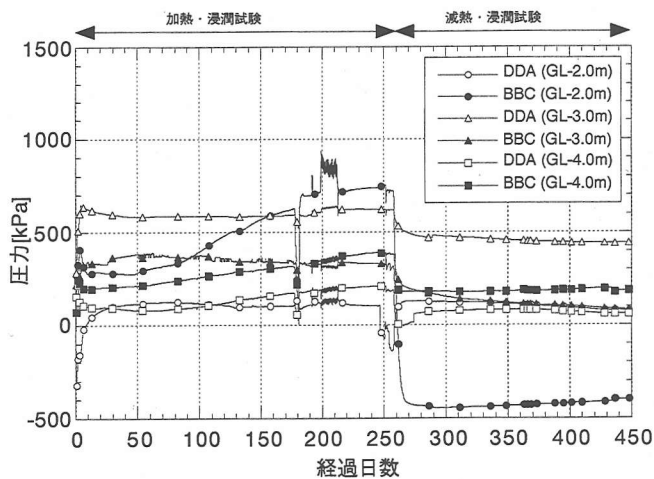
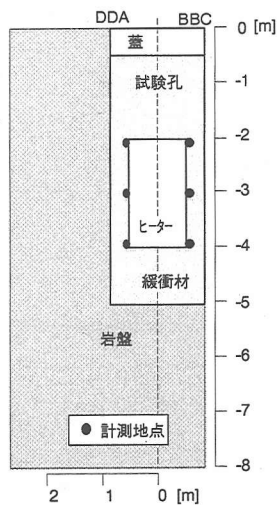


図-11 圧力の計測結果

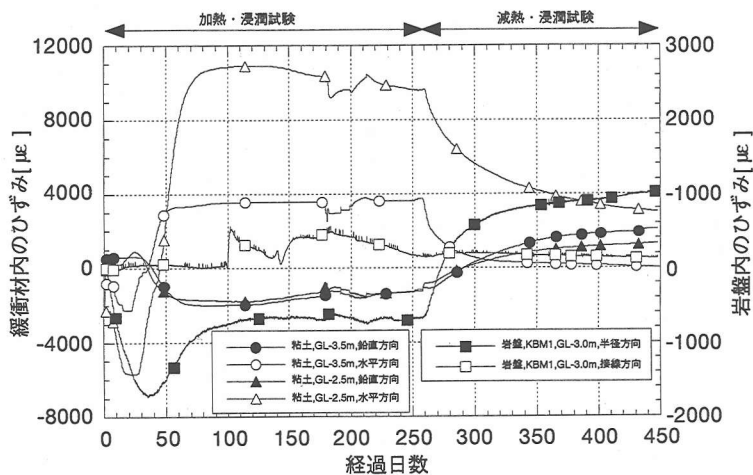
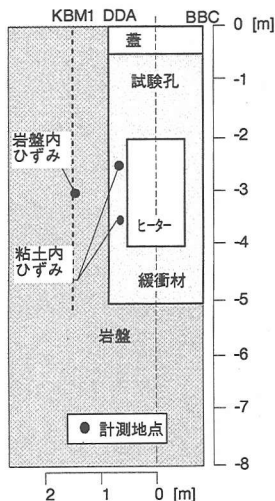
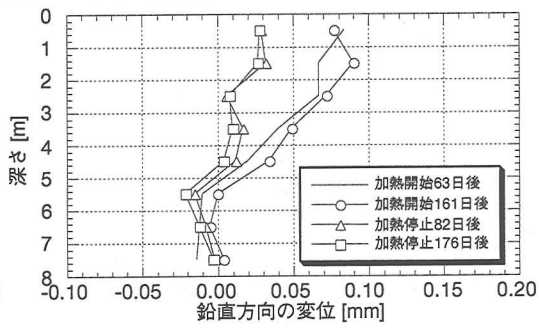
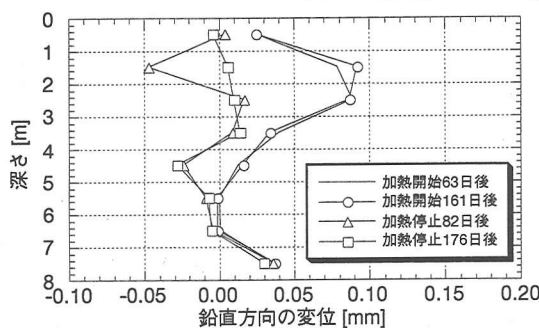


図-12 緩衝材内および岩盤内のひずみの経時変化



(a) ボーリング孔KBM4

(b) ボーリング孔KBM5

図-13 岩盤変位計により測定されたボーリング孔内の各地点の鉛直変位

込型ひずみ計で計測し、正が圧縮ひずみ、負が引張ひずみを示している。また、岩盤内は、試験孔径の変位を測定することによりひずみを求めた。岩盤のひずみも、正が圧縮、負が引張を示している。緩衝材内に関しては、加熱開始直後には水平方向に引張

ひずみが発生しており、これが温度が定常になるとともに、圧縮ひずみへと変化している。図-9を見ると、加熱開始直後はひずみ計の設置位置の含水比は増加していることが分かる。このため、ひずみ計設置位置に膨潤が生じ、引張ひずみが発生したものと



考えられる。その後、含水比は低下しており、その影響による緩衝材の収縮およびヒーターの熱膨張により圧縮ひずみに変化していったものと推察される。ヒーター停止後は含水比の増加に伴う膨潤の発生およびヒーターの収縮により、圧縮ひずみの量は小さくなっている。鉛直方向に関しては、水平方向と逆の挙動を示している。岩盤に関しては、加熱開始とともに半径方向に引張りひずみが発生しており、温度が定常になるとともに値は減少し一定の値となっている。そして、ヒーターを停止した後は、ひずみは圧縮側に変化している。また、図-13には岩盤変位計（試験孔KBM4, 5に設置）により測定された試験孔内の各地点の鉛直変位を示す。加熱時には鉛直方向に有意な変化（伸び）が見られた。

### (3) 試験の評価

ここでは、連成試験中に得られた各計測結果の特徴をまとめ、ヒーターの加熱および減熱によって、緩衝材および周辺岩盤に生じる現象を整理する。加熱試験は、ヒーターの温度制御で行われたため、ヒーターからの発熱量は初期に大きく、約50日後から一定となっている。よって、加熱期間の試験フェーズを、加熱開始50日までの「加熱初期フェーズ」と、それ以降のヒーターからの発熱量が定常となっている「加熱定常フェーズ」に分けて計測結果を整理する。「加熱定常フェーズ」では、緩衝材温度はほぼ一定となっているが、岩盤は、温度上昇速度が「加熱初期フェーズ」に比べ小さくなっているものの、温度上昇を継続している期間である。一方「減熱フェーズ」では、ヒーターからの発熱が停止した後もヒーターの持つ熱容量のためにわずかな発熱は継続するが、ほぼ10日程度でこれもゼロに低下している。減熱期間中、緩衝材および岩盤は徐冷され、試験を終了した減熱6ヶ月の時点では、連成試験前の温度環境にはほぼ回復している。

加熱の影響が顕著であるヒーター中心高さレベルを例に、それぞれの試験フェーズにおける各計測結果の特徴を示すと以下のとおりである。

#### ①加熱初期フェーズ

- 緩衝材中の水分はヒーター側すなわち緩衝材内側から緩衝材外側（岩盤側）へ移動する。水分の外側への移動は、ヒーターと岩盤の間（緩衝材中央部）に設置した水分計がこのフェーズで一時的に湿潤を示すことから観察される。本試験では、試験孔外周の岩盤からの地下水の浸潤に比べ、加熱は緩衝材中の水の移動に対して大きな駆動力となっていることがわかる。これは、周囲の岩盤の間隙水圧が低いためである

と考えられる。

- 間隙水圧は、緩衝材-岩盤境界部、岩盤内ともに若干変動する。緩衝材-岩盤境界部は、一時的に負圧側に変動する。これは、緩衝材の高いサクションにより試験孔壁面近傍の岩盤内の地下水が緩衝材内に吸引されたためであると考えられる。
- ヒーター表面への圧力（半径方向の全応力）は増加し、緩衝材中の半径方向のひずみは一時的に「引張」を示した後に、「圧縮」側に変化する。
- 岩盤のひずみは、半径方向および鉛直方向ともに「伸び」を示す。加熱による岩盤のひずみは、岩盤の熱膨張能力と自由膨張を拘束する程度から決まる。拘束の小さい鉛直方向は大きな「伸び」を示す一方で、水平断面内では熱膨張の拘束（これは熱応力の発生を意味する）によって、伸びが制限されていることが観察された。

「加熱初期フェーズ」では、温度上昇と緩衝材中の水分移動が優勢である一方で、応力とひずみについては過渡的で複雑な挙動を示す。ヒーターの熱膨張、緩衝材の乾燥収縮と吸水膨張、岩盤の熱膨張などが、強く影響していると考えられる。

#### ②加熱定常フェーズ

- 緩衝材内側から外側に向かう水分の移動は継続し、緩衝材中央部分の水分計も乾燥側に変化する。
- 緩衝材-岩盤境界の間隙水圧は若干増加する。岩盤の間隙水圧についても、わずかながら増加する傾向が見られる。また、岩盤内の間隙水圧データのいくつかは、段階的に増加し、加熱試験の終了時点ではその深度の静水圧に近づく。
- ヒーター表面における圧力の増加速度は減少する。また、緩衝材中のひずみは半径方向、鉛直方向ともに変化は小さく一定となる。
- 岩盤のひずみも、緩衝材中のひずみと同様に一定となる。

「加熱定常フェーズ」では、緩衝材水分の岩盤側への移動の継続、岩盤-緩衝材境界の間隙水圧の上昇、岩盤の温度と間隙水圧の緩やかな上昇、およびき裂ゾーンが多い岩盤の間隙水圧の段階的な上昇が観察された。また、応力・ひずみについては、ヒーター表面における圧力の増加速度は減少し、岩盤のひずみは変化が小さく安定した状態にある。

#### ③減熱フェーズ

- 加熱期間中と反対に緩衝材内側への水分の移動が観察される。ただし、緩衝材外側の岩盤に近い部分は飽和した状態を継続する。
- 緩衝材-岩盤境界の間隙水圧は、減熱初期に減

少しその後一定となる。岩盤の間隙水圧は、わずかながら減少する傾向が見られる。

- ヒーター表面における圧力は、減熱初期に減少しその後一定となる。
- 緩衝材中のひずみは、「加熱初期フェーズ」と反対の挙動を示す。
- 岩盤ひずみは、「圧縮」の傾向を示す。

「減熱フェーズ」では、初期状態への温度場の回復によって、加熱フェーズと反対の現象が観察されている。これには、間隙水圧の低下、ヒーターへの圧力の減少、緩衝材と岩盤のひずみの回復などがある。また、一方で、加熱によって乾燥した緩衝材中への地下水の浸潤は、今回の試験では十分に観察されていない。ただ、緩衝材内側部分の含水比の増加や、いくつかの測点で壁面の間隙水圧が増加していることなど、緩やかな地下水の浸潤を反映する計測データが取得されている。

## 7. 熱-水-応力連成解析

### (1) 熱-水-応力連成モデルの支配方程式<sup>17)</sup>

連成現象の再現に用いた解析コードTHAMES<sup>18)</sup>は、Ohnishiら<sup>19)</sup>によって開発された熱-水-応力連成モデルがベースとなっている。Ohnishiらのモデルは、水の流れ、力学的挙動、熱的挙動の三つが完全に連成したものであり、熱移動については、フーリエの式を用いたエネルギー保存則、水の流れと応力・変形はBiotの圧密方程式に熱膨張を考慮するためのDuhamel-Neumann形式を用いたものとなっている。今回使用したモデルは、Ohnishiらのモデルに対し、不飽和緩衝材中の水分拡散、温度勾配による水分移動、浸潤に伴う膨潤圧を考慮できるように改良したものである。膨潤性の不飽和粘土の力学的挙動に関しては、本モデルでは膨潤圧のみ考慮しており、変形挙動等に関してまだ十分に対応していない。支配方程式は次のようになる。

応力の釣り合い式は以下の通りである。

$$\left[ \frac{1}{2} C_{ijkl} (u_{k,i} + u_{i,k}) - F \pi \delta_{ij} - \beta \delta_{ij} (T - T_o) + \chi \delta_{ij} \rho_l g (h - z) \right]_{,j} + \rho b_i = 0 \quad (1)$$

ここで、 $C_{ijkl}$ は弾性係数マトリックスである。 $\chi$ は不飽和パラメータで、飽和領域で $\chi=1$ 、不飽和領域で $\chi=0$ となる。 $\rho_l$ は地下水の密度、 $g$ は重力加速度、 $\rho$ は土の密度、 $b_i$ は物体力、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーデルタ、 $\pi$ は膨潤圧、 $F$ は膨潤応力に寄与する係数である。未

知パラメータは、変位ベクトル $u_i$ 、温度 $T$ 、全水頭 $h$ である。また、 $z$ は位置水頭である。 $\beta$ は温度変化によって生じる応力を求めるときの係数で、等方弾性体の場合、次式ようになる。

$$\beta = (3\lambda + 2\mu) \alpha \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ は固相の線膨張係数であり、 $\lambda$ 、 $\mu$ はラメの定数である。

膨潤圧は浸潤に伴うサクション（水分ポテンシャル） $\psi$ の変化に伴い発生するものとし、次式で定義する。

$$\pi(\theta_1) = \rho_l g \Delta \psi = \rho_l g [\psi(\theta_1) - \psi(\theta_0)] = \rho_l g \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} d\theta \quad (3)$$

地下水の連続式は以下に示す通りである。

$$\left\{ \xi \rho_l D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) + (1 - \xi) \frac{\rho_l^2 g K}{\mu_l} h_{,i} \right\}_{,i} + \{ \rho_l D_T T_{,i} \}_{,i} - \rho_{l0} n S_r \rho_l g \beta_P \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_l \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_l S_r \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho_{l0} n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $D_\theta$ は水分拡散係数、 $\theta$ は体積含水率、 $K$ は固有透過度、 $\xi$ は不飽和パラメータで飽和領域で $\xi=0$ 、不飽和領域で $\xi=1$ である。 $\mu_l$ は水の動粘性係数、 $\rho_{l0}$ は初期状態の地下水の密度、 $D_T$ は温度勾配による水分移動に関する係数、 $n$ は間隙率、 $S_r$ は飽和度、 $\beta_P$ は水の圧縮係数、 $\beta_T$ は水の熱膨張係数である。

エネルギーの保存則は以下に示す通りである。

$$\left( \rho C_v \right)_m \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho_l C_{vl} V_{l,i} - K_{Tm} T_{,ii} + L \left\{ D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) \right\}_{,i} + n S_r T \frac{\beta_T}{\beta_P} \left\{ \xi D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) + (1 - \xi) \frac{\rho_l g K}{\mu_l} h_{,i} + D_T T_{,i} \right\}_{,i} + \frac{1}{2} (1 - n) \beta_T T \frac{\partial}{\partial t} (u_{i,j} + u_{j,i}) \delta_{ij} = 0 \quad (5)$$

ここで、 $V_i$ は地下水の流速、 $L$ は単位体積あたりの水蒸気の潜熱、 $D_\theta$ は水蒸気拡散係数である。

$(\rho C_v)_m$ は水と骨格粒子からなる場の比熱で、次式で求まる。

$$(\rho C_v)_m = n S_r \rho_l C_{vl} + (1 - n) \rho_s C_{vs} \quad (6)$$

ここで、 $C_{vl}$ は水の比熱、 $C_{vs}$ は固相の比熱である。

$K_{Tm}$ は水と骨格粒子からなる場の熱伝導率で、次式で求まる。

$$K_{Tm} = n S_r K_{Tl} + (1-n) K_{Ts} \quad (7)$$

ここで、 $K_{Tl}$ は水の熱伝導率、 $K_{Ts}$ は固相の熱伝導率である。

## (2) 緩衝材物性の設定<sup>20)</sup>

緩衝材の物性は基本的には室内要素試験から直接算出される。しかし、水分拡散係数、水分特性曲線、温度勾配による水分移動の係数及び膨潤応力に寄与する係数に関しては、室内試験の結果から逆解析的に同定した。以下に設定した各物性値を示す。

### a) 水分拡散係数及び水分特性曲線

解析に用いた緩衝材の固有透過度 $K$  [ $m^2$ ]及び水分拡散係数 $D_\theta$  [ $cm^2/s$ ]は以下の通りである。固有透過度は透水試験から、水分拡散係数は水分拡散試験から直接算出した。不飽和ベントナイト中の水分は含水量が少ない状態では水蒸気のみで移動し、また、含水量が多い状態では液状水のみで移動するというこれまでの検討結果<sup>21)</sup>から、水分拡散係数 $D_\theta$ は水蒸気による拡散係数 $D_{\theta v}$ と液状水による拡散係数 $D_{\theta l}$ の和として式(9)のように表している。図-14には測定された水分拡散係数値および式(9)の関数式による値を示す。本関数モデルにより、含水量の低いところおよび高いところで水分拡散係数の値が大きくなっていること、および、温度が高くなるに従い水分拡散係数の値が大きくなっていることが良く表現できている。

$$K = 2.00 \times 10^{-20} \quad (8)$$

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta l} = \frac{(3.68 \times 10^{-8} T - 2.08 \times 10^{-7})(\theta - \theta_s)}{(\theta + 1.00 \times 10^{-3}) - (1.00 \times 10^{-3} - \theta_s)} + \frac{\theta(-3.58 \times 10^{-9} T - 2.19 \times 10^{-7})}{0.41(\theta - 0.41)} \quad (9)$$

ここで、 $\theta_s$ は飽和体積含水率である。

サクシオン $\psi$  [cm]はサイクロメータを用い直接計測されるが、解析を行なう際にはサクシオンと体積含水率の関係(水分特性曲線)を関数式として与えておく必要がある。ここでは、実測されたサクシオンと体積含水率の関係を直接用い、水分特性曲線を作成した。図-15には用いた水分特性曲線を示す。水分特性曲線には、水分拡散係数ほど顕著な温度依存性は見られなかった。

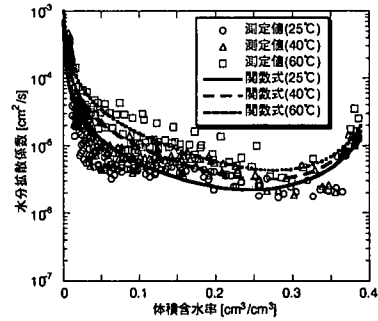


図-14 水分拡散係数の測定値および関数式

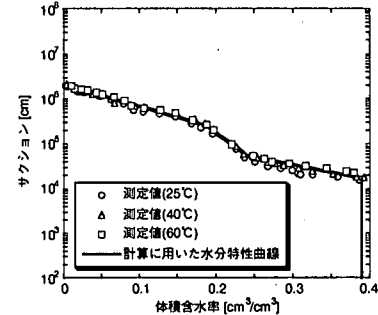


図-15 解析に用いた水分特性曲線

### b) 温度勾配による水分移動に関する係数

温度勾配による水分移動に関する係数は $D_T$ は次式のように温度の関数として設定した。

$$D_T = D_{T0} \exp\left(\alpha_T \frac{T - T_0}{T_0}\right) \quad (10)$$

ここで、 $D_{T0}$ は基準となる係数の値、 $T_0$ は基準温度、 $\alpha_T$ は温度に対する非線形性の度合を調整するパラメータでスカラー量である。

これらの値は、室内要素試験結果から逆解析によって求めた。同定された式(10)における各パラメータは以下の通りである。

$$D_{T0} = 8.5 \times 10^{-8} \text{ [cm}^2/\text{s}^\circ\text{C]} \quad (11)$$

$$\alpha_T = -1.5 \text{ (} T < 60^\circ\text{C)}, 1.5 \text{ (} T \geq 60^\circ\text{C)} \quad (12)$$

$$T_0 = 60^\circ\text{C} \quad (13)$$

### c) 膨潤応力に寄与する係数

供試体内部において膨潤圧が発生したときに拘束境界面に作用する応力を膨潤応力と定義する。膨潤応力の値はベントナイトの微視的構造による影響等により膨潤圧とは必ずしも等しくならない<sup>22)</sup>。したがって、膨潤応力に寄与する膨潤圧 $\pi$ は、膨潤圧 $\pi$ にある係数 $F$ を乗じて表わされると考える。現在のところ、係数 $F$ を理論的に求めることは困難であるので、ここでは室内要素試験で得られた実測の膨潤応

表-1 解析に用いた物性値一覧

| 物性値                    | ヒーター、蓋                | 緩衝材                   | 岩盤                     |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 弾性係数[MPa]              | $2.0 \times 10^3$     | $1.0 \times 10^2$     | $2.81 \times 10^4$     |
| ポアソン比[-]               | 0.3                   | 0.3                   | 0.3                    |
| 密度[g/cm <sup>3</sup> ] | 7.80                  | 2.04                  | 2.75                   |
| 固有透過度[m <sup>2</sup> ] | $1.0 \times 10^{-27}$ | $2.0 \times 10^{-20}$ | $1.98 \times 10^{-16}$ |
| 比熱[kJ/kg℃]             | 0.46                  | 式(15)                 | 0.833                  |
| 熱伝導率[W/m℃]             | 53.0                  | 式(16)                 | 2.71                   |
| 熱膨張係数[1/℃]             | $1.64 \times 10^{-6}$ | $1.00 \times 10^{-6}$ | $1.00 \times 10^{-6}$  |

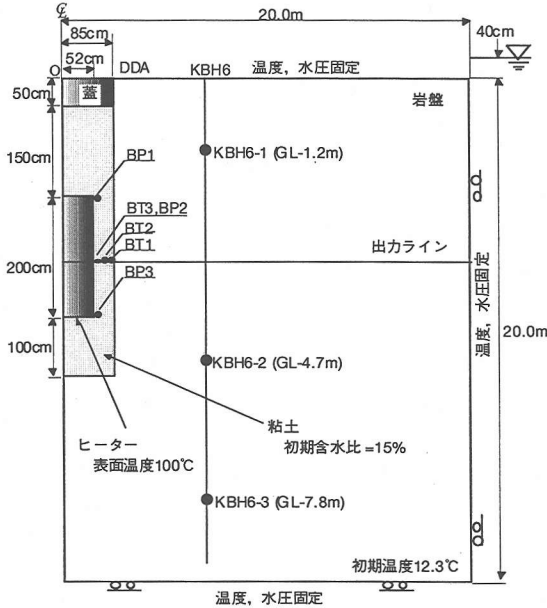


図-16 解析モデル図および結果比較点

力のデータから逆解析で $F$ を定めた。同定された $F$ の値は以下の通りである。

$$F = 0.190 \quad (14)$$

### (3) ニアフィールド熱-水-応力連成解析

#### a) 解析の概要

岩盤を含めたニアフィールドの解析を二次元軸対称モデルで実施した。実際の岩盤は不均質であり、異方性を有しているが、ここでは均質・等方とし解析を実施した。

#### b) 解析モデル

図-16に解析モデルの概念図及び境界条件の概要を示す。熱・水理に関してはモデル周辺を初期値で固定とした。また、力学的には上部以外の境界をスライド境界とし、上部は自由境界とした。図-16には解析結果の出力地点も示している。解析要素は8節点要素で、解析メッシュの全節点数は8592、全要素数は2793である。

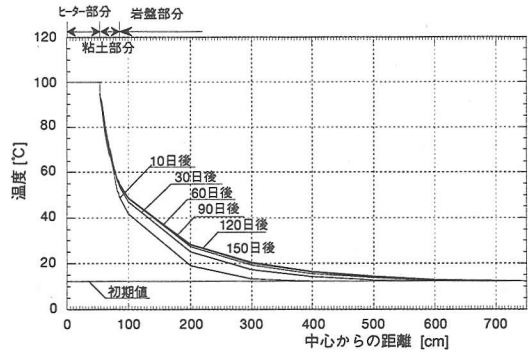


図-17 出力ライン上の温度の経時変化

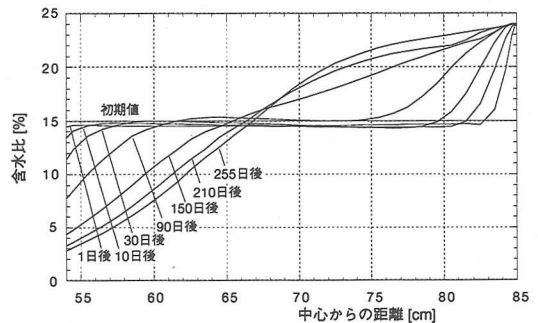


図-18 出力ライン上の緩衝材の含水比の経時変化

#### c) 解析物性値及び初期条件

解析に用いた物性値は表-1の通りである。また緩衝材の比熱 $C_v$  [kJ/(kg℃)], 熱伝導係数 $\lambda$  [W/(m℃)]に関しては、次式のように含水比 $\omega$  [%]の関数として与えた。

$$\text{比熱} : C_v = (42.6 + 4.19\omega) / (100 + \omega) \quad (15)$$

$$\text{熱伝導係数} : \lambda = 0.050\omega + 0.503 \quad (16)$$

岩盤の固有透過度としては試験孔周辺に設置された試験孔を用いた単孔式透水試験の結果を用いた<sup>23)</sup>。また、岩盤の不飽和特性に関しては、Watanabe<sup>24)</sup>により算定されたものを用いた。初期の温度は12.3℃とし、解析領域の境界部は初期温度で固定とした。また、岩盤の初期水圧は地表面に40cmの水位がある静水圧状態とし、解析領域の境界部は初期水圧で固定とした。また、緩衝材の初期含水比は15.0%とした。ヒーターの加熱はヒーター表面部分を100℃に固定することにより表現した。

#### d) 解析結果

図-17に出力ライン上の温度の経時変化を示す。同図より約4か月後に温度が定常になっていることが分かる。また、図-18には緩衝材内の出力ライン上の含水比の経時変化を示す。緩衝材の外側は岩盤からの浸潤により含水比が高くなっていき、内側は

温度勾配による水分移動により含水比が低くなっている。温度は約4か月後に定常となっているが、水分分布が定常となるのはそれに比べかなり遅く、加熱開始250日後でも定常に達していない。

### e) 実測との比較

図-19には温度の経時変化の計測結果と解析結果の比較を示す。解析の結果、出力地点における緩衝材内の温度は30日程度で定常となっており、外側部分(BT3)の最大温度は約54℃となっている。一方、出力地点における岩盤内(KBH6)の温度は定常となるまでに約150日程度要している。実測結果と比較してみると、岩盤の場合、発生の状況及び最終的な値は解析結果と測定結果で良く似た傾向を示している。一方、緩衝材内に関しては、発生状況は良く似た傾向を示しているが、最終的な値は解析の方が低くなっている。これは、緩衝材の熱物性値の影響によるものと考えられ、今回の解析では熱物性を含水比の関数としているが、この関係式をより精度よく得るとともに、乾燥密度等の関数として表現していくことにより、さらに詳細な評価ができていくものと推察される。

図-20には緩衝材内の含水比の経時変化の実測値と解析値との比較を示す。解析の結果、緩衝材の外側は比較的早期に飽和となっている。一方、緩衝材の内側は徐々に含水比が低下しており、加熱開始250日後の含水比は約2%となっている。実測値と比較すると、緩衝材中央部分の含水比が一旦上昇し、その後減少するという現象は表現できていないものの、外側の浸潤状況、内側の乾燥状況に関してはほぼ表現できているといえる。緩衝材中央部分の含水比変化を再現できなかった理由としては、加熱に伴い発生する水蒸気の移動を十分に表現できなかったことが考えられる。

図-21には緩衝材内の圧力の経時変化の比較を示す。測定値は加熱開始直後に上昇しその後はほぼ一定となっているが、解析値は加熱開始後徐々に増加する結果となった。各測定点における圧力値は100kPaから700kPaまでの違いがあるが、これは施工された緩衝材の密度差等によるものと思われる。一方、解析における圧力値は加熱試験終了時の250日後でも定常に達しておらず、増加し続けている。これは、今回使用したモデルにおいては、膨潤圧の発生は緩衝材の水分ポテンシャルの変化に依存するとしており、この時点(加熱開始250日後)においても緩衝材内の水分移動は図-18に示す通り定常に達していないためである。また、ヒーター中心高さ(BP2)における圧力の解析値は、加熱開始直後には一旦減少するという結果となった。これは、含水

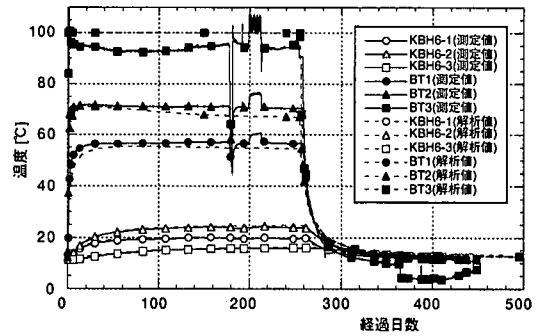


図-19 温度の経時変化の比較

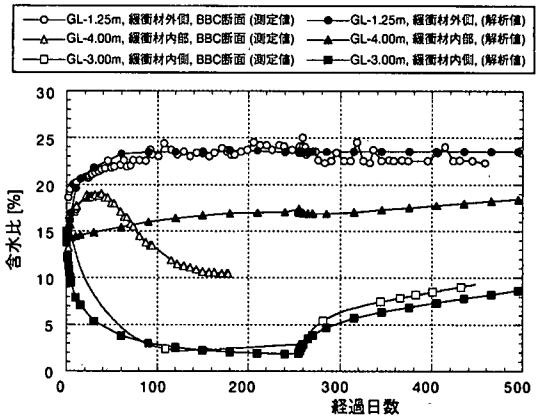


図-20 緩衝材内の含水比の経時変化の比較

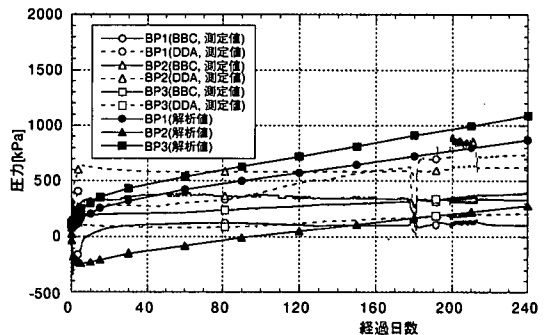


図-21 圧力の経時変化の比較

比の低下に伴う乾燥収縮の影響が過大に評価されたためであると思われる。実際には、土圧計はヒーター表面に設置されているので、乾燥収縮による引張応力は計測できない。含水比の低下の少ないBP1およびBP3における圧力は時間とともに増加しており、加熱試験終了時の250日後の時点で約1000kPaとなった。解析結果は実測値に比べ若干大きな値となった。これは、今回の試験においては、膨潤応力に寄与する係数Fを室内実験から同定したのであるが、実際の大型試験においては種々(密度差、スケール効果等)の要因により、実際発揮されるべき膨潤圧全てが発生していないためであると考えられる。また、乾燥収縮の影響も十分には考慮できていない。

## 8. おわりに

実岩盤における連成現象に関するデータを取得することを目的に、熱-水-応力連成試験を実施した。

試験では、直径1.7m、深さ5.0mの試験孔をショットボーリング工法により掘削し、試験孔内に粘土を充填した。試験孔における湧水量が一日あたり数リットルと微量であったことから、粘土の充填は湧水対策なしに実施することができた。充填した粘土の乾燥密度の平均は $1.65\text{g/cm}^3$ で、ばらつきは小さくほぼ均一であった。

加熱条件下では岩盤内及び緩衝材内の温度は100日程度でほぼ定常に達し、含水比についても150日程度でほぼ定常に達することがわかった。一方、加熱停止後は、温度は150日程度でほぼ定常に達するものの、含水比については200日を超えても定常に達することはなく、変化し続けた。

加熱初期には、温度上昇と緩衝材中の水分移動が優勢である一方で、応力とひずみについては過渡的で複雑な挙動を示した。ヒーターの熱膨張、緩衝材の乾燥収縮と吸水膨張、岩盤の熱膨張などが、強く影響していると考えられる。また、減熱期間には、初期状態への温度場の回復によって、加熱期間と反対の現象が観察されている。これには、間隙水圧の低下、ヒーターへの圧力の減少、緩衝材と岩盤のひずみの回復などがある。また、一方で、加熱によって乾燥した緩衝材中への地下水の浸潤は、試験期間が短かったため、今回の試験では十分に観察されていない。ただ、緩衝材内側部分の含水比の増加や、いくつかの測点で壁面の間隙水圧が増加していることなど、緩やかな地下水の浸潤を反映する計測データが取得されている。

温度分布及び含水比分布については、同じ深度内であれば計測した断面による差は小さく、均一に分布していることがわかった。これは、緩衝材の透水性が非常に小さいために、岩盤からの湧水量の差が含水比の分布に影響しないためと考えられる。

また、連成解析コードTHAMESを用い、実岩盤条件下での試験の実測と解析との比較を行なった。その結果、温度の解析結果は実測値をよく再現しており、本解析コードの適用性を確認することができた。また、緩衝材の含水比に関しては、等温状態における浸潤挙動は精度良く再現できていると思われるが、温度の影響による水分移動に関しては、より詳細な検討が必要であると考えられる。緩衝材の応力・変形挙動に関しては、緩衝材は膨潤性の不飽和粘土であり、そのメカニズムは現時点においては十分に理解されていないのが現状である。本論においては、

膨潤圧の発生のみに着目してモデル化を行なったが、それさえも十分に評価できたとは言い難い。したがって、応力・変形挙動に関してはさらなる検討が不可欠である。

謝辞：本試験および解析を実施するにあたり、Prof. Jing (Royal Institute of Technology, Sweden), Dr. Börgesson (Clay Technology, Sweden), Dr. Tsang (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA)の各氏には貴重な御意見を賜りました。本試験および解析作業は、熱-水-応力連成モデルに関する国際共同研究「DECOVALEX」における一つのタスクとして実施しました。本国際共同研究に参加した各国の機関の研究者には適切な助言等を頂きました。ここに感謝の意を示します。また、本論分をまとめるにあたり、神戸大学中野政詩教授には緩衝材のモデル化に関して多大なるご指導を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1)動力炉・核燃料開発事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書(平成3年度), PNC TN 1410 92-081, 1992.
- 2)Stephansson, O.: Thermo-Hydro-Mechanical Coupling in Rock Mechanics, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.32, No.5, 1995.
- 3)鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬：緩衝材の特性試験(I), 動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC TN8410 92-057, 1992.
- 4)鈴木英明, 藤田朝雄, 菅野毅：緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数, 動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC TN8410 96-117, 1996.
- 5)Pusch, R. and Börgesson, L.: Final Report of the Buffer Mass Test - Volume II, SKB Technical Report 85-12, 1985.
- 6)Neerdael, B., Meynendonckx, P. and Voet, M.: The Bacchus Backfill Experiment at the Hades Under-ground Reserch Facility at Mol, Belgium, Final Report, EUR 14155, 1992.
- 7)Kjartanson, B., Chandler, N., Wan, A., Radhakrishane, H. and Lau, K.-C.: In Situ Assessment of Bentonite/Sand Buffer Material, Joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering, pp. 747-755, 1993.
- 8)ENRESA: FEBEX Full-scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock, Pre-operational Stage, Summary Report, 1998.
- 9)Sato, S., Kobayashi, A., Hara, K., Ishikawa, H. and Sasaki, N.: Full Scale Test on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process in Engineered Barrier System, Proc. of '91 Joint Int. Waste Management Conference, ASME, Seoul, Korea,

Oct., 1991.

- 10)動力炉・核燃料開発事業団：地層処分研究開発の現状(平成5年度), PNC TN 1410 94-094, pp. 241-242, 1994.
- 11)Fujita, T., Chijimatsu, M., Sugita, Y. and Amemiya, K.: Field Experiment of Coupled T-H-M Processes in the Near Field, 5th Int. Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, Barcelona, 1998.
- 12)核燃料サイクル開発機構：釜石原位置試験総括報告書, JNC TN7410 99-001, 1999.
- 13)中村小四郎：試錐〔II〕一槽と作業法一, 試錐研究会熊本大学工学部, 1960.
- 14)Gunnarsson, D., Johannesson, L., Sanden, T. and Börgesson, L.: Field Test of Tunnel Backfilling, Progress Report, HRL-96-28, 1996.
- 15)杉田裕, 藤田朝雄, 菅野毅：吹付工法を用いた緩衝材の固着性能試験, 動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC TN8410 95-179, 1995.
- 16)千々松正和, 藤田朝雄, 杉田裕, 小林晃, 大西有三:釜石鉱山における湧水量測定および解析評価, 第33回地盤工学研究発表会, pp.1833-1834, 1998.
- 17)Stephansson, O., Jing, L. and Tsang, C.-F.: Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fractured Media, Developments in Geotechnical Engineering, 79, Elsevier, 1996.
- 18)千々松正和, 藤田朝雄, 菅野毅, 小林晃, 茂呂吉司: 膨潤応力を考慮した熱-水-応力連成解析, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第3部(A), pp.26-27, 1995.
- 19)Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A.: Development of Finite Element Code for the Analysis of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Behaviors of a Saturated-Unsaturated Medium", Proc. of Int. Symp. on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, Berkeley, pp. 263 -268, 1985.
- 20)Fujita, T., Chijimatsu, M., Kanno, T., Kobayashi, A. and Nakano, M.: Model of Swelling Pressure of Highly Compacted Bentonite, Proceedings of the International Symposium on Problematic Soils, IS-Tohoku, pp.285-288, 1998.
- 21)竹内真司, 原啓二, 中野政詩：圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態, 地盤工学会論文報告集, Vol. 35, No. 3, pp. 129-137, 1995.
- 22)中野政詩, 藤井克巳: 拘束された不飽和粘土の浸潤と膨張圧, 農業土木学会論文集, 第112号, pp.55 -66, 1984.
- 23)千々松正和, 藤田朝雄, 杉田裕, 茂呂吉司, 小林晃:釜石原位置試験場における透水試験(その1)試験の概要と結果, 土木学会第51回年次学術講演会, 講演概要集第3部(A), pp.628-629, 1996.
- 24)Watanabe, K.: Back Analytical Technique for Evaluating the Hydraulic Parameters of Unsaturated Rock, Int. Congress on Rock Mechanics, 1991.

(1999. 6. 8 受付)

## IN-SITU COUPLED THERMO-HYDRO-MECHANICAL EXPERIMENT -MEASURED AND NUMERICAL RESULTS-

Masakazu CHIJIMATSU, Yutaka SUGITA, Tomoo FUJITA,  
Kiyoshi AMEMIYA, Akira KOBAYASHI and Yuzo OHNISHI

In a repository for high-level radioactive waste (HLW), complex thermal, hydraulic and mechanical (T-H-M) phenomena will take place, involving the radiogenic heating from the vitrified waste, infiltration of ground water and swelling pressure in the buffer. It is one of the important subjects to evaluate these phenomena for the geological disposal of HLW, therefore an in-situ T-H-M experiment was conducted. A test pit was excavated in the floor of the test drift and the buffer material and a heater were set up in the test pit, and then coupled T-H-M test was started. The change of temperature, water content, total pressure and strain were measured both in the buffer and the rock mass. The phenomena in the unsaturated buffer were evaluated by a fully coupled T-H-M model. Comparison between measurements and predictions showed good agreement about the temperature and water content. However, it needs more study to evaluate the mechanical phenomena in the unsaturated swelling material such as the bentonite clay.