



釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験

杉田 裕 千々松正和 藤田 朝雄

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

資料番号：3-5

Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Experiment at the Kamaishi Mine

Yutaka SUGITA Masakazu CHIJIMATSU Tomoo FUJITA
Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle
Research Center, Tokai Works

実岩盤において低透水性の粘土を坑道内に充填した条件下で、熱・水・応力連成現象のデータを取得することを目的に、釜石原位置試験場において粘土充填・熱負荷試験を実施した。

結晶質岩盤である栗橋花崗閃緑岩の試験坑道床盤に直径1.7m、深さ5.0mの試験孔を掘削し、膨潤性粘土であるベントナイトを充填した。試験孔に設置したヒーターによる加熱及び試験坑道床盤に設置したプールによる地下水の浸潤によって実岩盤条件下での連成現象を再現し、データを取得した。

解析コードによる解析結果と試験データとの比較はよく一致し、本解析コードの適用性を確認することができた。

A coupled thermo-hydro-mechanical experiment was conducted to obtain the data of thermal, hydrological and mechanical (T-H-M) processes in and around the backfilled pit in rock mass at the Kamaishi in-situ experiment site.

A test pit, 1.7m in diameter and 5.0m in depth, was drilled on the floor of the test drift in crystalline host rock, Kurihashi granodiorite. The test pit was filled with swelling clay "bentonite". The conditions for T-H-M processes in and around the test pit were set up by the installed heater in the test pit and the pool on the floor of the test area.

Comparison between numerical results and monitoring data was in good agreement, and the applicability of this code for T-H-M processes was validated.

キーワード

熱・水・応力連成現象、坑道、原位置試験、ベントナイト
T-H-M Processes, Drift, In-situ Experiment, Bentonite

1. はじめに

地下に坑道を建設し、利用した後に元の状態に回復するためには、地下深部の坑道を適切に処置しておく必要がある。坑道をそのまま放置すると、地圧による坑道の崩壊や応力場の変化あるいは地下水場の乱れが生じ、坑道周辺部における地層の安定性を確保できなくなると考えられる。

坑道の処置法の一つとして、粘土を坑道内に充填することが考えられる。充填材としては、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ベントナイトが候補として考えられている¹⁾。さらに、ベントナイトは地下水の浸潤に伴

い膨潤するため、坑道内に内圧が作用し、坑道周辺の岩盤を安定させると考えられる。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^{2), 3)}。

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、地下深部では地熱、粘土への地下水の浸潤及び浸潤による膨潤圧の発生、岩盤内の地下水流動及び地圧の作用という複数の現象が相互に作用し合う（熱・水・応力連成現象⁴⁾、以下、

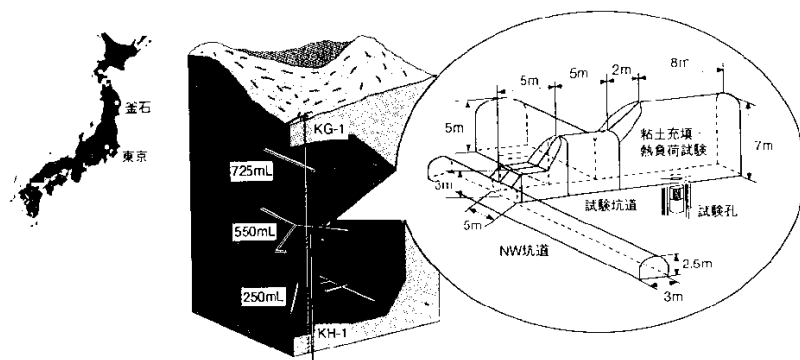


図1 釜石原位置試験場及び試験坑道位置図

連成現象という)と予想される。実岩盤中で起こるこのような連成現象を、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テスト⁵⁾、ベルギーのモル試験場でのBACCHUS試験⁶⁾、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⁷⁾、スイスのグリムゼルでのFEBEX試験⁸⁾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模擬した人工岩盤内での緩衝材大型試験⁹⁾及び実岩盤ではあるが小型の連成試験¹⁰⁾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粘土充填・熱負荷試験¹¹⁾を実施した。

2. 試験の概要

2.1 試験区域

釜石原位置試験場^{12), 13)}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¹⁴⁾。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。

2.2 計測機器

本試験では、岩盤内及び粘土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^{15), 16)}。図2には岩盤内の計測機器の配置を、図3には粘土内の計測機器の配置を示す。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。粘土内には間隙水圧計、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。

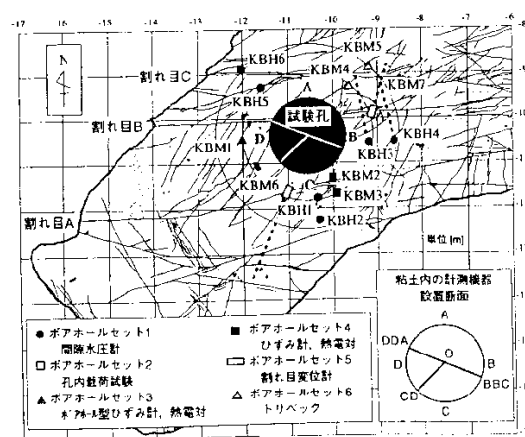


図2 岩盤内の計測機器の配置

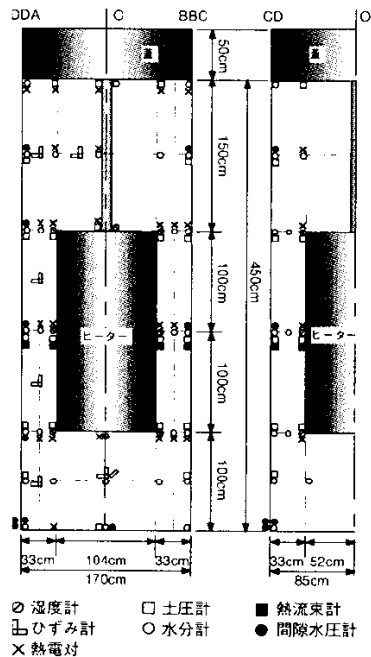


図3 粘土内の計測機器設置位置図

粘土内の計測機器の配置は、試験孔を掘削した後実施した試験孔への地下水の浸潤分布測定結果¹⁷⁾を考慮して決定した。計測機器を配置したのは、図2に示すO-BBC、O-CD、O-DDAの3断面である。計測断面BBCは測線上に割れ目がなく湧水量が少ない、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、という特徴があり、周辺岩盤の状態の差が粘土内の連成挙動に対してどのように影響するかを測定した。

3. 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1孔掘削した。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とした¹⁸⁾。ショットボーリング工法とは、ショットと呼ばれる直径2～3mm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碎いた時に現れる。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、前もって試験孔内部に直径24.5cmのボーリング孔を5本削孔しておいた。この5本の孔を利用することで削岩を効率良く行えた。掘削した試験孔の岩盤壁面は滑らかであった。

4. 粘土の充填

4.1 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^{9)~10)}及び現場締固め方式(まきだし転圧工法¹⁹⁾と吹付け工法²⁰⁾等がある。

充填した粘土の品質確認に関して、品質が粘土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ブロック定置方式は、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、施工性や品質に関して施工場所の環境の影響が大きい現場締固め方式は、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することとした。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日当たり数ℓ程度¹⁷⁾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。

粘土の材料はベントナイトOT-9607²¹⁾(以下、粘土という)である。試験孔内に均等にまきだした粘土を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。ランマーは質量48kg、打撃力750-850N/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、図3に示すように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²²⁾、充填可能な密度は 1.65g/cm^3 、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 $1.60\sim 1.70\text{g/cm}^3$ 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%に調整することとした。

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。1層の充填工程である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、粘土の充填は原則1日1層とした。既に充填された粘土層の上に次の層を充填する場合、そのまま粘土を充填すると充填のタイミングの違いにより層間に弱部が発生す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ピングを施した。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。

4.2 粘土充填結果

粘土の全面充填の場合一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4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。管理目標値の $15\pm 1\%$ の範囲を外れたものは46層中7層であった。図5に乾燥密度のヒストグラムを示す。全層の平均値は 1.653g/cm^3 、標準偏差は0.0408であり、層

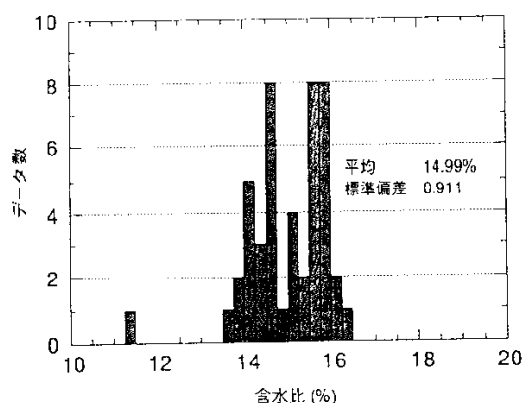


図4 充填粘土の層毎の含水比

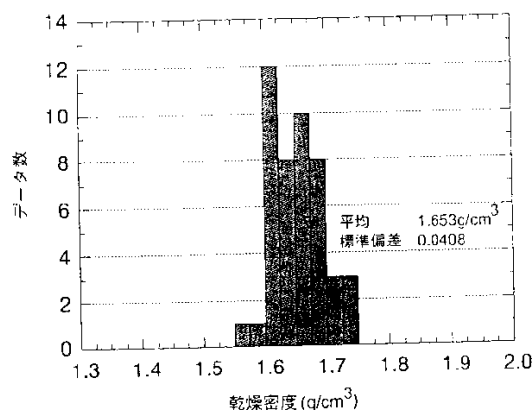


図5 充填粘土の層毎の乾燥密度

ごとのばらつきは非常に小さくすることができた。

5. 熱-水-応力連成試験

5.1 試験条件

本試験では、実岩盤で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。

(1) 熱の作用

本試験区域の岩盤の温度は年間を通じてほぼ 12°C で安定している。そこで、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、粘土側から加熱した。加熱・浸潤試験時の温度の制御点は、図6に示すヒーター表面の下端部中心とした。この地点が 100°C 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取めた。加熱された潤滑オイルはエアー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

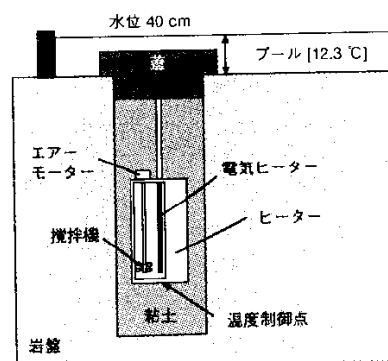


図6 熱-水-応力連成試験環境条件

熱できるようにした。粘土の温度に対する影響を考慮して、加熱時の温度は粘土と接するヒーター表面で100℃とした。

(2) 水の作用

地下水位より深い岩盤内に坑道を掘削すると、坑道の開放により岩盤内の水圧が一時的に低下する。しかし、水圧は坑道を粘土で充填すると徐々に回復し、坑道内の不飽和状態の粘土に向かって地下水の流れが生じ、最終的に粘土及び周囲の岩盤が飽和となる。本試験区域は、試験終了まで試験坑道が掘削されたまま開放状態であり、このような地下水流れを再現できない。

そこで、地下水流れを発生させるため、図6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で常に床盤上に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は1日当たり200ℓ程度であり、粘土を充填する前に湧水分布を把握した¹⁷⁾。

(3) 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、地温が上がるため熱応力が作用し、地下水を吸収した粘土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、後者は、上記(1)、(2)の作用を与えることである程度再現することができる。

以上のように、岩盤及び粘土内において連成現象に関する試験環境を整えたうえで、試験を開始した。加熱・浸潤試験期間は平成8(1997)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。

5.2 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。

(1) 熱的作用

試験期間における温度の経時変化を図7に示す。図では、ヒーター中心部となる深度-3.0mの各点の値を示した。加熱開始後、ヒーター表面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日程度でほぼ定常に達した。定常後の温度はヒーター表面部で100℃、岩盤と粘土の境界部で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粘土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。

加熱停止後は、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日目当たりでヒーター

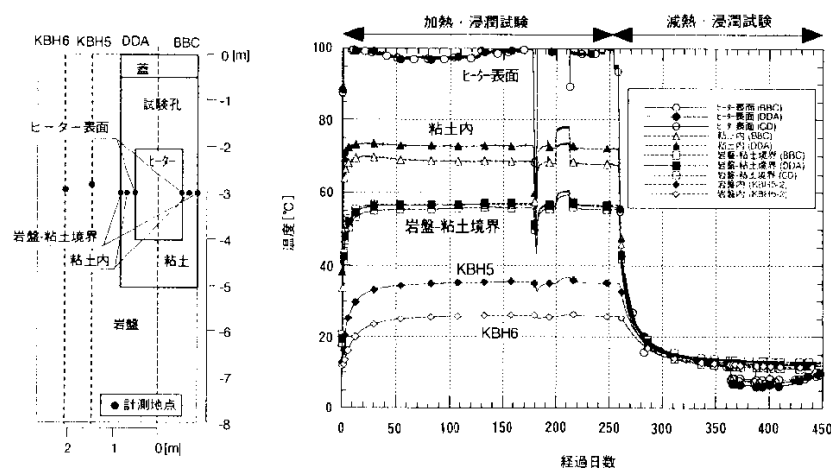


図7 温度の経時変化

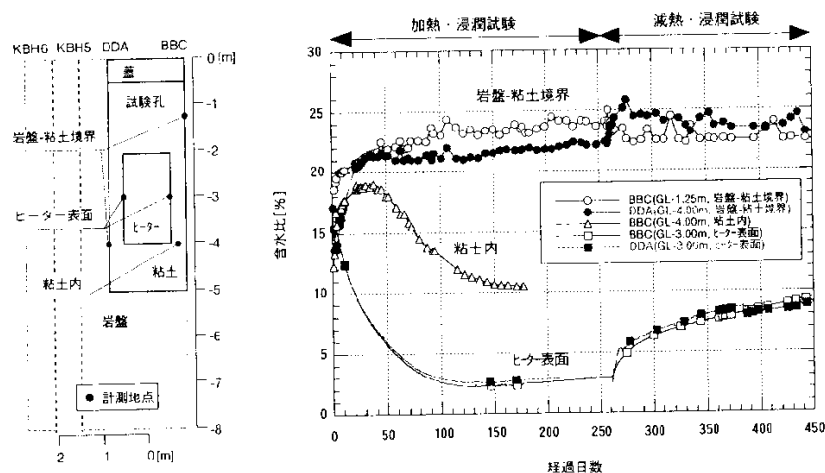


図8 緩衝材内の含水比の経時変化

一表面部(○●印)の温度低下が見られるが、この原因は不明である。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。

(2) 水的作用

含水比の経時変化を代表的な5点について図8に示す。5点の計測位置は、ヒーター表面2点、粘土内部1点及び岩盤との境界部2点である。ヒーター表面部(□■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、加熱による温度勾配でヒーター表面近傍にあった粘土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粘土内部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、岩盤と粘土の境界部(○●印)の含水比は加熱後上昇し、飽和に近い値で推移した。これは、粘土内のセンサーと岩盤側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、ヒーター表面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。岩盤との境界部では、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。

粘土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。粘土内の含水比はこれらの値から換算して求めた値であり、この換算式は室内試験から得たものである。この換算式の妥当性及び

データの欠損部における含水比を確認するため、粘土のサンプリングを実施した²³⁾。粘土のサンプリングは、加熱・浸潤試験及び減熱・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、粘土のサンプリングを実施した。試験孔の断面図において■がデータとの比較に用いたサンプルである。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。求めた含水比と計測データの比較を図9に示す。グラフから、計測データ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。このことから、図8の含水比の経時変化が粘土内の水の動きを正確に捉えているものと考えられる。

(3) 応力の作用

応力の作用を計測するため、岩盤と粘土の境界部及びヒーター表面部に土圧計、粘土内にひずみ計を設置したが、計測された結果が複雑であり、データの信頼性の確認のため、センサー類の再検定を実施しているところである。

6. 熱-水-応力連成解析

6.1 熱-水-応力連成モデルの支配方程式²⁴⁾

連成現象の再現に用いた解析コード「THAMES」²⁵⁾は、Ohnishiらによって開発された熱-水-応力連成モデル²⁶⁾を、不飽和粘土中の水分拡散、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。支配方程式は次の

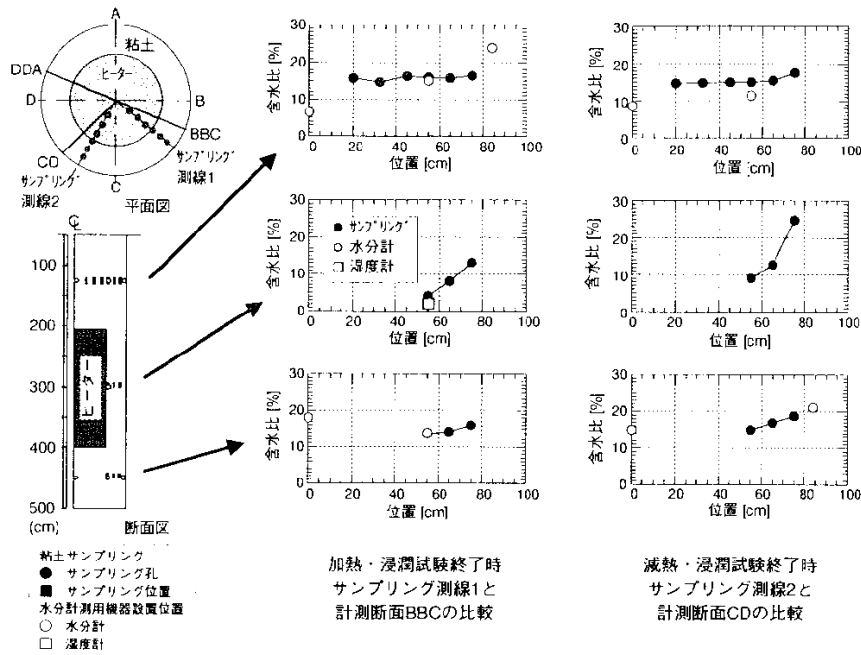


図9 計測データとサンプリング結果との比較

ようになる。

① 応力の釣り合い式

$$\left[\frac{1}{2} C_{ijkl} (u_{k,l} + u_{l,k}) - F \pi \delta_{ij} - \beta \delta_{ij} (T - T_0) + \chi \delta_{ij} \rho_l h \right] + \rho b_i = 0 \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 C_{ijkl} は弾性係数マトリックス、 π は膨潤圧、 F は膨潤応力に寄与する係数、 δ_{ij} はクロネッカーデルタである。 χ 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。 ρ は密度、 b_i は物体力、 T_0 は初期温度である。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。 β 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、次式のようになる。

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

λ 、 μ はラメの定数で、次式から求まる。

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \dots\dots(3)$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 α は固相の線膨張係数である。

膨潤圧は浸潤によるサクション ψ の低下に伴い発生するものとし、次式で定義する。

$$\pi(\theta_i) = |\Delta\psi| = |\psi(\theta_i) - \psi(\theta_0)| \quad \dots\dots(5)$$

② 地下水の連続式

$$\left\{ (1-\chi) \rho_l D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) + \chi \frac{\rho_l^2 g K}{\mu_l} h_{,i} \right\}_{,i} + \left\{ \rho_l D_T T_{,i} \right\}_{,i} - \rho_{l0} n S_r \rho_l g \beta_p \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_l \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_l S_r \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho_{l0} n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 D_θ は水分拡散係数、 θ は体積含水率、 K は固有透過度である。 μ_l は水の動粘性係数、 ρ_{l0} は初期状態の地下水の密度、 ρ_l は地下水の密度、 S_r は飽和度、 g は重力加速度、 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、 β_p は水の圧縮係数、 β_T は水の熱膨張係数、 z は位置水頭である。

③ エネルギー保存則

$$\begin{aligned}
& (\rho C_v)_m \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho_l C_{vl} V_l T_{l,i} - K_{Tm} T_{,ii} \\
& + L \left\{ D_{\theta v} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) \right\}_{,i} \\
& + n S_r T \frac{\beta_T}{\beta_P} \left\{ (1-\chi) D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,i} - z_{,i}) + \right. \\
& \quad \left. \chi \frac{\rho_l g K}{\mu_l} h_{,i} + D_T T_{,i} \right\}_{,i} \\
& + \frac{1}{2} (1-n) \beta T \frac{\partial}{\partial t} (u_{i,i} + u_{j,i}) \delta_{ij} = 0 \quad \cdots \cdots (7)
\end{aligned}$$

ここで、 L は単位体積あたりの水蒸気の潜熱、 $D_{\theta v}$ は水蒸気拡散係数である。 $(\rho C_v)_m$ は水と骨格子からなる場の比熱、 K_{Tm} は水と骨格子からなる場の熱伝導係数で、それぞれ次式で求まる。

$$(\rho C_v)_m = n S_r \rho_l C_{vl} + (1-n) \rho_s C_{vs} \quad \cdots \cdots (8)$$

$$K_{Tm} = n S_r K_n + (1-n) K_s \quad \cdots \cdots (9)$$

ここで、 C_{vl} は水の比熱、 C_{vs} は固相の比熱、 K_n は水の熱伝導係数、 K_s は固相の熱伝導係数である。

6.2 粘土物性の設定

粘土の物性は基本的には室内要素試験から直接的に算出される。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。

(1) 水分拡散係数及び水分特性曲線

解析に用いた粘土の固有透過度 K (m^2) 及び水分拡散係数 D_{θ} (cm^2/s) は以下のとおりである。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²¹⁾。

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

$$\begin{aligned}
D_{\theta} = & \frac{(3.68 \times 10^{-8} T - 2.08 \times 10^{-7})(\theta - \theta_s)}{(\theta + 1.00 \times 10^{-3})(-1.00 \times 10^{-3} - \theta_s)} \\
& + \frac{\theta(-3.58 \times 10^{-9} T - 2.19 \times 10^{-7})}{0.41(\theta - 0.41)} \quad \cdots \cdots (11)
\end{aligned}$$

ここで、 θ_s は飽和体積含水率、 T は温度 ($^{\circ}C$) である。

サクシオン ψ (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使い、水分特性曲線を作成した。

(2) 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。

$$D_T = D_{T0} \exp \left(\alpha_T \frac{T - T_r}{T_r} \right) \quad \cdots \cdots (12)$$

ここで、 D_{T0} は基準となる係数の値、 T_r は基準温度、 α_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(12)式における各パラメータは以下のとおりである。

$$D_{T0} = 8.5 \times 10^{-8} \text{ [cm}^2/\text{s}^{\circ}C] \quad \cdots \cdots (13)$$

$$\alpha_T = -1.5 \text{ (} T < 60^{\circ}C \text{)}, 1.5 \text{ (} T \geq 60^{\circ}C \text{)} \quad \cdots \cdots (14)$$

$$T_r = 60^{\circ}C \quad \cdots \cdots (15)$$

(3) 膨潤応力に寄与する係数

ここでは、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²⁶⁾。したがって、膨潤応力に寄与する膨潤圧 π' は、膨潤圧 π にある係数 F を乗じて表わされ则认为する。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力のデータから逆解析で F を定めた。 F の値は以下のとおりである。

$$F = 0.190 \quad \cdots \cdots (16)$$

6.3 ニアフィールド熱-水-応力連成解析

(1) 解析の概要

ここでは、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。

(2) 解析モデル

図10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

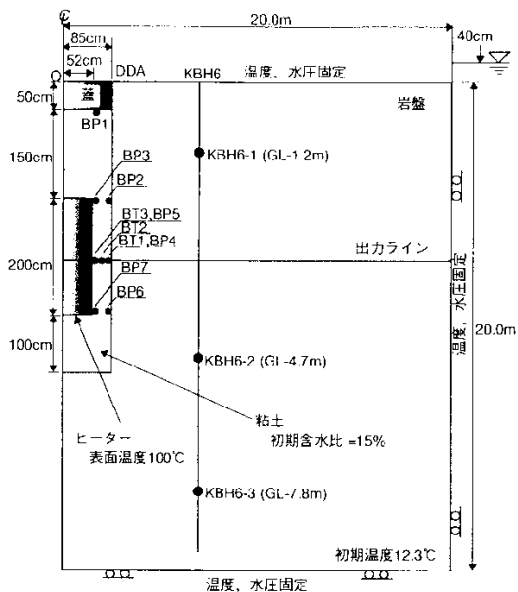


図10 解析モデル図及び結果比較箇所

10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8,592、全要素数は2,793である。

(3) 解析物性値及び初期条件

解析に用いた物性値は表1のとおりである^{21), 28), 29)}。また粘土の比熱 C_v (kJ/(kg·K))、熱伝導率 λ (W/(m·K))に関しては、次式のように含水比 ω (%)の関数として与えた。

$$\text{比熱} : C_v = \frac{42.6 + 4.19\omega}{100 + \omega} \quad \dots\dots(17)$$

$$\text{熱伝導率} : \lambda = 0.050\omega + 0.503 \quad \dots\dots(18)$$

岩盤の不飽和特性に関しては、Watanabeらにより算定されたものを用いた³⁰⁾。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

表1 解析に用いた物性値一覧^{21), 28), 29)}

物性値	ヒーター及び蓋	粘土	岩盤
弾性係数 [MPa]	2.0×10^9	1.0×10^2	2.81×10^4
ポアソン比 [-]	0.3	0.3	0.3
密度 [g/cm ³]	7.80	2.04	2.75
固有透過度 [m ²]	1.0×10^{-27}	2.0×10^{-10}	1.98×10^{-10}
比熱 [kJ/(kg·K)]	0.46	式(17)	0.833
熱伝導率 [W/(m·K)]	53.0	式(18)	2.71
熱膨張係数 [1/K]	1.64×10^{-6}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}

の水圧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、粘土の初期含水比は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。

(4) 解析結果

図11に出力ライン上の温度の経時変化を示す。同図より約4ヵ月後に温度が定常になっていることが分かる。また、図12には粘土内の出力ライン上の含水比の経時変化を示す。粘土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ヵ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なっている。

(5) 実測との比較

図13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、粘土内の温度は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、岩盤内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。粘土内に関しては、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

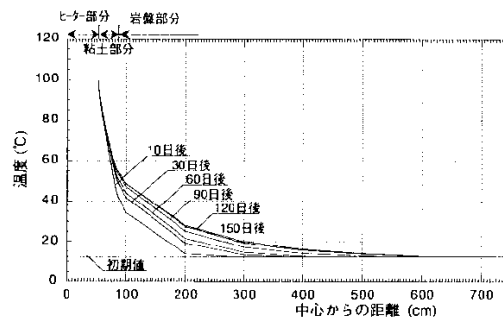


図11 出力ライン上の温度の経時変化

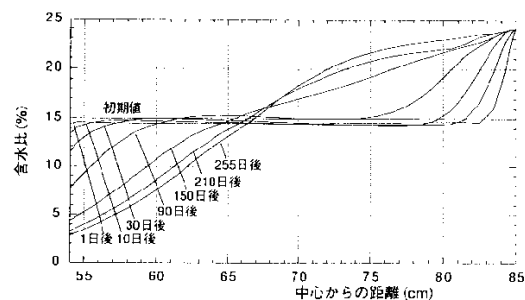


図12 出力ライン上の緩衝材の含水比の経時変化

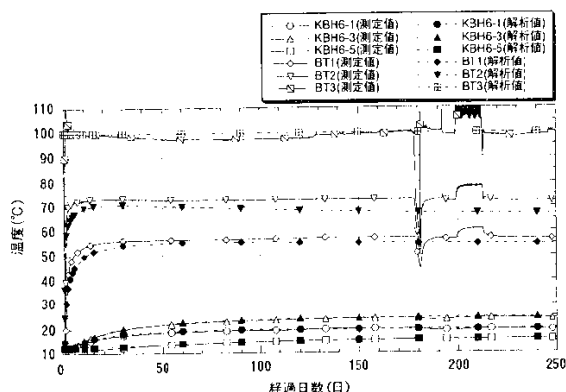


図13 温度の経時変化の解析結果と実測値の比較

の方が低くなっている。これは、粘土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14には粘土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、粘土の外側は比較的早期に飽和となっている。一方、粘土の内側は徐々に含水比が低下しており、200日程度でほぼ定常となっている。また、その時の含水比は約2%である。実測値と比較すると、粘土の中心部分の含水比がいったん上昇しその後減少するといった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。

図15には粘土内圧力の経時変化の解析結果を示す。解析の結果、粘土の外側（岩盤側）の方が内側（ヒーター側）に比べ圧力が高くなる結果となった。また、圧力は加熱開始直後には減少し、そ

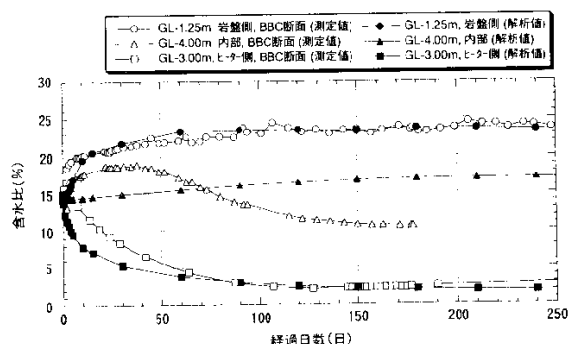


図14 含水比の経時変化の解析結果と実測値の比較

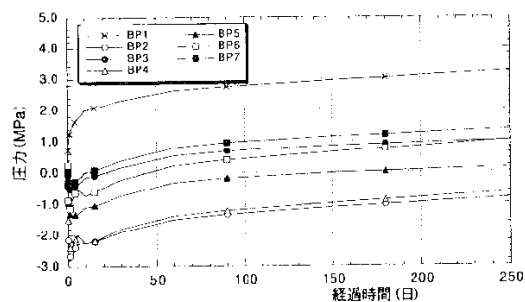


図15 応力の経時変化の解析結果

の後徐々に増加する結果となった。圧力は250日後でも定常に達しておらず、増加し続けている。

7. おわりに

実岩盤において粘土を試験孔内に充填した条件で連成現象に関するデータを取得することを目的に、粘土充填・熱負荷試験を実施した。

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、粘土を充填した。試験孔における湧水量が一日当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1.65g/cm³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粘土内の温度は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日を越えても定常に達することはなく、変化し続けた。

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、粘土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。

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った結果、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。

今後、本解析コードを連成挙動が起こると考えられる高レベル放射性廃棄物処分場周辺の予測解析に供する予定である。

参考文献

- 1) 動燃事業団: “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) 鈴木英明, 柴田雅博 他: "緩衝材の特性試験(1)", PNC TN8410 92-057 (1992).
 - 3) 鈴木英明, 藤田朝雄 他: "緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数", PNC TN8410 96-117 (1996).
 - 4) O. Stephansson, L. Jing, et al.: "Thermo - Hydro - Mechanical Coupling in Rock Mechanics", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.32, No.5 (1995).
 - 5) R. Pusch and L. Borgesson: "Final report of the buffer mass test - volume II, SKB Technical report 85-12 (1985).
 - 6) B. Neerdael, P. Meynendonckx, et al.: "The Bacchus backfill experiment at the Hades under ground research facility at Mol", Belgium, Final Report, EUR 14155 (1992).
 - 7) B. Kjartansson, N. Candler, et al.: "In Situ Assessment of Bentonite/Sand Buffer Material", *Joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering*, p.747~755 (1993).
 - 8) ENRESA: "FEREX Full-scale engineered barriers experiment in crystalline host rock: pre-operational stage, summary report" (1998).
 - 9) S. Sato, A. Kobayashi, et al.: "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) 動燃事業団: "地層処分研究開発の現状(平成5年度)", PNC TN 1410 94-094, p.241~242 (1994).
 - 11) T. Fujita, Y. Sugita, et al.: "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) PNC: "Kamaishi international workshop proceedings", PNC TN7413 98-023 (1998).
 - 13) サイクル機構: "釜石原位置試験地誌報告書", JNC TN7410 99-001 (1999).
 - 14) T. Fujita, Y. Sugita, et al.: "Coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi mine, Technical Note 04-95-04, Fracture characteristics", PNC TN8410 96-061 (1996).
 - 15) M. Chijimatsu, T. Fujita, et al.: "Coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi mine, Technical Note 02-95-02, Instrumentation", PNC TN8410 96-056 (1996).
 - 16) Y. Sugita, M. Chijimatsu, et al.: "Coupled thermo -hydro-mechanical experiment at Kamaishi mine, Technical Note 12-96-05, Instrumentation in buffer mass", PNC TN8410 97-072 (1997).
 - 17) M. Chijimatsu, T. Fujita, et al.: "Coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi mine, Technical Note 09-96-02, Measurements of inflow rate into the test pit", PNC TN8410 97-070 (1997).
 - 18) T. Fujita, M. Chijimatsu, et al.: "Coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 08-96-01, Measurement data related to excavation of the test pit", PNC TN8410 97-246 (1997).
 - 19) D. Gunnarsson, L. Johannesson, et al.: "Field test of tunnel backfilling", Progress report, HRL-96-28 (1996).
 - 20) 杉田 裕, 藤田朝雄 他: "吹付工法を用いた緩衝材の固着性能試験", PNC TN8410 95-179 (1995).
 - 21) T. Fujita, M. Chijimatsu, et al.: "Coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 11-96-04, Fundamental Properties of Bentonite GT-9607", PNC TN8410 97-071 (1997).
 - 22) 杉田 裕, 千々松正和 他: "粘土充填・熱負荷試験における緩衝材充填技術の検証", JNC TN8430 98-003 (1998).
 - 23) 杉田 裕, 藤田朝雄 他: "粘土充填・熱負荷試験におけるベントナイトのサンプリング", JNC TN8430 98-002 (1998).
 - 24) O. Stephansson, L. Jing, et al.: "Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media", *Developments in geotechnical engineering*, 79, Elsevier (1996).
 - 25) 千々松正和, 藤田朝雄 他: "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), p.26~27 (1995).
 - 26) Y. Ohnishi, H. Shibata, et al.: "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, p.263~268 (1985).
 - 27) 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, p.55~66 (1984).
 - 28) M. Chijimatsu, T. Fujita, et al.: "Coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 05-95-05, Laboratory rock property tests", PNC TN8410 95-060 (1995).
 - 29) M. Chijimatsu, T. Fujita, et al.: "Coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 07-95-07, Hydraulic tests", PNC TN8410 96-058 (1996).
 - 30) K. Watanabe: "Back analytical technique for evaluating the hydraulic parameters of unsaturated rock", *Int. Congress on Rock Mechanics* (1991).