

(49) 岩盤内バッファーマステストの 有限要素連成解析的検討

京都大学
間 組

大西 有三
小林 晃

1. はじめに

高レベル廃棄物地層処分安全評価のための原位置計測・実験手法についての国際共同研究がスエーデンのストリーバ地方で行われている。そのプロジェクトの一つとして行われたバッファーマステスト(BMT)は、高圧縮されたベントナイト(HCC)のキャニスター処分孔内の充填材としての機能および砂・ベントナイト材のトンネルバックフィル材としての機能をチェックすることを目標としている。実験は実際に計画されている規模よりやや小さい地下実験施設にキャニスターのかわりにヒーターを埋設して、処分孔内の温度分布、圧力分布、含水率分布およびそれらの経時変化の測定がなされ、熱-水-力の3つの複雑な相互作用について考察がなされた。

解析はPushら¹⁾によるものがあるが、簡単な熱伝導解析、水分の拡散解析にとどまっており、相互作用の影響が測定ではとらえにくいことも手伝って十分な現象把握がなされたとは言い難いと思われる。

そこで、本論では筆者らの開発した応力-浸透-熱移動連成解析コードを用いて、この複雑な現象の解明を試みた。本コードは飽和-不飽和領域を対照としており2次元平面ひずみ及び軸対象を仮定している。また、不連続部を表現するためジョイント要素が組み込まれている。本コードの基本的な機能はすでによく確かめられており十分に信頼できるものである。²⁾

このような複雑な現象の把握には実験と併行して、数値解析的に種々の角度から現象を観察することが非常に有効であり、それらの問題を解明する端緒をうることができるものと思われる。

2. 数値解析手法

本論で用いた応力-浸透-熱移動連成解析の基本方程式は図-1に示したように水の流れ、力学的挙動、熱的挙動の3つが完全に連成したものである。式の詳細については大西ら²⁾に譲るが、理論は熱移動については、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Duhamel-Neuman形式を用いたものである。

数値解析手法にはガラキン有限要素法を用いており、形状関数として変位に8節点4辺形要素、温度と水圧には4節点4辺形要素を用いた。

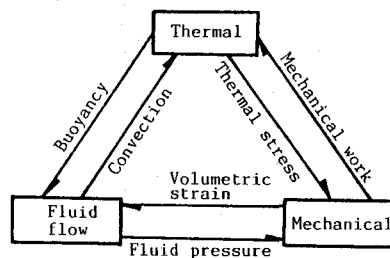


図-1 相互作用の概念図

2.1 材料非線形性

本解析では材料非線形性として、充填材として用いられるHCCの透水係数の間隙比 e 依存性と不飽和部でのサクション ψ と飽和度 S_r の依存性、及び動粘性係数の温度依存性を考慮している。

BMTで用いられたHCCの人工バリアとしての機能を解析的に評価するためには、湿潤過程の透水性変化と膨潤の

表-1 膨潤圧 P_s の温度と密度の関係

ρ (tf/m ³)	P_s (tf/m ²)		
	20°C	70°C	90°C
2.15	4592.	4082.	3571.
2.10	3061.	2041.	1735.
2.05	1531.	1020.	816.
2.00	714.	510.	408.
1.95	459.	306.	255.

関係が必要である。しかし、ストリーバプロジェクトでは不飽和透水特性に関する詳細な実験はなされていないので、本論ではPushら¹⁾のレポートを基に間隙比 e の変化を考慮した以下のような不飽和浸透特性を仮定した。

$$k_0 = 10^{-13} \exp((e-0.26)/1.09 \cdot 2.303) \cdot Sr^{14.27} \quad (1)$$

$$\phi = \exp(-1.76 \cdot e + 7.0) \cdot Sr^{-2.7} \quad (2)$$

これらの式には温度上昇による蒸発は考慮されていない。

2.2 膨潤圧の扱い

HCCは高い膨潤特性を持つNaベントナイトを高圧縮して作られたものであり、膨張圧 P_s を不飽和部ではサクシオンと同等の大きさ、飽和部では表-1を基にその時点の密度 ρ と温度 T より求めた。そして、右辺のフォースベクトルに加えることにより膨潤圧を考慮した。

3. バッファーマステストの解析

本論では、図-2のように簡単にモデル化して軸対象解析を行った。今回の解析ではヒーター強度600Wを設定し、Pushら¹⁾の実験結果より求めた表-2の物性値を用いて行った。解析ケースとして岩盤とHCCの間のスロット部にベントナイトパウダーを設置した場合(ケース1)、と水で埋めた場合(ケース2)の2ケースについて行い、以下の項目について検討した。

- a) 浸潤と膨潤に伴う熱伝導特性の変化
- b) 浸潤と膨潤に伴う浸透特性の変化
- c) スロット部の熱伝導と浸透及び膨潤特性に与える影響

3.1 浸潤と膨潤に伴う熱伝導特性の変化

図-3a), b), c), d)はケース1の処分ホール内の空隙率 n 、飽和度 S_r 、熱伝導係数 k_T および、透水係数 k の分布変化図である。また図-4は温度分布と含水率分布の実測値とケース1の計算値の比較である。

図-3によると、 n は時間とともに膨潤により増大するが S_r は n の変化と浸潤の度合により一時減少した後飽和している。全体としての熱伝導係数は、 S_r の複雑な変化にもかかわらず n の増加により総じて減少する傾向を示している。

図-4によると最終時における温度分布の計算結果と実測値はかなりよい一致を示している。また図-5は各ケースの温度分布経時変化図であるが、ケース1では図-3c)のように3週間目と4ヶ月目ではかなり熱伝導係数分布が

表-2 HCCの物性データ

Property	Value
mass density	2.15 tf/m ³
porosity	0.42
Young's modulus	1.0×10 ⁶ tf/m ²
Poisson's ratio	0.3
thermal expansion coef.	6.0×10 ⁻⁶ °C ⁻¹
specific heat	1220. J/kg°C
thermal conductivity	1.46×10 ⁻³ kJ/ms°C
permeability	1.0×10 ⁻¹³ m ²

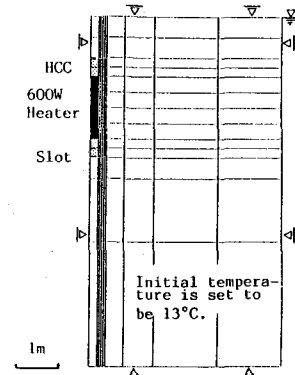


図-2 有限要素メッシュ図

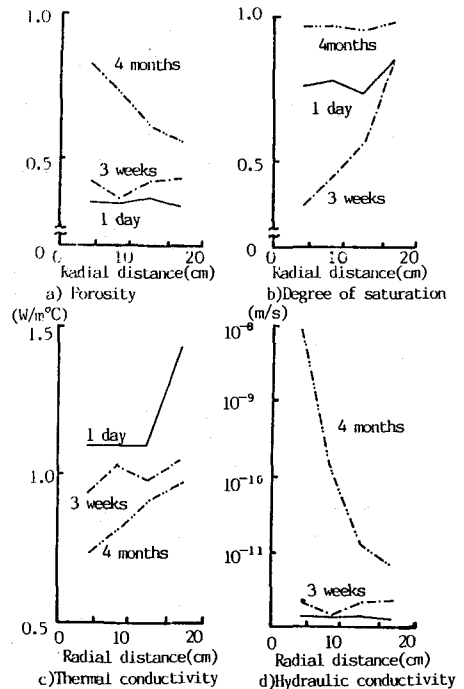


図-3 諸物性のHCC内分布経時変化図

異なるにもかかわらず、温度分布はほぼ同じである。

このように熱伝導率分布は膨潤による空隙率の変化に大きく影響を受け、膨潤とともに低下する。また浸潤による水分量にも影響され、水分量が少ないと熱伝導率は低下するが、これは空隙率の変化よりも寄与は少ないといえる。しかし、熱伝導率分布変化は温度分布には差ほど影響を与えないと言える。

3.2 浸潤と膨潤に伴う浸透特性の変化

透水係数 k は式(1)、(2)からもとまるが図-3によると S_r よりも n に大きく影響を受け、 n の変化に大体比例しているようである。

しかし、図-4の含水率分布の実測値との比較では計算値は実測値よりも高い値になっている。これは実際現象では蒸発とその蒸気の移動が起こっているためであろう。本解析では蒸発は考慮していないので、実測値との差が大きいということは蒸発による水分移動がかなり大きいことを示していると言える。

図-6含水率分布経時変化図と、図-7空隙率分布経時変化図のケース1によると、先述のように地下水の浸潤による膨潤とヒーターの加熱による熱膨張により n が次第に大きくなり、その当初は浸透による水分移動が遅れて飽和度が一時下がるが、式(1)、(2)で表されたように間隙の増加により、透水係数が大きくなり水分の供給がなされるという複雑な不飽和浸透挙動を示している。

また、図-3のd)に見られるように膨潤の仕方により膨張するところと、閉塞するところが現れ、HCC内部の透水係数分布は一様でなくなる。

このように浸潤特性は n に大きく依存するため膨潤とのあり方とあいまって、極めて複雑な挙動を示す。その上実際には蒸発による水分量変化があるため、それによる透水係数の変化が起こりさらに複雑であることが予想される。

3.3 スロット部の熱伝導と浸透及び膨潤特性に与える影響

図-5によると、HCCと岩盤の間のスロットに水を設置したケース2とベントナイトパウダーを設置したケース1とでは初期の温度分布がかなり異なる。ケース1では時間とともに温度が全体的に上昇しているのに対し、ケース2では初期に高い温度を示した後、定常状態へと落ち着いている。

これは、スロット中の水の比熱が高いため、実験初期では熱がスロットを通じて岩盤に伝わらずヒーターから発せられた熱がHCC内に閉じ籠るためと思われる。その後、スロット中

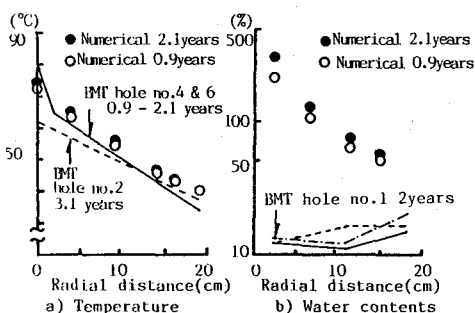


図-4 ケース1の温度分布と含水率分布の実測値との比較

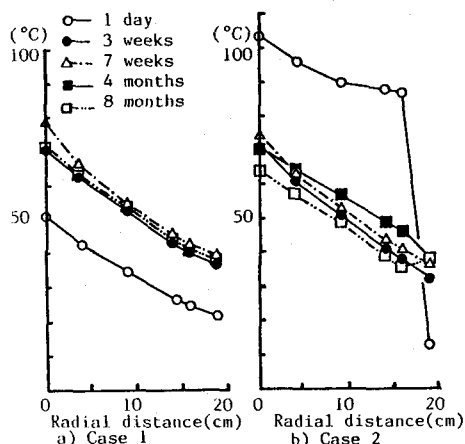


図-5 温度分布経時変化図

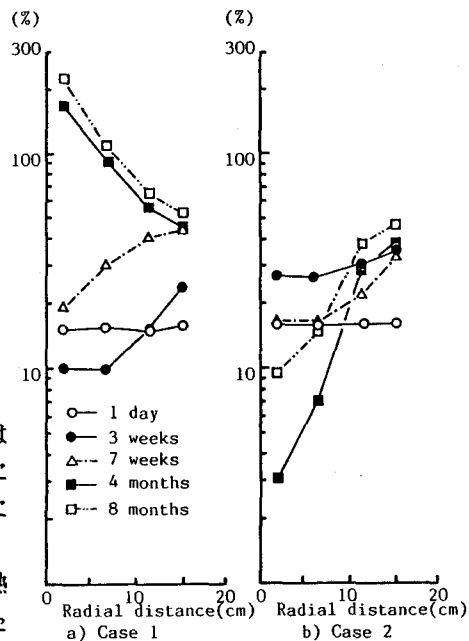


図-6 含水率分布経時変化図

の水が熱を岩盤に伝え始めると、HCC内の温度が下がり始める。

図-7によるとケース2は4ヶ月目でヒーターに近い部分の空隙率がスロットに近い部分より小さくなっているが、これはヒーターの熱による熱膨張よりも岩盤からの水の供給による膨潤のほうがまさり、スロット近傍の膨張によりヒーター近傍の空隙が閉塞したものと思われる。これはケース1とは逆の現象であり、スロットの処置の仕方により膨張の仕方がかなり異なってくることを示唆している。

そして、空隙率分布のあり方が異なると熱伝導率分布もかなり異なるものと思われるが、これは、図-5によると温度分布に与える影響は小さいと言える。

また、図-6ケース2では7週間目で含水率が下がっているが、これは図-7の空隙率分布によると7週間目の分布が3週間目よりやや大きい値となっているので、HCC内の空隙がやや増大したが、それを飽和させる程の水分の供給がこの時点ではなされなかったためと思われる。

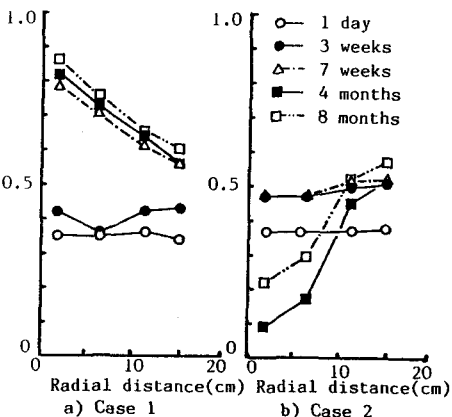


図-7 空隙率分布経時変化図

4. 結論

本論では式1)、2)で表される不飽和透水関数を用いて、筆者らの開発した応力-浸透-熱移動連成コードによるBMTの数値実験を行った。その結果をまとめると以下のように言える。

- 1) HCC内の熱伝導率分布および透水係数分布は水分量の変化よりも空隙率の変化による影響の方が大きく、膨張によりHCC内で一様でなくなる。
- 2) HCC内の熱伝導率分布の複雑な変化は、温度分布にはあまり影響を与えない。
- 3) 蒸発とその蒸気の移動が水分量変化に与える影響は大きい。
- 4) HCCと岩盤間のスロットを水で埋めた場合、キャニスター埋設直後に高い温度を示すことが予想される。
- 5) スロットにバントナイトパウダーを設置した場合と水を設置した場合とでは、HCC内の膨張の仕方が異なり、水で埋めた場合にはスロット近傍で膨潤による膨張の影響が大きくなりスロット近傍で空隙が大きくなる。一方バントナイトパウダーを設置した場合はヒーターの加熱による熱膨張の影響が大きく、逆にスロット近傍で空隙が小さくなる。

以上、今回の解析は多くの仮定の上での結果ではあるが、このように数値解析と実測との比較検討により、実験だけでは把握できないことも推論でき、この結果をもとにさらに絞った実験を行うことにより、現象理解はさらに進むものと思われる。

また、今回の解析で気付いた重要かつ今後の研究が期待されるものとして、式1)、2)で表されるような空隙の変化を考慮した不飽和透水関数と浸潤とともに膨潤する構成関係の確立が挙げられる。これらの理論を確立することにより、より精度の高い解析が可能となり、現象の解明がさらに進むであろう。

参考文献

- 1) Push, R. and Borgesson, L. (1985): Final report of the buffer mass test-Volumell; test results, SK B technical report 85-12.
- 2) Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A. (1985): Development of finite element code for the analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behaviors of saturated-unsaturated medium, Int. Symp. on Coupled Process Affecting The Performance of A Nuclear Waste Repository

(49) FINITE ELEMENT COUPLED ANALYSIS OF BUFFER MASS TEST

IN THE STRIPA ROCK MASS

Yuzo Ohnishi : Kyoto university

Akira Kobayashi : Hazama-gumi

At Stripa project, Buffer Mass Test(BMT) was performed in order to investigate the function of highly compacted Na bentonite as canister overpack and sand/bentonite mixture as tunnel backfill.

It involved prediction of the temperature distribution and swelling pressures and measuring of these quantities. The final report concludes from the BMT project that the physiscal processes involved in the moistening and maturation of the buffer materials under repository conditions are grasped in principle.

But, since the numerical methods in the report are simple, and also it is difficult to measure the effects of coupled phenomena dearly, the coupled processes seemed not to be understood succesfully.

In this paper, we try to understand such complicated phenomena with the finite element code for the analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behaviors of saturated-unsaturated medium which we have developed.

It is concluded that;

- 1)The distribution of heat conductivity and permeability in the buffer material are influenced by the change of prosity rather than water contents.
- 2)The distribution of temperature in the buffer material is not influenced so much by the complicated change of heat conductivity.
- 3)The change of water contents in the buffer mass material is contributed so much by evaporation.
- 4)When the slot that separates the bentonite annulus from the rock is filled with water, the temperature in the buffer material is expected to rise highly at the initial stage.
- 5)In the case the slot is filled with water, the way the buffer material swells is defferent from the way in the case the slot is filled with the bentonite powder.