

# 岩盤の応力-浸透-熱移動連成挙動における 材料物性の非線形性の影響について

EFFECTS OF NON-LINEARITY OF MATERIAL PROPERTIES ON THE COUPLED  
MECHANICAL-HYDRAULIC-THERMAL BEHAVIOR IN ROCK MASS

小林 晃\*・大西有三\*\*

By Akira KOBAYASHI and Yuzo OHNISHI

The nonlinearity of material properties used in the coupled mechanical-hydraulic-thermal analysis is investigated from the past literatures. Some nonlinearity that is respectively effective for the system is introduced into our computer code for analysis such a coupling problem by using finite element method. And the effects of nonlinearity of each material property on the coupled behavior in rock mass are examined for simple model and Stripa project model with the computer code.

*Keywords : FEM, nonlinearity, coupling problem, nuclear waste*

## 1. はじめに

近年、地熱発電、地下滯水層の蓄熱利用あるいは、高レベル放射性廃棄物の地層処分などに関連して、熱移動現象を伴う地盤挙動に対する研究が盛んになってきている。これらのプロジェクトは、その安全性、効率性を検討するため地盤の力学的挙動、水力学的挙動および熱力学的挙動を考えなければならず、さらにはそれらの連成挙動の影響も検討する必要がある。すでに、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関しては、欧米諸国において大型の地下実験施設を設けるなど、大規模に岩盤内の応力-浸透-熱移動連成挙動の解明に力が注がれている。しかし、相互作用や地盤の非線形性のためこのような複雑な連成現象を実験的に把握することは簡単ではない。そのため解析的研究により連成現象を把握することも盛んになりつつあり<sup>1),2)</sup>、著者らもすでに有限要素法を用いた応力-浸透-熱移動連成解析手法を発表している<sup>3),4)</sup>。

一方、岩石や岩盤の諸物性の熱的および力学的な非線形性に関する研究は室内実験を中心に行われてきたが、

それは個々の岩石や岩盤について行われたものであり、それらを統合分析して解析に用いた例は少ない。

そこで本論文では、既往の非線形性に関する研究についてできるかぎり調査し、比較的影響の大きいと思われる材料物性の非線形性がどのように応力-浸透-熱移動連成挙動に影響を与えるのかということを著者らの開発した解析手法を用いて検討した。

## 2. 支配方程式と材料非線形性の項目

飽和-不飽和領域を対象とした応力-浸透-熱移動連成解析の支配方程式として用いたものは次のようにある。

$$\left[ \frac{1}{2} C_{u,i} (u_{k,i} + u_{i,k}) - \beta \delta_{ij} (T - T_0) + \chi \delta_{ij} \rho_s g h \right], \\ + \bar{\rho}_s b_i = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$[\rho_r k(\theta) h_{,i,i} - \rho_r n S_r \rho_s g \beta_p \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_s C(\Psi) \frac{\partial h}{\partial t} \\ - \rho_r S_r \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho_r n S_r \beta_r \frac{\partial T}{\partial t}] = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$(\rho C_v)_m \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho_r C_{v,r} v_{r,i} T_{,i} - K_{rm} T_{,ii} + n S_r T \frac{\beta_r}{\beta_p}$$

$$+ k(\theta) h_{,i,i} + \frac{1}{2} (1-n) \beta T \frac{\partial}{\partial t} (u_{i,j} + u_{j,i}) \delta_{ij} = 0 \\ (i, j, k, l=1, 2, 3) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここに、 $C$  は弾性定数、 $u$  は変位、 $T$  は温度、 $\chi$  は

\* 正会員 京都大学研修員、間組技術研究所  
(〒338 与野市本町西4-17-23)

\*\* 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学部交通土木工学科  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

Bishop の不飽和パラメーター,  $\rho$  は密度,  $h$  は全水頭,  $b$  は物体力,  $k$  は透水係数,  $\theta$  は体積含水率,  $n$  は空隙率,  $S_r$  は飽和度,  $g$  は重力加速度,  $\beta_p$ ,  $\beta_f$  はそれぞれ流体の圧縮係数と温度膨張係数,  $t$  は時間,  $C(\Psi)$  は比水分容量,  $C_v$  は比熱,  $K_T$  は熱伝導係数を表わし, 添え字  $f$  は流体,  $s$  は固体,  $f_0$  は基準時の流体である。また,  $\beta$  は温度変化によって生じる応力を求めるときの係数である。これは等方弾性体の場合  $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha_s$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$  は Lamé の定数,  $\alpha_s$  は固体の熱膨張係数となる。そして,

$$(\rho C_v)_m = n S_r \rho_f C_{vf} + (1 - n) \rho_s C_{vs} \dots \dots \dots (4)$$

$$K_{rm} = n S_r K_{rf} + (1 - n) K_{rs} \dots \dots \dots (5)$$

$$\bar{\rho}_s = \rho - \chi \delta_{ts} \rho_f \delta_{ts} \dots \dots \dots (6)$$

であり,  $\rho$  は地盤の密度である。

本方程式の誘導過程については著者らの前論文<sup>3)-5)</sup>に譲りここでは省略するが, 用いた主な仮定は次のようにある。

- 1) 地盤は等方な線形弾性多孔体とする。
- 2) 土中水の流れはダルシー則に従う。
- 3) 空気圧はすべての地点でゼロと仮定し, 液相・気相間の相変化(氣化, 液化)は考慮しない。
- 4) 各相間の熱交換は考慮しない。
- 5) 熱伝導は Fourier 則に従う。
- 6) 水の密度は, 温度変化と水圧変化により変わる。
- 7) 固体の密度変化は無視する。

本方程式中, 式(1)の第3項, 式(3)の第4項が, それぞれ力学的なつり合い方程式と熱力学的なつり合い方程式における水力学的な連成項で, 式(1)の第2項, 式(2)の第5項が, それぞれ力学, 水力学的なつり合い方程式における力学的な連成項であり, そして, 式(2)の第4項, 式(3)の第5項が水力学, 熱力学的なつり合い方程式における力学的な連成項である。このようにこれらの方程式は力学, 水力学, 熱力学の相互の効果をすべて考慮したものとなっている。そして, (1), (2), (3)の方程式から未知数  $u_t$ ,  $h$ ,  $T$  を求めるために必要な物性データは,

- 1) ヤング率  $E$
- 2) ポアソン比  $\nu$
- 3) 固体の熱膨張係数  $\alpha_s$
- 4) 流体の基準密度  $\rho_{f0}$
- 5) 固体の密度  $\rho_s$
- 6) 透水係数  $k$
- 7) 初期空隙率  $n_0$
- 8) 流体の圧縮係数  $\beta_p$
- 9) 流体の熱膨張係数  $\beta_f$
- 10) 不飽和透水関数  $k(\theta)$
- 11) 比熱  $C_v$
- 12) 热伝導係数  $K_T$

であり, 本論では以上の物性データのうち, 4), 7) の初期状態に関する量を除いた他の材料物性について調査, 検討することにする。

また, 1. で述べたように地盤中の熱力学的現象が問題となるようなプロジェクトは主に岩盤内に想定されているので, 本論では, 固体は岩盤を対象として調査した。

特に近年高レベル放射性廃棄物処分の調査で花こう岩に対する物性調査が盛んであるので例としては花こう岩を中心としたデータを示した。なお, 例として示した図には調査した既往の研究成果を整理・統合して示した。

### 3. 材料非線形性の一般的傾向

#### (1) ヤング率 $E$

結晶質岩石の  $E$  は一般に温度上昇により減少する。その原因としては,

a) 造岩鉱物自身の  $E$  の変化

b) 鉱物粒子の界面における応力解放の影響

が考えられる。a) の鉱物自身の  $E$  は石英, 斜長石とも高温になるほど減少する。また, b) は鉱物の異方性と, 热膨張により, 粒子間の界面にひずみが蓄積し, やがて亀裂が生じるために応力が解放される。一方, ガラス質岩石では, 鉱物が等方性であるため热膨張に伴い密になっていき, b) の影響は,  $E$  を上昇させる方向に働くものと考えられている<sup>6)</sup>。図-1 に花こう岩の  $E$  の温度依存関係を示す。

また, 力学的な依存性はすなわち応力-ひずみ関係であるが, 一般に, 応力が増加すると  $E$  は減少し, 温度増加による減少率は小さくなる。これは, 拘束力の増加により, b) の影響が小さくなるためと思われる<sup>7)</sup>。

そして, 加熱後に冷却した場合, a), b) の影響はあ

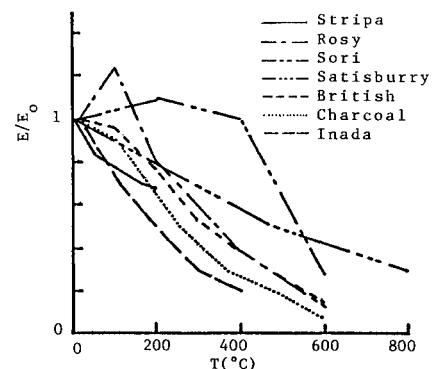


図-1 種々の花こう岩の弾性係数と温度の関係  
(下岡ら<sup>6)</sup>, Heuze<sup>7)</sup>)

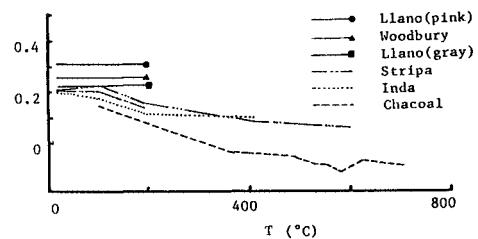


図-2 種々の花こう岩のポアソン比と温度の関係  
(下岡ら<sup>6)</sup>, Heuze<sup>7)</sup>)

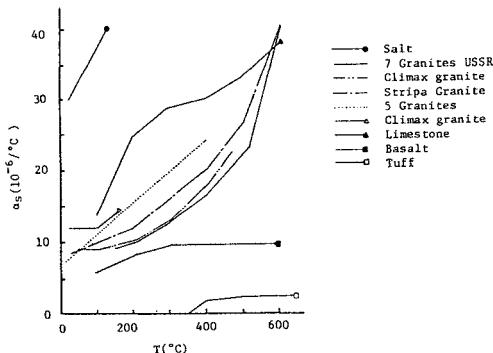


図-3 種々の岩の線膨張係数と温度の関係  
(下岡ら<sup>6)</sup>, Heuze<sup>7)</sup>

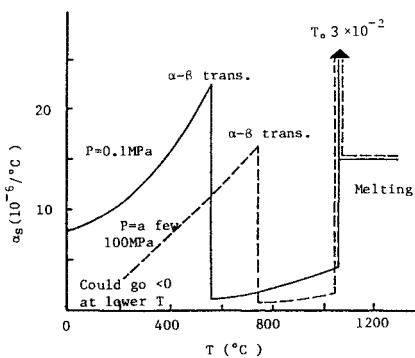


図-4 花こう岩の線膨張係数の温度と圧力依存性の模式図  
(Heuze<sup>7)</sup>)

る程度回復するが、粒子界面の乱れは残るために、温度履歴による塑性ひずみが生ずる<sup>6)</sup>。

## (2) ポアソン比 $\nu$

温度上昇とともに減少傾向を示すものもあるが、ほとんど変化しないものもある。図-2に花こう岩の温度- $\nu$ 関係を示す。

また、力学的依存性については、破壊応力に近づくと体積変化が小さくなり、 $\nu$ は0.5に近づくが、それまでの応力レベルではたとえば花こう岩の場合、応力変化によってほとんど変化を示さなかつたという報告もある<sup>7)</sup>。

## (3) 固体の熱膨張係数 $\alpha_s$

ほとんどの造岩鉱物が温度上昇に伴い、線膨張率が増加するので、その集合体である岩石の線膨張率も温度上昇に伴い増加する<sup>6)</sup>。図-3に種々の岩石に対する温度-線膨張率関係を示す。

特に、花こう岩の温度依存性は強く、石英の  $\alpha$ - $\beta$  変換（常圧下、573°C）直前あたりから急激に増加しピークを示す。そしてその後減少し破壊に至るものもある。また、力学的依存性は500°C以下の場合は熱膨張による粒子界面のクラックの発生を妨げるような圧力下で

は、 $\alpha_s$ の圧力依存性は小さく、500°C以上の場合は圧力が増加すると  $\alpha$ - $\beta$  変換の温度が高くなるため、より高い温度でピークを示すがそのピーク値は低くなる。そしてピーク後の減少率は圧力が大きいほど大きい<sup>7)</sup>（図-4）。

また、異方性については、結晶質岩石の場合でも、種々の鉱物が含まれていることと、結晶軸の方向も任意に存在することから、 $\alpha_s$ については等方と考えてよい<sup>6)</sup>。

## (4) 固体の密度 $\rho_s$

密度  $\rho$  は一般に温度  $T$  と圧力  $P$  の関数として次のように書ける。

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial P} dP + \frac{\partial \rho}{\partial T} dT \quad \dots \dots \dots (7)$$

固体についても同様の関係があるようだが、たとえば花こう岩の場合、 $\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial P} = 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ 、 $\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial T} = 3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  とその非線形性はきわめて小さい<sup>8)</sup>。

## (5) 透水係数 $k$

透水係数は一般に次のように書ける。

$$k = \frac{k_0}{\eta} \rho g = \frac{k_0}{\mu} g \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $k_0$  は固有透水係数で次元は [L<sup>2</sup>]、 $\eta$  は粘性係数で次元は [ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>]、 $\mu$  は動粘性係数で次元は [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>] である。したがって重力単位系を用いると、

$$k = \frac{k_0}{\mu} \quad \dots \dots \dots (9)$$

となる。そこでまず、 $k$  を物質の骨格構造だけから決まる  $k_0$  と、流体の性質である  $\mu$  に分けて考えることにする。

### a) 固有透水係数 $k_0$

岩盤中の流体が移動する空間は、岩体中の微小空隙と亀裂からなる空隙がある。岩体中の微小空隙は、温度上昇により、(1) のヤング率のところで述べたように岩体内部に亀裂が生じたりするので空隙率は大きくなり、岩体自体は膨張しようとする。一方、岩体と岩体に挟まれた形で存在する亀裂は逆に閉じる傾向になる。一般に、岩盤中の流れを支配するのは亀裂であるので、岩盤全体としては後述するように  $k_0$  は小さくなる<sup>7)</sup>。この有効空隙の減少は結局、熱によって生じる応力により起こるので、 $k_0$  の変化は岩盤内に生じる応力に依存することになる。

### b) 動粘性係数 $\mu$

水の  $\mu$  は温度の上昇とともに単純に減少する<sup>9)</sup>（表-1）。

表-1 各温度における水の動粘性係数  $\mu$ <sup>9)</sup> ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )

°C	$\mu$	°C	$\mu$	°C	$\mu$
0	1.792	40	0.658	80	0.365
10	1.307	50	0.554	90	0.326
20	1.0038	60	0.475	100	0.295
30	0.801	70	0.413		

1). 一方、圧力依存性に関してはこれに関する文献は見当たらなかった。一般的の液体は高圧になると粘性を増すが、約30°C以下の水の $\eta$ は例外的な挙動を示し、圧力増加とともに減少しピークを示した後増大傾向へと移る。そしてこの極小値を示す圧力は温度上昇とともに低下し、30°Cぐらいでこのピークは消滅しそれ以上の温度では温度上昇とともに単調に増加する<sup>10)</sup>。しかし、 $\eta$ の応力依存性はHodgkinson<sup>8)</sup>が $\frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial P} = 10^{-9} \text{m}^2 \text{N}^{-1}$ と見積もっておりその非線形性は小さい。

### c) 透水係数 $k$

温度上昇に伴い $k_0$ は減少するが $\mu$ も減少するため相殺される形となる。既往の現地実験の結果をみると、10~4倍の減少を示すもの<sup>7)</sup>もあれば、若干の上昇を示すものもある。これは主に試験方法によりその差ができるものと思われる。たとえばルジオン試験のように水を高圧で注入する場合、亀裂の熱応力によって閉じようとする動きが水圧によって妨げられ、 $\mu$ の減少により結果的に注入量が増加し透水性がよくなつたようにみえるのである。一方、Stripaプロジェクト(高レベル放射性廃棄物処分に関する国際研究プロジェクト)で行われたような広域透水試験<sup>11)</sup>(長さ33mのトンネルへの流入量をトンネル内の湿度変化で測定し、トンネル周辺に設けられたボアホールを用いた水圧測定から動水勾配を求めるもの)では岩盤全体の透水係数は温度上昇とともに4倍ほど減少する傾向を示している。以上のことから自然の水圧下では $k$ は温度上昇により $\mu$ の減少にもかかわらず $k_0$ の減少の方が大きいため結果として減少すると考えるのが妥当である。一方、力学的依存性は、岩盤内の応力変化による $k_0$ の変化に主に依存するものと思われる。また、水圧により、亀裂中の挟在物が移動して亀裂をふさいだり、あるいは押し流されたりして透水性が変化することがあるが、これについてはまだ実態はよくわかっていない。

### (6) 流体の圧縮係数 $\beta_p$

1気圧下では、0°Cから温度上昇に伴い $\beta_p$ は減少し46°Cで極小値をとりその後増加する傾向を示す。しかし始めの減少傾向は圧力が増加するにつれて小さくなり約3000気圧で全く消滅する<sup>10)</sup>。

一方、力学的依存性は圧力増加とともに上昇する傾向を示し、20°Cで1気圧から1000気圧に上昇すると約1.3倍になる<sup>9)</sup>。

### (7) 流体の熱膨張係数 $\beta_r$

水の密度は1気圧下では0°Cから温度上昇に伴い増加し、3.98°Cで最大となりその後減少する。本論では水の密度変化は

$$d\rho_r = \rho_{r0}(-\beta_r dT + \beta_p dP) \dots \dots \dots (10)$$

と扱っているので、 $\beta_r$ は0°Cから3.98°Cまで負、それ

表-2 各温度における水の定積比熱<sup>9)</sup> (J/gk)

°C	C_v	°C	C_v	°C	C_v	°C	C_v
0	4.2174	25	4.1793	50	4.1804	75	4.1925
5	4.2019	30	4.1782	55	4.1821	80	4.1961
10	4.1919	35	4.1779	60	4.1841	85	4.2002
15	4.1855	40	4.1783	65	4.1865	90	4.2048
20	4.1816	45	4.1782	70	4.1893	95	4.2100

以上の温度では正となる。

一方、圧力依存性は0°Cでは約4000kg/cm<sup>2</sup>まで温度上昇とともに増加し、それ以上の圧力では減少する。しかし、40°Cでは圧力に依存しなくなり、それ以上の温度では圧力上昇とともに減少する。

### (8) 不飽和透水関数 $k(\theta)$

岩石の不飽和透水関数は土に近いものから泥岩ぐらいまでなら実測された例はあるが、それ以上の硬岩では現在のところ測定不能のようである。また、亀裂内の不飽和水分挙動も現在のところよくわからない点が多い。しかし土に関しては従来多くの実験的、解析的研究がなされており、土の不飽和透水係数は土中水の粘性、間隙の形、大きさ、曲折、拡縮、分岐連結、土粒子の表面活性、および土中水分の大小に依存していると考えられている。

このような依存性は岩についても同様と考えられ、岩盤中の間隙の形態に関する事項は(5)a)の $k_0$ によって表わされ、水の粘性は(5)b)で述べたとおりであろう。また、土中水分は、温度上昇による水蒸気への相変化によってその量が変化することが予想されるが、この変化の実測例は土に関して多くはなく、岩については今回の調査の範囲では見当たらなかった。そして、表面活性については、岩盤内でどのように水分が保持されるのかがわかっていないので、この影響についても現在のところ不明である。このように土、岩とも不飽和透水関数の温度や応力の依存性はよくわかっていないのが現状ではあるが、解析ではたとえば、Pruessら<sup>12)</sup>はその時点の流体の密度と内部エネルギーから蒸気線図を用いて飽和度を求め、その飽和度から不飽和透水係数を求めている。また、土壤物理の分野では土中水分量と直接関係しているマトリックポテンシャルが、温度と体積含水率の関数となるとして水分量変化を求める手法がよく行われている。

### (9) 比熱 $C_v$

#### a) 流体の比熱 $C_{v,r}$

水の比熱は、0°Cから温度上昇とともに減少し、37.5°Cで極小値をもち、その後上昇する<sup>9)</sup>(表-2)。

一方、圧力依存性については文献が少なく、実測した例は見当たらなかったが、Hodgkinsonら<sup>8)</sup>は熱力学的関

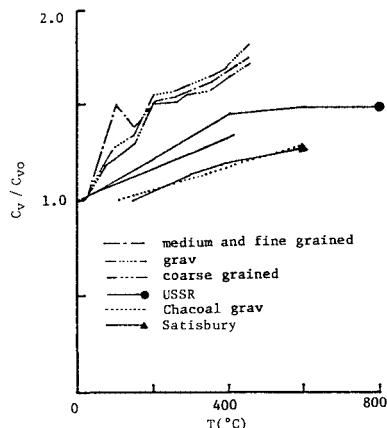


図-5 種々の花こう岩の定積比熱と温度の関係  
(下岡ら<sup>6)</sup>, Heuze<sup>7)</sup>

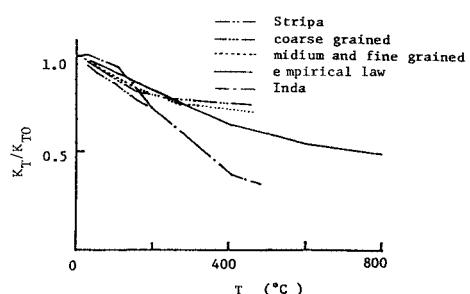


図-6 種々の花こう岩の熱伝導率と温度の関係  
(下岡ら<sup>6)</sup>, Heuze<sup>7)</sup>

係を用いて  $\frac{1}{C_{vs}} \frac{\partial C_{vs}}{\partial P} = 6 \times 10^{-2} \text{m}^2 \text{N}^{-1}$  と見積もっている。

### b) 固体の比熱 $C_{vs}$

造岩鉱物のほとんどの比熱が温度上昇とともに増加するために多くの岩石も増加傾向を示す。また、造岩鉱物自体の比熱が、700~1 000 J/kg°C と狭い範囲に集中するために岩種による差は小さい<sup>6)</sup>。図-5に花こう岩の  $C_v$  の温度依存関係を示す。

一方、応力依存性は一般に密度が大きくなるほど比熱は小さくなるので、圧縮応力の増加に伴い減少することが予想されるが詳細なデータは得られなかった。

### (10) 熱伝導係数 $K_T$

#### a) 流体の熱伝導係数 $K_{Tf}$

温度上昇に伴い  $K_{Tf}$  は単純に増加する。一方、圧力依存性については、今回の調査の限りではこれに関する文献は見当たらなかった。しかし、水の圧力依存性は温度依存性と比較すると小さいことより、熱伝導についても同様に圧力依存性は熱依存性よりも小さいことが予想される。

#### b) 固体の熱伝導係数 $K_{Ts}$

本論では固体として岩盤を想定している。その熱伝導率は岩盤中の空隙中の物質存在状態、そして岩石自体の熱伝導特性に支配されるものと思われる。

結晶質の鉱物自体は温度上昇とともに熱伝導率が減少するが、ガラス質の鉱物は逆に増大する。また、岩体中の微小空隙形態の熱依存性はその造岩鉱物自体の結晶度の違いによりさまざまである<sup>6)</sup>。このように岩盤の熱伝導率の熱依存性の要因は複雑である。

しかし花こう岩の場合、200°C付近までは温度上昇に伴いほぼ直線的に低下することが知られており、経験式として次式のような提案式<sup>7)</sup>もある。

$$K_{Ts} = 6.3 \times 10^{-3} \times (6.7 \times 10^{-6} T)$$

$$+ (3.41 \times 10^{-9} T^2) \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg} \dots\dots\dots(11)$$

既往の花こう岩に関する調査によると、その減少率は大体、 $\frac{1}{K_{Ts}} \frac{\partial K_{Ts}}{\partial T} = 10^{-3} K^{-1}$  程度である。図-6に花こう岩の  $K_{Ts}$  の温度依存関係を示す。

一方、圧力依存性は、90 MPa の増加で 10 % 増加したという報告<sup>7)</sup>もあるが、これは圧縮応力により岩石内の空隙が減少し、比較的熱伝導率の小さい空気層が減少したため、総じて増加傾向を示したものと思われる。

### 4. 材料非線形性の比較および検討

以上で応力-浸透-熱移動連成解析に必要な物性データの非線形挙動の一般的傾向がわかった。

表-3は非線形性の程度の一覧表である。これによると、単位温度あるいは、単位 N/M<sup>2</sup> 変化当たり  $|10^{-3}|$  以上の物性値の変化を示す非線形性の比較的強いものは、 $k_0$  の熱依存性、 $\mu$  の熱依存性、 $C_{vs}$  の熱依存性、 $K_{Ts}$ 、 $K_{Tf}$  の熱依存性、そして  $\alpha_s$  の熱依存性であろう。また、 $C_{vs}$  の熱依存性も次に大きく既往の実験データも豊富なことからこれについても検討することにする。 $\beta_T$ 、 $\alpha_s$ 、 $C_{vs}$  やび  $K_{Tf}$  の力学的依存性、 $\beta_p$  の熱依存性については今回の調査の範囲では定量的なデータが得られなかつたが  $\alpha_s$ 、 $\mu$ 、 $K_{Ts}$  の力学的依存性はかなり小さいものと思われる。本論ではこれらについては一定として扱うこととする。また  $E$  の熱および応力依存性についてはその非線形性は強いが岩盤としては亀裂の存在の仕方に大きく依存し、定性的にもよく理解されていない部分も多い。しかし  $E$  の非線形性については多くの研究がなされておりその成果も出つつある。また、 $E$  が熱依存性をもてば熱応力も温度に対して非線形性をもつようになる。そこで今回は  $E$  を一定とし、熱応力による、熱膨張および  $k_0$  の熱依存性の評価が難しくなることを避けた。以下、上記各物性の扱いについて検討する。

- 1)  $\mu$ 、 $C_{vs}$ 、 $C_{vs}$ 、 $K_{Ts}$ 、 $K_{Ts}$ 、 $\alpha_s$  の熱依存性

表-3 材料非線形性の一覧表

項目	弾性係数 E	ボアソン比 ν	熱膨張係数		密度		透水係数 k
			固	流	固 ρ_s	流 ρ_f	
固・液体	固	固	K <sup>-1</sup>	K <sup>-1</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	cm/s
単位	kg/cm <sup>2</sup>	—	—	—	—	—	—
代表値	10 <sup>5</sup> ~10 <sup>6</sup>	0.2~0.3	6×10 <sup>-6</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	2.6~2.7	1	10 <sup>-10</sup> ~10 <sup>-12</sup>
熱依存度	-10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup> ~10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-3×10 <sup>-5</sup>	-5×10 <sup>-4</sup>	0.2
力学的依存度	? *1	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-10</sup>	?	?	10 <sup>-10</sup>	5×10 <sup>-10</sup>	-10 <sup>-8</sup>
項目	固有透水係数 k <sub>o</sub>	動粘性係数 μ	圧縮係数 β <sub>p</sub>	比熱	比熱	熱伝導率	
固・液体	固	流	流	固 C <sub>vs</sub>	流 C <sub>vf</sub>	固 K <sub>LS</sub>	流 K <sub>f</sub>
単位	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /sec	cm <sup>2</sup> /kgf	J/kgK	J/kgK	W/mK	W/mK
代表値	10 <sup>-15</sup> ~10 <sup>-18</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup>	800~1000	4200	2.9	6×10 <sup>-1</sup>
熱依存度	-10 <sup>-2</sup>	*3	-10 <sup>-2</sup>	? *2	5×10 <sup>-6</sup>	±10 <sup>-5</sup>	-10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-3</sup>
力学的依存度	-10 <sup>-8</sup>	?	3×10 <sup>-9</sup>	-10 <sup>-11</sup>	?	5×10 <sup>-9</sup>	? *

\*1 強い依存性があるが岩盤については不明な点も多い。(式)任意の物性Bに対するHの依存度は

\*2 複雑な非線形挙動を示す。

\*3  $\frac{E}{1-2\nu} \cdot \alpha = 1$  MPaとして計算した。

? データ不足のため定量的な表現ができなかった。

$$= \frac{1}{B} \frac{2B}{B+3H} \times 100$$

として求めた値であり、Hは熱依存度については

℃、力学的依存度についてはN/m<sup>2</sup>で求めている。

$\mu$ ,  $K_{Ts}$ ,  $C_{vs}$  は単純な減少あるいは増加傾向を示し、その程度は大体表-3に示したとおりである。また、 $K_{Ts}$ ,  $\alpha_s$  も岩種によりその傾向は異なるが、花こう岩の場合、 $\alpha$ - $\beta$  変換が発生する温度以下では単純な減少あるいは増加の傾向を示す。しかし、 $C_{vs}$  は前述のように極小値をもつ複雑な依存性を示す。そこで本論では  $K_{Ts}$ ,  $K_{Ts}$ ,  $C_{vs}$ ,  $\alpha_s$  については表-3に示したような程度で線形に変化していくものとし、 $\mu$ ,  $C_{vs}$  については、表-1, 2 をもとにその時点の温度に対応する値を線形補間により求めることにした。

## 2) $k_0$ の熱および応力依存性

$k_0$  は前章で述べたように熱応力を含めた岩盤内の応力状態に依存している。

Iwai<sup>13)</sup>は単一亀裂内の流れと亀裂面に垂直方向に働く繰返し荷重  $\sigma_e$  との関係を数種の岩石について実験し、その結果を過去に提案されている応力-浸透関係式に用い、それらの妥当性を検討している。彼は、Louis と Gangi の式に実験結果を適用し両方とも定数が一定に求まらないことを指摘している。そこで、その折衷案ともいえる Goodman の提案した応力-亀裂幅変化関係<sup>14)</sup>を応用した次のような応力-浸透関係式を提案した。

$$\frac{k_d}{k_{d0}} = \frac{1}{\left[1 + A \left(\frac{\sigma_e}{\zeta}\right)^t\right]^3} \quad (12)$$

ここに、 $k_{d0}$  は初期状態の  $k_d$ ,  $k_d$  は流出量を水頭差で割ったもの、 $A$ ,  $\zeta$ ,  $t'$  は亀裂の定数である。そして、この関係式は実験結果をよく表現でき定数も一定になることを報告している。さらに、Kelsall ら<sup>15)</sup>は、式(12)を応用して Stripa プロジェクトで行われた広域透水試験結果をよく再現した。これらの研究は等温下での試験結果とよく一致していることと、 $\mu$  の力学的依存性が小さいことより、式(12)の表示は亀裂の  $k_0$  变化による

透水性変化を表わしていると考えられる。本論では式(12)を岩盤における  $k_0$  の応力依存（熱応力も含む）関係に用いることを検討した。

まず、Kelsall らの手法にならい式(12)から次式を導く。

$$\frac{k_e}{k_{ed}} = \frac{\left[1 + A \left(\frac{\sigma_{eo}}{\zeta}\right)^t\right]^3}{\left[1 + A \left(\frac{\sigma_e}{\zeta}\right)^t\right]^3} \quad (13)$$

ここで  $k_e$  は  $\sigma_e$  で表わされる応力状態での  $k_0$  であり、 $k_{ed}$  が基準となる応力状態  $\sigma_{eo}$ 、たとえば現位置透水試験を行った箇所の応力状態における  $k_0$  であり、 $k_{ed}$ ,  $\sigma_{eo}$  とも既知とする。ここで用いた  $\sigma_e$ ,  $\sigma_{eo}$  は、 $k_e$  の方向と垂直な方向、すなわち亀裂面に垂直な方向に働くその時点における有効応力である。本論ではこの Kelsall らの手法を有限要素法に適用するため、 $k_0$  の異方性を考慮し、式(2)の左辺第1項を  $|\rho_j k(\theta)_{ij} h_{j,i}|$  として扱っている。そして、 $\sigma_e$ ,  $\sigma_{eo}$  はその主方向に垂直な方向に働く有効応力を用いている。すなわち、 $\sigma_{eij}$  の変化に従い、異方性を考慮した固有透水係数テンソル  $k_{eij}$  が式(13)により変化し、式(9)を用いて  $k(\theta)_{ij}$  を求めている。

本手法に用いられている大きな仮定は、元来亀裂内だけの流れと応力の関係式である式(12)を岩盤に適用するため、岩体自体は不透水と仮定し、岩盤の見掛けの  $k_0$  として

$$k_0 = \frac{Q_{fracture}}{S} \mu' \quad (14)$$

という関係を用いていることである。ここで、 $Q_{fracture}$  は亀裂を通って流出する流量、 $S$  はその亀裂を含む岩盤面積で、 $\mu'$  はそのときの温度の流体の動粘性係数である。したがって、本節で述べた  $k_0$  の応力依存性を本手法のような連続体としての解析に用いるためには、浸

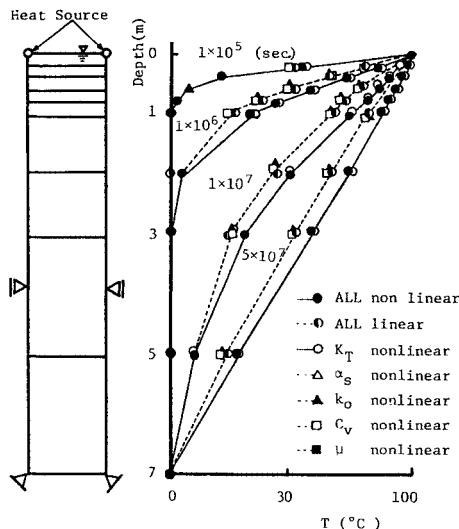


図-7 モデル図と熱源 100°C のときの温度分布経時図

表-4 初期状態の物性値

E	$5 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$	$\nu$	0.33	$k_s$	$1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$
C_s	$8.371/\text{kg}\cdot\text{°C}$	$K_s$	$3 \times 10^{-3} \text{ kJ/m sec}\cdot\text{°C}$	$\alpha_s$	$8 \times 10^{-6}$
A	0.0276	$\zeta$	0.00217	$t'$	0.728

透流が亀裂に支配されるような岩盤、すなわち、亀裂が連続しており、岩体マトリックス部の浸透が無視できるような場合に限られる。また式(12)を導く際、Iwaiは3乗則を用いていることから、亀裂内の浸透が3乗則に従うことも適用条件となる。

## 5. 連成挙動における材料非線形性の影響

次に以上のような材料非線形性が連成挙動に及ぼす影響について考察する。

まず  $k_o$  以外の物性はすべて温度変化あるいは温度に直接依存しているので、温度変化による各物性変化の影響を検討し、次章において Stripa での広域透水試験のデータをもとに  $k_o$  および  $\mu$  の影響について検討する。

温度変化による各物性変化の影響をみるために用いたモデルは簡単のため1次元で、上端に熱源と排水面をもつものとし(図-7)、花こう岩を想定し初期状態の物性は表-4に示した物を用いた。解析は、初期温度20°Cとし熱源が30, 40, 50, 70, 100°Cの5段階について、 $k_o$ ,  $\mu$ ,  $C_v$ ,  $K_T$ ,  $\alpha_s$  のそれぞれの非線形性を考慮したケースとすべての非線形性を考慮したケースそして全く非線形性を考慮しないケースの7ケースを行い、各ケースの変位、温度分布、水圧分布を比較することで非線形性の影響を検討した。

### (1) 热移動に与える影響

図-7は熱源が 100°C のときの温度分布の経時変化図

である。これによると温度分布に最も影響を与えるのは  $K_T$  であり、 $C_v$  はあまり影響を与えていないことがわかる。これは表-3に示したように両者とも熱依存性は同程度であるが、その物性値が  $C_v$  はかなり大きいので比較的物性値の小さい  $K_T$  と比べ、温度変化に対し敏感に反応しないためと思われる。また、図-8は熱源により 1m 離れた所における  $10^6$ s 後の温度と熱源温度の関係を示している。これによると熱移動への非線形性の影響

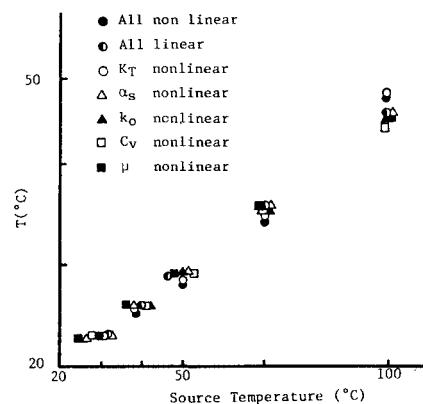


図-8 热源より 1m 離れた点における 1000000 s 後の温度と热源温度の関係

—  $k_o$  and All nonlinear  
—  $\mu$  nonlinear  
- - -  $C_v, K_T, \alpha_s$  nonlinear

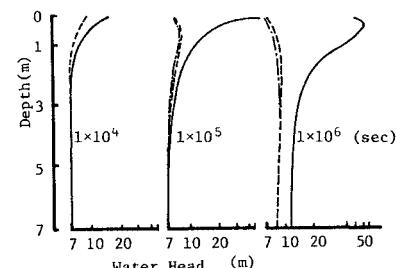


図-9 热源 30°C のときの水圧分布経時変化図

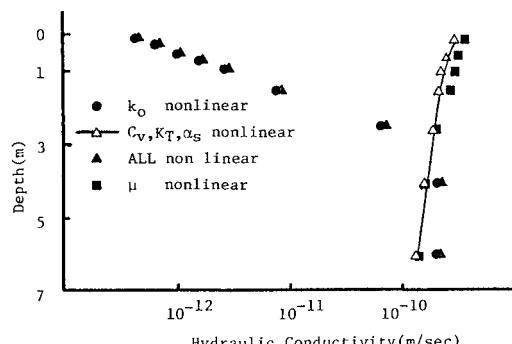


図-10 热源 30°C のときの 1000000 s の透水係数分布図

は、温度差がかなり大きくならないと顕著にならないことがわかる。同図によると熱源が100°Cのときのすべての非線形性を考慮したケースは、全く非線形性を考慮しないケースの約3%高い温度を示している。

## (2) 水圧分布に与える影響

図-9は熱源が30°Cのときの水圧分布の経時変化図である。温度分布は熱源が100°Cにならないと非線形

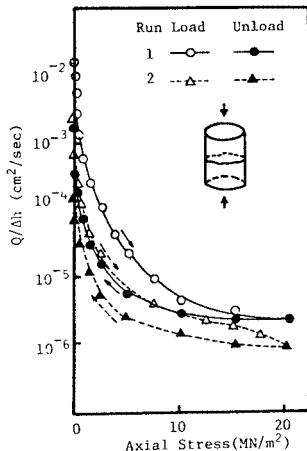


図-11 花こう岩の亀裂の透水性における繰り返し載荷の影響<sup>13)</sup>

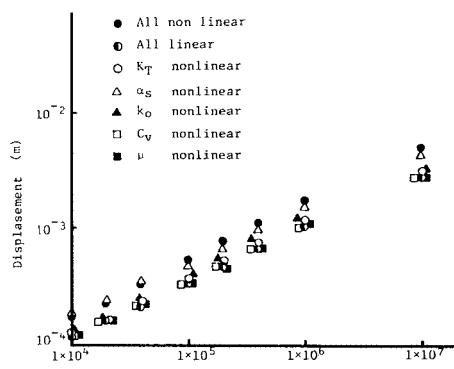


図-12 热源100°Cのときの熱膨張による上端面変位経時図

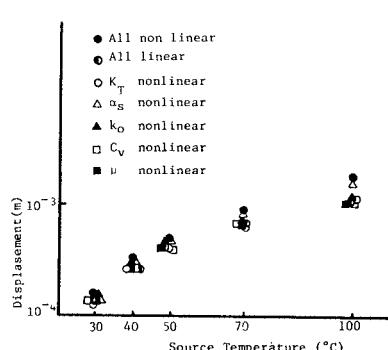


図-13 1,000,000 sにおける上端面変位と熱源温度の関係

性の影響が現われないので対し、水圧分布は熱源が30°Cのときにすでに $k_o$ の変化による影響が現われている。これは熱膨張によって熱源付近（今回の場合は排水面付近と同じ）の $k_o$ が減少し、温度変化による水の密度変化のために生じた上方への水の流れが透水係数の小さくなった排水面付近で阻止されるためと思われる。図-10は10°s、熱源30°Cのときの透水係数の分布であるが、これからも $k_o$ が非常に敏感に変化していることがわかる。本論では $k_o$ は式(13)で表わされる応力依存性をもっているが、Iwaiの実験によると図-11のように小さい応力レベルでの変化率が大きくなっている。この場合の応力レベルは初期約0.01 MPa、最大熱応力発生時約6 MPaで図-11の最も変化率の大きいゾーンでの検証となっていることが、 $k_o$ の非線形性の影響が敏感に水圧分布に現われた原因であろう。また、 $\mu$ の影響は透水係数には若干現われているが水圧分布にはほとんどみられない。図-10において、すべての非線形性を考慮したケースの $k$ は全く考慮しないケースの最大約99%の減少となっている。

## (3) 変形に及ぼす影響

今回は、外荷重が作用していないので熱膨張のみの変形となる。図-12は熱源100°Cのときの上端面の変位経時図である。これによると $a_s$ の非線形性が最も影響が大きく、熱膨張を増大させる方向に働いているとともに、 $k_o$ の非線形性も他の非線形性の影響と比べ若干大きいことがわかる。これは10°sにおける上面の変位と熱源温度の関係図（図-13）においても現われており、特に熱源の温度が低い場合にその傾向が大きい。これは前節で述べたような間隙水圧の上昇が原因であろうと思われる。熱源が100°Cのときのすべての非線形性を考慮したケースの変位は全く考慮しないときの平均約60%の増大を示している。

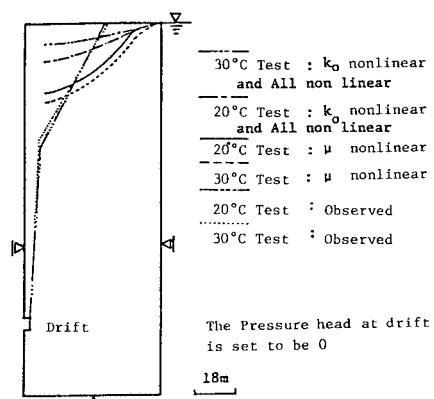


図-14 Stripa 広域透水試験モデルの計算結果と実測の水頭分布図

表-5 温度変化による空洞内流入量の変化 (ml/min)

非線形性を考慮した物性	空洞内流入量	
	空洞温度 20°C	空洞温度 30°C
$k_0$	3.1	1.8, 8
$\mu$	58.5	63.3
全ての材料	3.1	2.1
STRIPA実測	5.0	4.2

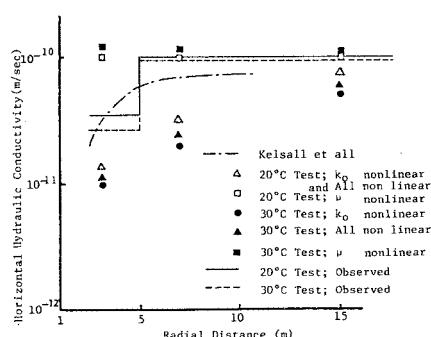


図-15 側壁水平方向の空洞方向透水係数分布図

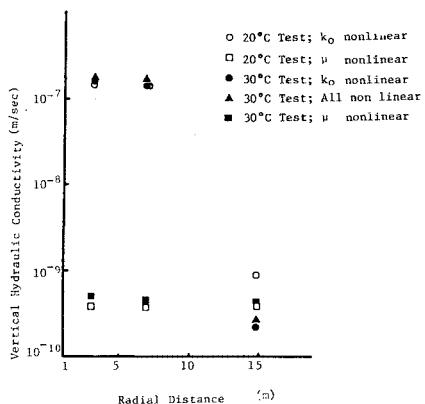


図-16 側壁水平方向の鉛直方向透水係数分布図

## 6. Stripa 広域透水試験でのケーススタディー

先述した (3.(5), c)) Stripa での広域透水試験は地下 335 m に設けられた  $5 \times 5 \times 33$  m のベンチレーショントリフートとよばれる実験室とその周辺に設けられたボアホールを用いて 1979 年 11 月～1980 年 9 月の期間に行われた。試験は、難透水性岩盤の広域での透水係数を求める技術を確立するために行われたもので、地質は中粒の花こう岩でベグマタイトとアプライトの岩脈が貫入しており、亀裂密度は斜孔で平均 4.5 本/m、鉛直孔で 2.9 本/m と観察されている<sup>11), 15)</sup>。

本論ではこの試験のうち、実験室温度が 20°C と 30°C のときの結果と比較を行い、若干の考察を行う、しかし、空洞形状、水理境界、変位境界等の詳細なデータがないので本論では図-14 のようにモデル化し、初

期状態の物性は表-4 と同様に設定した。そして岩盤には初期応力状態を設定し空洞掘削を行った。

図-15 は、モデル空洞の側壁水平方向の空洞方向透水係数分布と、現地試験の結果の比較である。これによると  $\mu$  の非線形のみを考慮したケースを除き、20°C のときの分布は空洞形状を四角形に仮定したにもかかわらず、Kelsall らの研究と同様に、大体その傾向をよく表わしている。この透水係数の減少は空洞接線方向の応力増加によって亀裂が閉じるためと思われる。また、空洞温度を 30°C にしたときは熱応力の発生により、さらに亀裂が閉じ透水係数が小さくなっている様子も現地試験結果と似ている。今回のモデルでは、 $k_0$  のみの非線形性を考慮したケースではこの温度変化により、空洞隣接部において約 29 % の透水係数の減少を示している。これは Kelsall らの報告 (30 % の減少) と同程度であるが、すべての非線形性を考慮したケースでは約 20 % の減少を示し、 $\mu$  の非線形性の影響が現われ、実測値の 22 % に近くなっている。また、水理境界が明らかでないため、定量的な評価は難しいが、温度変化による空洞内への流入量変化の結果を表-5 に示す。これによると  $k_0$  のみの非線形性を考慮したケースでは、約 39.4 % の減少であるが、すべての非線形性を考慮したケースでは 32.9 % と  $\mu$  の影響を受け、実測値の 16 % の減少に少し近くなっている。図-14 は水頭分布図であるが、温度変化により水頭値が大きくなっている様子がわかり、これも実際の傾向と似ている。このように見掛けの  $k_0$  の応力依存性として、亀裂内の関係式を適用しても Stripa プロジェクトは大体実際現象を再現することができるこことがわかり、同時にこの地域の岩盤内浸透は亀裂が主であることも本結果により推測できる。また  $\mu$  の非線形性は局所的な透水係数変化や流量に影響を与え無視できないこともわかった。

図-16 は側壁水平方向の鉛直方向透水係数分布である。これは実測値との比較はないが、空洞表面から約 7.5 m ほどの間に透水性の大きいゾーンが生じており、弾性計算であるが透水係数の変化から、ゆるみ域の発生が推測される。

## 7. 結 論

応力-浸透-連成解析における材料非線形性について調査し、今回の一連の研究で開発された連成解析手法を用いて、各物性の非線形性が連成挙動に与える影響について検討した。結論を要約すると次のようである。

① 応力-浸透-熱移動連成挙動の材料非線形性を調査した結果、熱伝導係数、比熱、熱膨張係数、透水係数の温度依存性の 4 つが、他の材料物性と比較し、大きいことがわかった。

② 热移動、水圧分布、変形（热膨張）のそれぞれに影響を与える主要因となる物性の非線形性があり、それは以下のようなである。

热移動-热伝導係数、水圧分布-透水係数、  
変形-热膨張係数

それ以外の非線形性はほとんど系に影響を与えない。すなわち、このような連成挙動では、透水係数、热伝導係数、热膨張係数の非線形性の影響が大きく、したがって、この種の解析あるいは、実験の評価にあたっては、以上の物性の非線形性の影響については、特に注意が必要といえ、また、その他の非線形性については、あまり考える必要がないといえる。

③ 以上のうち透水係数、热膨張係数、热伝導係数の順に敏感であり、特に透水係数-応力関係が低応力レベルでは非常に敏感であるため、低応力レベルでの応力変化は水圧分布に非常に変化を与える。また、热伝導係数の热移動に与える影響は他に比べかなり小さいといえる。

④ 亀裂性岩盤で花こう岩のように岩体の透水係数が小さい場合には、本論で述べたような亀裂内の透水性-応力関係を用いて連続体に置き換えて解析しても妥当な結果を得る。

⑤  $\mu$  の非線形性は水圧分布にはさほど影響は出ないものの局所的な透水係数変化および流量には影響を与える、無視し得ない。

そして今後の課題としては、

- a) 岩盤の応力-ひずみ関係における温度変化の影響を調査し、弾性係数の非線形性についても検討する必要がある。
  - b) 亀裂内の応力-透水性関係で特に低応力レベルでの傾向を詳細に調べる必要がある。
  - c) 岩体自体にも透水性がある場合の岩盤全体としての透水性の評価方法を検討する必要がある。
- が挙げられる。

## 8. おわりに

本論を書くにあたり京都大学 足立紀尚教授には日頃のご指導、ご鞭撻に対し、岡山大学 西垣 誠助教授、ならびに福井大学 荒井克彦助教授には数々の有益なるご助言を受けたことに対し、深甚の感謝の意をここに表します。

## 参考文献

- 1) Hart, R. D. : A Fully Coupled Thermal-Mechanical-Fluid Flow Model for Nonlinear Geologic System, Ph.D. Thesis, Univ. of Minnesota, 1981.
- 2) Noorishad, J., Tsang, C. F. and Witherspoon, P. A. : Coupled Thermal-Hydraulic-Mechanical Phenomena in Saturated Fractured Porous Rocks : Numerical Approach, J. G. R. Vol 89, No. B 12, pp. 10365~10373, 1984.
- 3) Yuzo Ohnishi, Hiroaki Shibata and Akira Kobayashi : Development of Finite Element Code for The Analysis of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Behaviors of Saturated-Unsaturated Medium, International Symposium on Coupled Process Affecting The Performance of A Nuclear Waste Repository, 1985. 9.
- 4) 大西有三・柴田裕章・小林 晃：有限要素法による応力-浸透-熱移動連成問題解析手法、土木学会論文報告集, No. 370/III-5, 1986.
- 5) 小林 晃：熱移動-浸透-応力連成解析について（第1報）——基本方程式の誘導——、間組研究年報, pp. 269~281, 1985.
- 6) 下岡謙司・宇都宮透・川澄 修・海藏寺忍・村岡 進・田代普吾・荒木邦男：地層処分による岩盤への熱的および力学的影響—調査および試算—、JAERI-M 83-040, 1983. 3.
- 7) Heuze, F. E. : High-Temperature Mechanical, Physical and Thermal Properties of Granitic Rocks-A Review, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 1, pp. 3~10, 1983.
- 8) Hodgkinson, D. P., Lever, D. A. and Rae, J. : Thermal Aspects of Radioactive Waste Burial in Hard Rock, Progress in Nuclear Energy, Vol. 11, No. 2, pp. 183~218, 1983.
- 9) 理科年表、東京天文台編纂、丸善
- 10) Kauzmann, W. and Eisenberg, D. (関 集三・松尾隆祐 訳)：水の構造と物性、みすず書房。
- 11) Nelson, P. and Wilson, C. : Thermomechanical and Macropermeability Experiments in The Stripa Granite-Status Report, Proc. Workshop on Thermomechanical-Hydrauchemical Modeling for A Hard Rock Waste Repository, LBL-11204, pp. 45~55, 1980.
- 12) Pruess, K. and Wang, J. S. : TOUGH-A Numerical Model for Nonisothermal Unsaturated Flow to Study Waste Canister Heating Effects, LBL-16946, 1984.
- 13) Iwai, K. : Fundamental Studies of Fluid Flow Through A Single Fracture, Ph.D. Dissertation, Univ. of Calif. Berkeley, 1976.
- 14) Goodman, R. E. : Methods of Geological Engineering, West, 赤井・川本・大西 訳「不連続性岩盤の地質工学」森北出版。
- 15) Kelsall, P. C., Case, J. B. and Chabaaes, C. R. : Evaluation of Excavation-induced Changes in Rock Permeability, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 21, No. 3, pp. 123~135, 1984.  
(1986.3.10・受付)