

(74) 放射性廃棄物処分場ニアフィールドの連成解析

- DECOVALEXプロジェクトBMT3 -

COUPLED ANALYSES OF NEAR FIELD OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL REPOSITORY
- DECOVALEX PROJECT BMT3 -

小林 晃*、藤田朝雄**、千々松正和***、大西有三****
Akira Kobayashi, Tomoo Fujita, Masakazu Chijimatsu and Yuzo Ohnishi

At the near field of a high level waste disposal repository, it is necessary to examine the deformation and convection due to heat from a waste and the deformation and flow due to excavation of the repository. Moreover, it is expected to exist many fractures at the site under deep geology. Thus, it is needed to analyze the coupled phenomena at the fractured media. In this paper, a continuous approach is tried to apply for such a problem. The new method to give the parameter for each element is introduced to avoid the mesh dependency in using the crack tensor theory. The problem is set at the DECOVALEX project as BMT3, which focuses on the coupled phenomena in a near field at a fractured media. The calculated results are compared with the other approaches.

1. まえがき

放射性廃棄物の地層処分においては、ある期間貯蔵された廃棄物を地中深く処分することが計画されている。処分される廃棄物は、その時点ではまだ発熱しており、処分後数百年は自然状態よりも高い温度場が地盤中に形成されることが予想されている¹⁾。そのような温度変化は、地下水の挙動や地盤の変形挙動に影響を与え、空洞の安定性や廃棄体から漏洩した有害物質の地盤中の移行現象に影響を与えることが懸念されている。さらに処分場となる空洞は地下500～1000mの所に予定されており、そのような地盤には多くの亀裂が存在するものと予想される。したがって、そのような発熱による影響の評価には、亀裂性岩盤中の熱力学的・水力学的・力学的挙動とそれぞれの連成挙動を考慮した解析が必要なる。しかし、そのような三つの力学的挙動の連成解析の亀裂性岩盤への適用に当たってはほとんど実例が無いのが現状である。また、放射性廃棄物の地層処分の安全性評価に当たっては国際的な認知も必要である。そのような背景から、国際的な地盤の熱・水・応力連成解析の確証プロジェクト「DECOVALEX: international co-operative for the DEvelopment of COupled models and VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation」が行なわれている。本プロジェクトには9か国が参加し、連続体や不連続体解析を用いて、同じ問題を解き、モデル化による差を検討している²⁾。本論では、DECOVALEXで行われたニアフィールドに着目した例題に対する連続体手法を用いた解析について述べる。亀裂性岩盤の異方性を表現するために小田³⁾が提案したクラックテンソルを用いて行ったが、その際、クラックテンソルの規模依存性を考慮し、メッシュ依存性がでないようなパラメータ同定法を提案した。検討は掘削から地下水の湧水、廃棄体の発熱による変形と流れ場の変化といった実際の処分過程に沿った非定常過程を解析し、その適用可能性について検討した。また結果はDEMや亀裂ネットワークを用いた手法と比較し、手法の差の検討も行った。

2. 理論

2.1 支配方程式

2.1.1 釣り合い方程式

$$\left[\frac{1}{2} T_{ijkl} (u_{k,l} + u_{l,k}) - T_{ijkl} \delta_{kl} \alpha (T - T_0) - \chi T_{ijkl} C_{kl} \rho f h \right]_j + \bar{\rho}_s b_i = 0 \quad (1)$$

ここで $\bar{\rho}_s$ 領域の密度、 ρ_l 水の密度、 b_i 物体力ベクトル成分、 χ は飽和度 Sr の非線形関数、T は温度、 u_i は変位ベクトル成分、 δ_{ij} はクロネッカーデルタ、そして下付き添え字 0 は基準状態の値であることを示す。T_{ijkl} はクラックテンソル理論か

* 正会員 岩手大学農学部 ** 動力炉・核燃料開発事業団
*** 正会員 間組技術研究所 **** 正会員 京都大学工学部

ら導かれる弾性係数テンソル（亀裂場とマトリックス場の両方を考慮したもの）であり、 C_{ij} は亀裂場の弾性係数コンプライアンスを縮約した二階のテンソルである。 α は熱膨張係数である。

2.1.2 連続式

$$\left\{ \rho_f \frac{k_r k_{ij}}{\mu} h_{,j} \right\}_{,i} - \rho_{fo} n S_r \rho_f \beta_P \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_f C(\psi) \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_f S_r \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho_{fo} n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

ここで k_r 固有透水係数テンソルでクラックテンソルからその異方性が導かれる。 k_r は相対透水係数で体積含水率 θ の関数である、 h は全水頭、 ρ_{fo} は $P=P_0$ および $T=T_0$ における基準の水の密度、 P は水圧、 β_T と β_P 水の熱膨張係数と圧縮係数、 n は間隙率、 $C(\psi)$ は比水分容量である。水の密度変化は次式で表す。

$$\rho_f = \rho_{fo} (1 - \beta_T (T - T_0)) \quad (3)$$

時間微分項における密度変化は（2）式の第4、5項で考慮されている。重力項の密度変化を考慮するために（2）式の第1項の全水頭の空間微分を次のようにする。

$$-\Delta h = -\Delta p + \rho_f g = -\Delta p + \rho_{fo} (1 - \beta_T (T - T_0)) g = -\Delta h_0 - \beta_T \rho_{fo} (T - T_0) g \quad (4)$$

2.1.3 エネルギー保存式

$$\left(\rho C_v \right)_m \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho_f C_{vf} V_{fi} T_{,i} - K_{Tm} T_{,ii} + \frac{1}{2} (1-n) T_{ijk} \delta_{kl} T \alpha \frac{\partial}{\partial T} (u_{ij} + u_{ji}) = 0 \quad (5)$$

ここで $(\rho C_v)_m = n S_r \rho_f C_{vf} + (1-n) \rho_s C_{vm}$, $K_{Tm} = n S_r K_{Tf} + (1-n) K_{Ts}$, C_v は比熱、 K_T は熱伝導係数、 V_f は実流速である。

今回扱う問題では亀裂部およびマトリックス部の熱的特性は同じであると仮定されているのでここでは等方としており、また水の熱伝導係数も岩盤と同じであるという仮定を用いているので K_{Tf} は K_{Ts} と同じ値に設定している。一方、比熱は水と岩盤で異なっているので空隙率の変化につれ値が変わる。

2.2 亀裂幅の力学依存性

亀裂に直交する方向の応力がわかれば、亀裂幅の変化を推定することが可能である。しかし、要素内で扱う亀裂の数は膨大であるので、個々の亀裂に働く直交方向応力を求め、透水性の変化を再計算することは非常に困難である。そこで、ここでは各要素の透水係数テンソルの主方向がその要素を代表する透水性亀裂の方向であると仮定する。したがって、今、各要素のクラックテンソルによって求められた透水係数テンソルの主方向を亀裂軸を局所座標の11方向とすると、それがその要素の代表亀裂の方向となる。この場合の変換マトリックスを β_{ij} とすると、それは主方向ベクトルの方向と全体座標の11方向との角度 θ を用いて次式のようになる。

$$\beta_{ij} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

局所座標で表されるひずみテンソル $\tilde{\epsilon}_{ij}$ は $\tilde{\epsilon}_{ij} = \epsilon_{kl} \beta_{ki} \beta_{jl}$ で与えられる。同様に透水係数も全体座標系から局所座標系へ変換される。

$$\tilde{k}_{ij} = k_{kl} \beta_{ki} \beta_{jl} \quad (7)$$

ここで局所座標系の22方向が代表亀裂に垂直な方向であり、代表亀裂方向の透水係数は変形により次式にしたがって変化すると仮定する。

$$\tilde{k}_{11}^{new} = \tilde{k}_{11} (1 - \epsilon_{22})^3 \quad (8)$$

この局所透水係数を全体座標系に再変換することにより透水係数の力学的依存性を表現する。

2.3 REVを考慮したメッシュ分割

上式はクラックテンソルを用いているので、亀裂情報を用いて F_{ijk} と P_i を計算する必要がある。 F_{ijk} , P_i とも亀裂長さの分布を十分に表現するまで領域の大きさに依存した形となり、クラックテンソルを用いる際にはその値が落ち着く領域の広さの亀裂情報を用いることが必要である。ここではそのような広さの最小の体積をREVと定義する。そして、図-1に示すよ

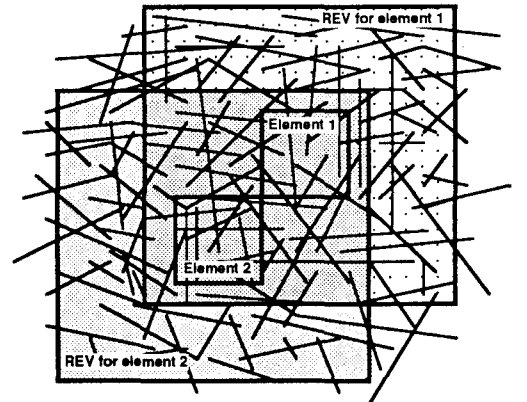


図-1 各要素とそのREVの関係

うに各要素の F_{ij} と P_{ij} はその要素の中心点を重心とするREV内の亀裂情報を用いて計算する。このような手法を取ることにより、メッシュサイズに依存したパラメータ同定を回避することが出来、かつ亀裂場に特有の異方性と不均一性を表現することができる。

3. ニアフィールドの熱・水・応力連成問題

3.1 問題設定

この問題は地下500mのところに建設された処分場を想定し、図-2に示すような初期・境界条件を持った50x50mの領域を考えている。処分トンネルは領域の中央に高さ5m、幅5mの大きさで、その下に5mの長さの発熱体（廃棄体）が存在するものとしている。そして、図-3に示す亀裂群がこの領域に存在している。この亀裂データはストリーバプロジェクトで得られたデータを用いて作られたもので、6580本の亀裂で構成されており、亀裂の中心座標、方向、長さそして幅が各亀裂について与えられている。設定された物性は表-1に示すように、岩体部分は等方弾性体であり、熱力学特性は亀裂も岩体も同じと仮定している。図-4が载荷過程である。初期状態は定常状態であり、 $t=0$ で坑道掘削（除荷）が行なわれる。そして、掘削面の水の圧力がゼロとなり坑道内に地下水が侵入する。それがほぼ定常に達した時点 t^* から発熱体の発熱が始まり、その後100年間の解析が行なわれる。この発熱量 F_t は放射性廃棄物を想定して指数関数的に減少する（ $F_t=Q_0e^{-\beta t}$; Q_0 は初期発熱量 $Q_0=470\text{W/m}^3$ 、 β は減衰定数 $\beta=0.02/\text{年}$ 、 t は年）と仮定されている（図-2参照）。解析結果の比較は図-2に示す8つの観測点A~Hでの温度、直応力、変位、観測線I、IIでの温度分布と観測線に垂直な応力の分布、坑道内への流入量、線分EF、FG、GH、HEを通過する流量、領域1~9における空隙率と透水係数の頻度分布で比較される。また、掘削後、坑道内への流入量変化が1週間後の1%以下となる時間を t^* と定義し、この時間も検討課題となっている。さらに、発熱後、発熱体の温度が最高温度になった時点 t_{max} として、これも比較検討した。このように、この問題では、実際に処分で起こるような過程を多面的に検討している。

表-1 解析に用いた物性

岩体ブロック		亀 裂	
ヤング率E	60 GPa	垂直剛性 k_n	100 GPa/m
ポアソン比 ν	0.23	せん断剛性 k_s	10 GPa/m
密度 ρ_s	2670 kg/m ³	粘着係数C	0.1 MPa
一軸圧縮強度 σ_c	200 MPa	ϕ	内部摩擦角 30°
引張強度 σ_T	10 MPa		
熱伝導係数 K_{Ts}	3 W/m°K	ダライタツシ角	0°
比熱 C_s	900 J/kg°K	引張強度 σ^p_T	0 MPa
熱膨張係数 α	$9.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$		

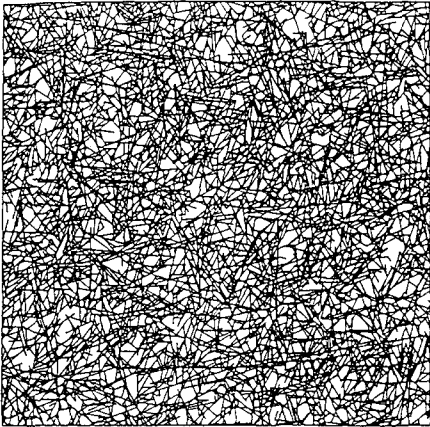


図-3 亀裂場

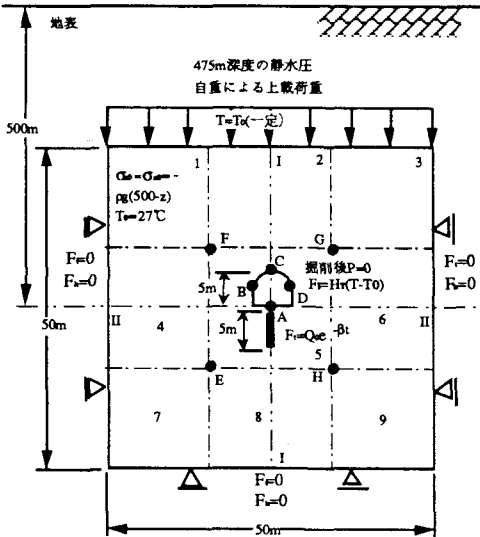


図-2 初期条件と境界条件および比較ポイント
Ft:熱流束、Fh:流束、HT:熱伝達係数(=7W/m²°C)

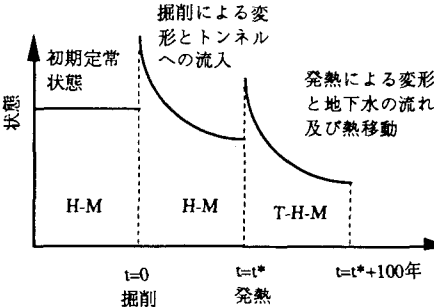


図-4 载荷過程

4. 解析手順および解析結果

4.1 REVの推定

図-3の亀裂情報から統計的情報を抽出し、 F_{ij} と P_{ij} の規模依存性について検討した。図-5にその一例を示す。検討は領域の縦横比を変えて行ったが、いずれの場合も概ね 10^2m^2 程度であった。そこで、今回は図-1の各要素のパラメータを決定するのに各要素の中心を中心とする一辺10mの正方形内の亀裂情報を用いて各要素のパラメータを求めた。

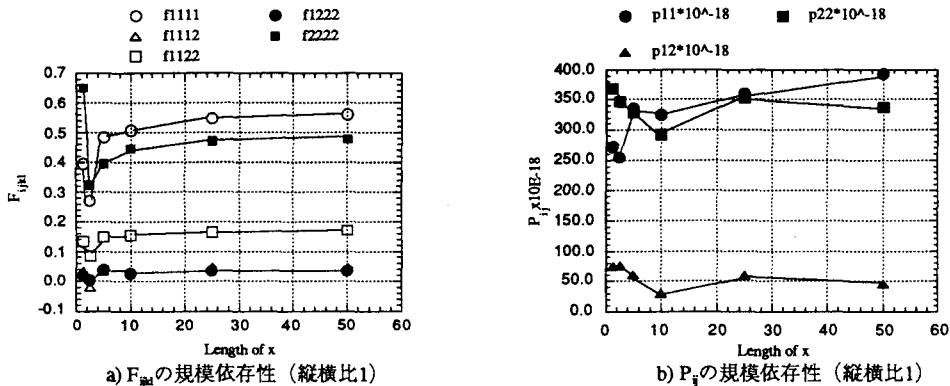


図-4 クラックテンソルの規模依存性の検討結果の例

4.2 解析結果と他の手法との比較

表-2はDECOVALEXプロジェクトで本問題を解いたチームと用いた手法の一覧である。本論で述べた手法を用いたチーム名は同表中ではKPHとなっている。その他のチームの手法については参考文献2)を参照されたい。

表-2 解析チームと手法

チーム名	CEA	KPH	ITASCA	CNWRA	NGI	INERIS	VTT	AEA
解析手法	FEM	FEM	DEM	DEM	DEM	DEM	DEM	DFN

(a) 流入量の定常到達時間と最大温度時刻

t^* と t_{max} の結果を表-3に示す。同表によると本論で用いた手法では t^* は0.51年であるが、その他の解析手法ではこれよりも速く定常状態に達していることがわかる。また、 t_{max} に関してはおよそ4年強となっている。これは、およそ、埋設後4年ほどで廃棄体温度が最高になることがわかり、オーバervackの設計の一助となるであろう。

表-3 t^* と t_{max} の結果

チーム名	CEA	KPH	ITASCA	CNWRA	NGI	INERIS	VTT	AEA
t^* (年)	0.05	0.51	0.08	-	-	-	-	0.2
t_{max} (年)	4.6	4.5	4.08	4	-	4.25	4.2	-

(b) I軸に沿った水平応力成分と坑道底面での変位の変化

図-5にI軸に沿った水平方向応力分布の加熱後1年での計算結果を示す。太実戦で示したAEAの解は円形掘削の理論解である。1年後の分布は熱応力のモデル化に依存して非常に異なる傾向にある。本論で述べた手法では廃棄体付近では熱膨張によって引張応力が発生しているが、他の手法では廃棄体の上部で引張応力が生じている。一方、図-6は坑道底面A点での鉛直方向変位の経時変化である。本論での手法の結果は他のFEMおよびDEMの結果とよい一致を示している。このように変位はよくにた結果を示すにも関わらず、応力が異なる結果となるのは、用いる構成則により非常に異なった応力が算出されることを意味しており、計算による応力を用いての評価の難しさを示している。

(c) I軸に沿った温度分布

図-7はおおよそ t_{max} におけるI軸に沿った温度分布である。このように温度分布はどのような解析でも非常に類似した結果となっている。この中で、本論での手法だけが対流による熱移動を考慮した解析であるが、それ以外の結果と同じになっている。このことから本問題で設定した条件では対流による熱移動の影響が小さいことがわかる。

(d) 坑道内への流入量と透水係数分布の変化

図-8は坑道内への流入量の経時変化を示している。流入量は温度変化によってはほとんど変化しないことがわかる。また、各モデルによって非常に異なる結果となっていることもわかる。図-9は本論のモデルの領域5での水平方向透水係数分布の変化を示している。温度応力により透水性が変化していることがわかるが、このような透水性の応力依存性のモデル化の違いも結果に大きな影響を及ぼすものと思われる。

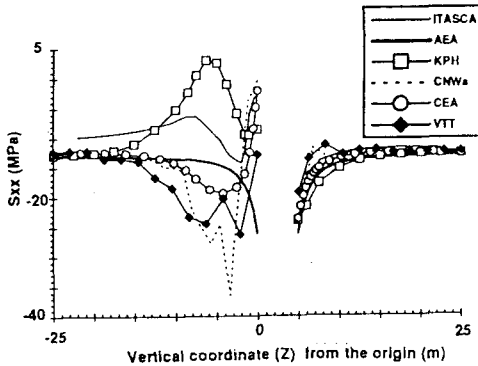


図-5 加熱1年後のI軸に沿った水平方向応力分布

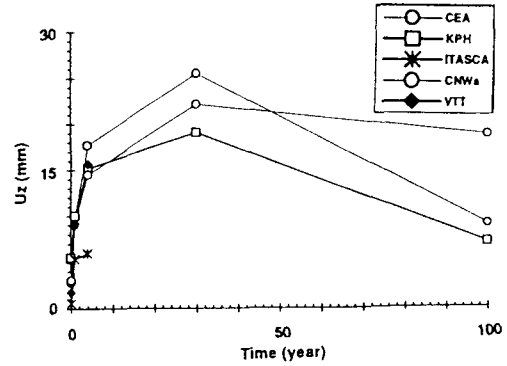


図-6 坑道底面A点での鉛直方向変位の経時変化

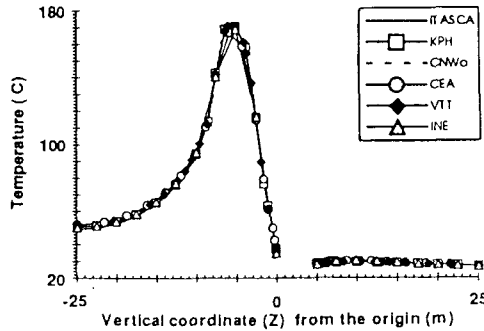


図-7 4年後のI軸に沿った温度分布

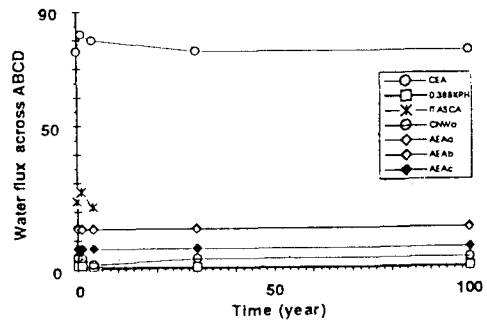


図-8 坑道内への流入量の経時変化

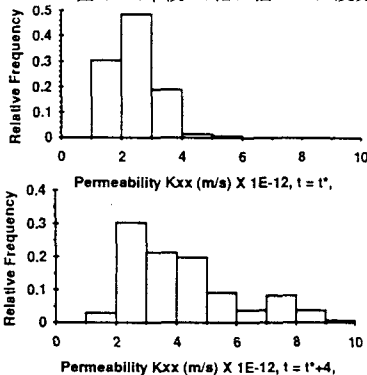


図-9 領域5での水平方向透水係数分布の変化

6. 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-, 1992
- 2) 小林晃、藤田朝雄、大西有三、千々松正和：亀裂性岩盤の連成解析手法の確証プロジェクト「DECOVALEX」の概要と結果、土と基礎、43-11、pp.39-42.
- 3) Oda, M.: An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses, Water Resources Research, Vol. 22, No. 13, pp.1845-1856, 1986