

(51) 有限要素法による地盤変形-浸透流-熱移動連成解析の適用性に関する検討

鹿島建設(株) 正会員 佐々木 猛、永井文男

The thermo - mechanical consolidation coupling analysis and its discretization on jointing rock mass by finite element method

Takeshi SASAKI, Fumio NAGAI, Kijima Corporation

Abstract

This paper describes the thermo - mechanical consolidation coupling analysis and its discretization method for the simulations of nuclear waste storage or hot dry rock geothermal power station on jointing rock mass by finite element method. Ohnisi et al (1986) presented the thermo - mechanical consolidation coupling analysis by finite elements using Shandhu 1-2 type (Arai et al ,1983) discretization. The authors followed basic equations presented by Ohnisi (1986) and an anisotropic stress - strain and permeable constitutive laws are employed for combining arbitrary oriented joint sets by compliances matrixes (T.F.Cho,1988). Four - node standard iso - parametric finite element as Shandhu 1-1 type with reduced integration and scaling method are employed for the stabilities of numerical calculations. The results of one - dimensional numerical examples of the consolidation models compared with analytical solutions of the Fourier series and two dimensional thermo - mechanical consolidation coupling model presented by Ohnisi et al (1986) are good performed with presented method. The results of two dimensional rock mass models with combining arbitrary oriented joint sets are shows that the fluid flow direction is followed along direction of the joint sets , and those are seems to be clearly explained from the influence of joints orientation. Since, the results of those numerical examinations, the presented method to be applicable plenty for actual rock mass models with combining arbitrary oriented joint sets.

1. はじめに

近年、地球環境問題に対する関心が高まっている。これらの中でも、石炭や、重油などの化石燃料から排出される炭酸ガスの影響による地球温暖化の現象などが懸念されている。このような背景から、再び、炭酸ガスの排出に関し、クリーンエネルギーである地熱発電や、原子力発電が見直されつつある。これらの構造物は一般に地表の岩盤を基礎とするか、岩盤内に構築される。さらに、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物は、地下数100m以上の深さの岩盤内にその貯蔵が計画されている。また、これらの夜間電力を岩盤内の超伝導エネルギー貯蔵施設で貯蔵し昼間のピーク時にそこから供給することなどが研究されている。このような岩盤構造物では、従来、一般に行われてきた岩盤自身の変形性に対する力学的な安定性検討の他に地下水の挙動や温度の影響を考慮した評価手法が必要となる。

このような問題に対して、大西ら(1986)は有限要素法のShandhu 1-2型(荒井、1983)を用い、詳細な定式化をおこない、種々の検討をしている。また、岩盤内には潜在的または顕在的なクラックや節理などの不連続面が存在する。空洞の掘削工事では、掘削面付近で発生する変形量は、母岩自身の弾性的なものに比較して、クラックの開口や節理の滑りに起因する比率の多いことが過去の原位置試験や計測結果から知られている。このような不連続面は、岩盤自身の変形特性ばかりでなく、その透水特性に対しても極めて支配的であることが知られている。小田(1987)は、クラックテンソルにより、岩盤内に存在するクラックが変形および透水性に与える影響を一般的な理論として提案している。また、佐々木(1992)は、岩盤内に存在する

任意方向のクラックが、吉中ら(1990)の提案するクラスター分析により、特定の方向の節理群の組合せによって、その変形特性を表現できるとする複合降伏モデルを提案した。

著者らは、地盤変形-浸透流-熱移動の有限要素法による連成解析で、大西ら(1986)の定式化を基本とし、標準的な4-節点 iso-parametric 要素(Shandhu 1-1型、荒井、1983)に低減積分と連立方程式にスケーリングを適用し、この要素の問題である初期の間隙水圧の振動を抑えるとともに数値計算の安定化を図った。また、岩盤内の節理群の影響は、佐々木(1992)の方法に、T.F.Cho(1988,1991)らの提案するコンプライアンスマトリックス法により、任意の特定方向の節理群を含む平均的な異方性の変形および透水特性を導入した。

2. 地盤変形-浸透流-熱移動連成解析の基本方程式(大西ら、1986)

大西ら(1986)は、地盤変形-浸透流-熱移動連成解析の詳細な定式化を行っている。著者らは、これらを基本に、O.C.Zienkiewiczら(1984)が導入しているBiotの圧密係数を加えた。また、変形と透水特性に対して、岩盤内の節理群の影響を考慮するため、応力-ひずみおよび透水の構成方程式を異方性とした。

地盤(骨格)の釣り合い方程式を(1)式で表す。

$$\{D_{ijkl} \epsilon_{kl} - \alpha_s (1-n) D_{ijkl} \delta_{ij} \Delta T - \alpha_B X \delta_{ij} \rho_f h\}_j + (1-n) \rho_s b_i = 0 \quad (1)$$

ここに、 D_{ijkl} : 異方性の応力-ひずみマトリックス、 ϵ_{kl} : 骨格のひずみ、 α_s : 地盤の線膨張係数、 n : 空隙率、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ、 ΔT : 温度増分、 α_B : Biotの圧密係数、 X : 飽和=1、不飽和=0、 ρ_f : 水の密度、 h : 全水頭、 ρ_s : 骨格の密度、 b_i : 骨格の物体力、 $,$: 空間微分である。

間隙水の連続の式を(2)式で表す。

$$\rho_f k_{ij} h_{,ii} + \alpha_B \rho_f S_r \frac{\partial \epsilon_{ii}}{\partial t} - (\rho_f n S_r \rho_f g \beta_P + \rho_f C(\psi)) \frac{\partial h}{\partial t} + \rho_f n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

ここに、 k_{ij} : 異方性の透水係数、 S_r : 飽和度、 $\partial \epsilon_{ii} / \partial t$: 骨格の体積ひずみ速度、 g : 重力の加速度、 $C(\psi)$: 比水容量である。

熱エネルギーの保存方程式を(3)式で表す。

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + n \rho_f C_{vf} V_f T_{,i} + K_{Tm} T_{,ii} + n S_r T \frac{\beta_T}{\beta_P} k_{ij} h_{,ii} + 1/2 (1-n) D_{ijkl} \delta_{kl} T \delta_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここに、 T : 温度、 ρ : 骨格と水の平均的な密度、 C_v : 骨格と水の平均的な比熱、 C_{vf} : 水の比熱、 V_f : 間隙水の流速、 K_{Tm} : 骨格と水の平均的な熱伝導率、 β_T : 間隙水の熱膨張係数(圧力一定条件での)、 β_P : 間隙水の圧縮係数(温度一定条件での)である。

3. 有限要素法による離散化

2節、(1)、(2)、(3)式を、有限要素法のGalerkin法により離散化する。形状関数として地盤、浸透流、熱移動に全て、標準的な4-節点 iso-parametric 要素(Shandhu 1-1型、荒井、1983)を用いて離散化し、マトリックス形で整理すると、(4)式で表される。

$$\begin{bmatrix} K & C & G \\ A & E & D \\ J & 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{h} \\ \dot{T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & H & 0 \\ 0 & L & V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ h \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta Q \\ \Delta P \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 K : 骨格の剛性、 C : 水圧による骨格の変形、 G : 熱による骨格の変形、 A : 骨格の変形による空隙変化、 E : 飽和-不飽和領域の負圧の効果、 D : 熱による水の膨張、 H : 透水、 J : 骨格の変形による熱エネルギー変化、 M : 蓄熱、 L : 水圧による熱エネルギー変化、 V : 熱移送および熱拡散の各マトリックス。 ΔF : 外力増分、 ΔQ : 流量増分、 ΔP : 熱量増分、 u : 変位、 h : 全水頭、 T : 温度ベクトル、 $\dot{\cdot}$: 時間微分である。

(4)式の時間積分に中央差分法を適用すると、最終的に(5)式の連立方程式を各時間刻み Δt で解いて行く。

$$\begin{vmatrix} K & C & G \\ A & E+\Delta tH/2 & D \\ J & \Delta tL/2 & M+\Delta tV/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta u \\ h_{t+\Delta t} \\ T_{t+\Delta t} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta F + Ch_t + GT_t \\ \Delta Q + (E-\Delta tH/2)h_t + DT_t \\ \Delta P - (\Delta tL/2)h_t + (M-\Delta tV/2)T_t \end{vmatrix} \quad (5)$$

ただし、(5)式左辺の係数マトリックスで、剛性マトリックスは、せん断成分に対してのみ低減積分を、水と熱の対角項はFull 積分を、非対角項は低減積分を適用している。このことにより、Shandhu 1-1型(荒井、1983)に特有の載荷直後の間隙水圧の振動現象を抑えることができる。また、連成項である非対角項に低減積分を適用することにより、各連成項の影響が結果的に要素に関する節点の平均値として与えられ、安定した解が求められる。また、(5)式は、各係数マトリックスの次数が、約 $10^6 \sim 10^8$ 程度の範囲に存在し、(6)式の条件数Cond(k)が大きいく、数値的な不安定性をおこす恐れがある。これらに対して次のようなマトリックスのスケールリングを行った。

$$[k] \cdot \{x\} = \{y\} \quad (6), \quad [K] = [P] \cdot [k] \cdot [Q] \quad (7), \quad \{R\} = [P] \cdot \{f\} \quad (8), \quad [K]^{-1} \{R\} = \{y\} \quad (9), \quad \{x\} = [Q] \cdot \{y\} \quad (10)$$

ここに、 $[k]$: (5)式の左辺の係数マトリックス、 $\{x\}$: 未知ベクトル、 $\{y\}$: 外力ベクトル、スケールリングマトリックスは、 $[P] = [Q] = 1/\sqrt{k_{ref}} [I]$ を用いた。ここに、 $[I]$: 単位マトリックスである。(9)式のスケールリングされたマトリックス $[K]$ は、対角項が正規化され、全て1.0になっている。また、(9)式の連立方程式を解いた後、(10)式を用いて最終的な解を求める。これは、赤井ら(1976)およびT. F. Cho(1988)の方法の一般式である。

4. 節理性岩盤の変形および透水特性のコンプライアンスマトリックスによる表現

岩盤内には、潜在的な微小クラックや顕在的な節理などの不連続面が存在する。吉中ら(1990)は、これらをその長さによって、微小クラック、クラック、ジョイント、せん断帯、断層の4つに分類した。佐々木ら(1992)は、この考えに従い、微小クラックは無指向性の平均化モデルとして、ジョイントは、クラスター分析により、特定の方向を持つ節理群に分類できるものとし、岩盤の変形は、母岩、クラック、ジョイントの変形の和として表せるものとする複合降伏モデルを提案した。またT. F. Cho(1988)は、特定の方向を持つ節理群の組合せを、コンプライアンスマトリックスによって表現した。これは、小田(1987)の提案するクラックテンソルの特別な場合である。ここでは、岩盤の変形特性および透水特性に複合降伏モデルの考えにT. F. Cho(1988,1991)のコンプライアンスマトリックスを適用した。これらの概要を以下に示す。すなわち、岩盤の総ひずみ $\{e_T\}$ は、母岩と各節理群のひずみの和とする。また、母岩と各節理群の応力は等しいものと仮定する(Hill,1963)。これらの関係を、(11)~(13)式に示す。

$$\{e_T\} = \Sigma \{e_I\} + \{e_R\} = [\Sigma [F_I] + [E]] \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (11), \quad [C] = [D]^{-1} \quad (12), \quad [F_I] = [T_I]^T \cdot [C_I] \cdot [T_I], \quad [C_I] = [K_I]^{-1} / S_I \quad (13)$$

ここに、 $\{e_I\}$: 各節理群のひずみ、 $\{e_R\}$: 母岩のひずみ、 $\{e_T\} = \{e_{xT}, e_{yT}, e_{xyT}\}$ 、 $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}\}$ 、 $[E]$: 母岩のひずみマトリックス、 $[C]$: 母岩と節理群のひずみの和のコンプライアンスマトリックス、 $[D]$: 節理群を含む岩盤の応力-ひずみマトリックス、 $[T_I]$: 各節理群の座標変換テンソル、 $[K_I]$: I 番目の節理のバネマトリックス、 S_I : 単位長さ当たりの節理間隔である。また、各節理群の応力とひずみは、(17)、(18)式で求められる。

$$\{\sigma_I\} = [T_I] \cdot \{\sigma\} \quad (17), \quad \{e_I\} = [C_I] \cdot [T_I] \cdot \{\sigma\} = [C_I] \cdot \{\sigma_I\} \quad (18), \quad \{\sigma_I\} = \{\sigma_{nI}, \tau_{sI}\} \quad (19), \quad \{e_I\} = \{e_{nI}, \gamma_{sI}\} \quad (20)$$

ここに、 σ_{nI} : 節理 I の鉛直応力、 τ_{sI} : 節理 I のせん断応力、 e_{nI} : 節理 I の鉛直方向ひずみ、 γ_{sI} : 節理 I のせん断方向ひずみである。また、節理群を含む岩盤内の流量は、母岩と各節理群の中を流れる流量の和と仮定する。また、母岩と各節理群の間隙水圧は、流速が小さく、間隙水圧に急激な変化がないと仮定することから、同じ値をもつものとする。このような仮定から、見かけの岩盤の透水係数 $[K_B]$ は、(21)式で表される。

$$[K_B] = \{ \Sigma [t_I]^T \cdot ([k_I] / S_I) \cdot [t_I] + [k_R] \} \quad (21)$$

ここに、 $[k_I]$: 各節理群 I の透水係数、 $[k_R]$: 母岩の透水係数、 $[t_I]$: 各節理群の座標変換マトリックスである。これは、小田(1987)の透水テンソルおよび、T. F. Cho(1988)の二重空隙モデルの特別な場合である。これらを用いることにより、任意の特定方向の節理群の組合せによる岩盤の変形および透水特性を実験で求められる

係数などに対応させながら表現することができる。また、各節理群の応力、ひずみおよび流量を求めることができるので、一般にいられている、節理の開口幅や、応力の関数である、透水係数の非線形性などを容易に導入することができる。

5. 適用例

- ここでは、以上の定式化の適用性を検討するため、以下の3項目について解析を実施した。
 - (1) 一次元モデルによるFourierの理論解および荒井ら(1983)の一次元モデルとの沈下特性の比較。
 - (2) 一次元モデルによる各節理群の異方性角度の違いによる沈下特性の比較。
 - (3) 二次元モデルによる各節理群の異方性角度の違いによる変形、透水および熱移動特性の比較。

図-1は両面排水を仮定した一次元モデルによる沈下特性のFourierの理論解との比較である。解析結果は、理論解とよく一致していることが解る。図-2は荒井ら(1983)の一次元モデルとの比較である。時間刻み Δt を1,10,100Dayとしたが、いずれも理論解に近ずいている。図-3は一次元モデルによる各節理群の異方性角度の違いによる沈下特性の比較である。母岩の透水係数を $10^{-3}(m/Day)$ とし、節理の透水係数は、節理に平行な方向に $10^{-2}(m/Day)$ 、直角な方向に $10^{-4}(m/Day)$ とした。これらの結果をみると、母岩と、 $\theta=0^{\circ}$ の場合がほぼ一致している。 θ が排水面と直交する方向に近づくに従って、沈下速度が早くなっており、定性的に妥当な傾向を示している。 θ が排水面と直交する方向に近づくに従って、沈下速度が早くなっており、定性的に妥当な傾向を示している。二次元モデルの解析条件は、深さ100m、幅400mの下端中央に $100^{\circ}C$ の固定温度を与え上面を排水とした。母岩の物性は、 $E=1\times 10^6tf/m^2$ 、 $\nu=0.25$ 、節理のパネ定数は、 $K_n=1\times 10^7tf/m^3$ 、 $K_s=0.4\times 10^6tf/m^3$ とし、透水特性は一次元モデルと同様とした。また、その他の各種熱特性については、大西ら(1986)と同様の物性を用いた。図-4~7は母岩および節理群が 30° および 60° の場合の5000日後の変形、熱応力、流速、間隙圧分布の結果である。節理群が存在する場合、応力は熱源近くに集中している。水の流れは、節理群の方向に沿っていることがわかる。また、この傾向は、間隙水圧分布も同様である。

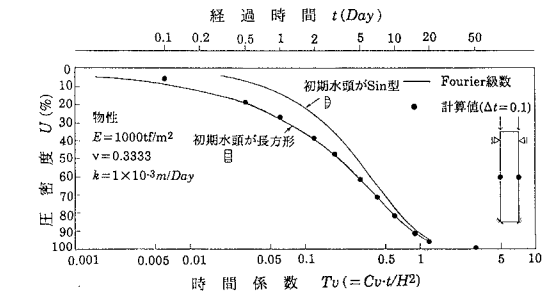


図-1 Fourierの理論解との比較

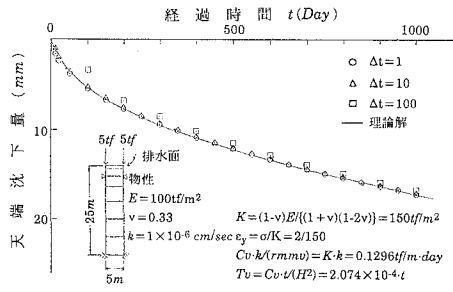


図-2 荒井ら(1983)のモデルとの比較

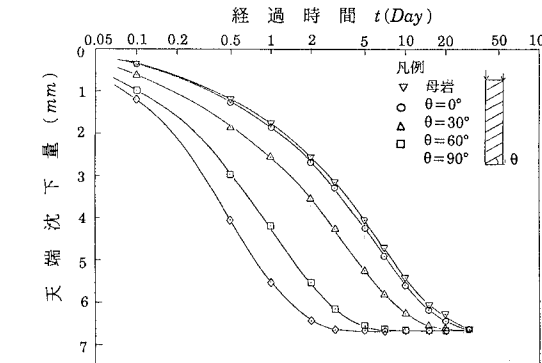


図-3 各節理群の角度の違いによる沈下特性の比較

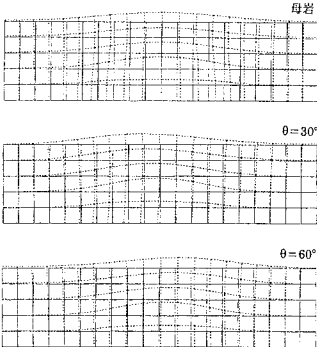


図-4 二次元モデルの変形(5000日後)

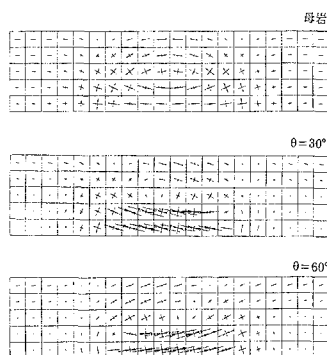


図-5 主応力分布(5000日後)

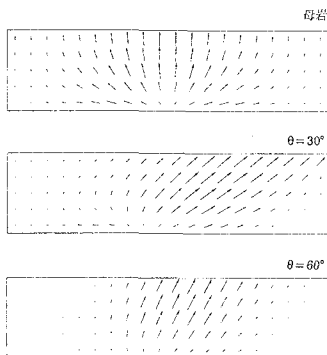


図-6 流速分布(5000日後)

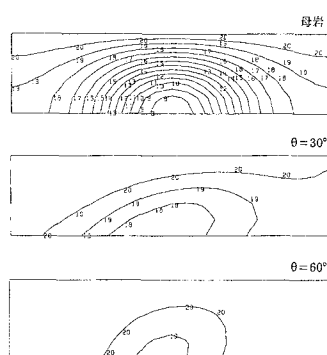


図-7 圧力分布(5000日後)

6. むすび

本検討では、大西ら(1986)の定式化を基本に、O. C. Zienkiewicz ら(1984)の圧密係数を導入した。また、これらに有限要素法のShandhu1-1型(荒井ら、1983)に低減積分法とスケーリングを適用し、計算の安定化を図った。このことにより、従来のFull積分法の結果と比較して、初期の間隙水圧分布の振動を1/2~1/10に抑えることができた。また、ある程度大きな時間刻みを用いても理論解に収束する。マトリックスのスケーリングは、地盤の弾性係数と透水係数のようにマトリックスの係数に大きな差がある場合に有効である。特定の角度をもつ複数の節理群の組合せをもつ岩盤の変形および透水特性をコンプライアンスマトリックス(T. F. Cho, 1988, 1991)により表現した。この手法では、各節理群に対して、実験で得られる工学的なバネ定数の導入とその変形量が計算できる。したがって、これらを用いて、節理の開口幅と透水係数の非線形な関係を直接的に表現できる。この定式化により、理論解やこれまでに発表されている結果との比較を行い、良い精度で解が求まることが確認された。今後は、変形や透水特性の非線形性などについて検討する予定である。

参考文献

- 1) 大西他、“有限要素法による応力-浸透-熱移動連成問題解析法”、土木学会論文集、第370号/III-5、pp.151~158, 1986.6
- 2) 荒井他、“多次元圧密数値解析手法の比較”、土質工学論文報告集、Vol. 23, No. 3, pp.189~195, 1983.9
- 3) O. C. Zienkiewicz, T. Shiomi, “Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution”, Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech. Vol. 8, pp.71~96, 1984
- 4) 赤井、田村、“多次元圧密問題に対する非線形応力-ひずみ理論の適用”、京都大学防災研究所年報、19号B、pp.15~29, 1976
- 5) 吉中龍之進、吉田淳、山辺正、“岩盤不連続面分布の幾何学性とそのモデル化に関する考察”、土質工学論文報告集、Vol. 30, No. 3, pp.161~173, Sept.、1990
- 6) 小田匡寛、“不連続性岩盤の力学へのアプローチ”、土質工学会、土と基礎、Vol. 35-3、pp.29~34、March、1987
- 7) 佐々木猛、“有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する検討”、土木学会、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.276~286、1992.2
- 8) T. F. Cho, “Continuum and discrete modeling of porous and jointed rock: Application to the design of near surface annular excavations”, The University of Wisconsin, 1988
- 9) T. F. Cho et al, “Continuum modeling of porous rock with arbitrary joint sets, including coupled deformation-diffusion behavior”, Proceedings of the 7th ISRM Congress Aachen, pp.805~811, 1991.9
- 10) R. Hill, “Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles”, J. Mech. Phys. Solids 11, pp.357~372, 1963