

# 有限要素法による節理性岩盤の変形—浸透流— 熱移動連成解析の離散化と適用性に関する研究

佐々木猛\*・永井文男\*\*

高レベル放射性廃棄物の地下貯蔵や地熱発電などの地下水の流れに関する解析では、地盤変形-浸透流-熱移動の連成解析が必要である。著者らは、大西らの研究を基礎にSandhu1-1型(標準の4節点要素)に低減積分を適用しこの欠点である間隙水圧の振動現象を少なくし数値の安定性を向上させ、比較的粗い時間刻みでも理論解に収束することを確認した。また、岩盤内の節理群に対し、開口・閉合と透水性との非線形関係を容易に表現できるコンプライアンスを導入した。複数の節理群が存在するモデルに適用し、本提案が有効であることを確認した。

Key Words: thermo-mechanical consolidation, seepage, FEM, jointing rock

## 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、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、地下数百m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)<sup>1)</sup>は有限要素法のSandhu 1-2型(荒井ら, 1983)<sup>2)</sup>を用い、詳細な定式化を行い、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。

これらの不連続面は、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)<sup>3)</sup>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(1991, 1992)<sup>4), 5)</sup>は、岩盤内に存在する任意方向のクラックが、吉中ら(1990)<sup>6)</sup>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、解析コードの互換性、汎用性および非線形特性の取扱い易さを考え、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<sup>1)</sup>の定式化を基本とし、標準的な4節点 iso-parametric 要素(Sandhu 1-1型, 荒井ら)<sup>2)</sup>を用いたコードを開発した。これらの離散化に際し、低減積分と連立方程式にスケーリングを適用し、Sandhu 1-1型要素を採用した際に生じ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を考慮するため、佐々木<sup>5)</sup>の提案する複合降伏モデルの方法の弾性変形領域に、T. F. Cho (1988, 1991)<sup>7), 8)</sup>らの提案するコンプライアンスマトリックス法を導入することにより、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表現した。さらに、これらの定式化の妥当性と適用性を検討するため、これまでの研究結果との比較および節理群を含む岩盤の二次元モデルの解析を行った。

## 2. 地盤変形-浸透流-熱移動連成解析の基本方程式(大西ら)<sup>1)</sup>

大西ら<sup>1)</sup>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)<sup>9)</sup>が導入しているBiotの圧密係数を加えた。

\*正会員 鹿島建設(株) 情報システム部 主査  
(〒107 東京都港区元赤坂1-2-7)

\*\*正会員 鹿島建設(株) 情報システム部 開発課

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、異方性を表現できる応力-ひずみおよび透水の構成方程式を用いた。

骨格の応力の釣り合いは次式で表される。

$$\begin{aligned} & \{1/2D_{ijkl}\varepsilon_{kl} - \alpha_s(1-n)D_{ijkl}\delta_{kl}\Delta T - \alpha_B\chi\delta_{ij}\rho_f h\}_j \\ & + (1-n)\rho_s b_i = 0 \quad \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

ここに、 $D_{ijkl}$ : 骨格の異方性の応力-ひずみマトリックス、 $\varepsilon_{kl}$ : 骨格のひずみ、 $\alpha_s$ : 地盤の熱膨張係数、 $n$ : 空隙率、 $\delta_{ij}$ : クロネッカーのデルタ、 $\Delta T$ : 温度増分、 $\alpha_B$ : Biotの圧密係数、 $\chi$ : 飽和=1, 不飽和=0,  $\rho_f$ : 水の密度、 $h$ : 全水頭、 $\rho_s$ : 骨格の密度、 $b_i$ : 骨格の物体力、 $\cdot$ : 空間微分である。

Biotの圧密係数は次式で表される。

$$\alpha_B = (1 - \frac{\delta_{ij} D_{ijkl} \delta_{kl}}{3K_s}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $K_s$ : 鉱物粒子の体積弾性係数である。これは、骨格と鉱物粒子の体積変化に対する変形と間隙水圧への影響度の補正係数であり、土や粘土の場合1.0に近く、岩の場合は0.5~1.0の間の値であると言われている<sup>9),10)</sup>。

間隙水の連続の式は次式で表される。

$$\begin{aligned} & (\rho_f k_{ij} h_{,j})_{,i} + \alpha_B \rho_f S_r \frac{\partial e_{ii}}{\partial t} - (\rho_f n S_r \rho_f g \beta_P + \rho_f C(\psi)) \frac{\partial h}{\partial t} \\ & + \rho_f n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここに、 $k_{ij}$ : 異方性の透水係数、 $S_r$ : 飽和度、 $\partial e_{ii}/\partial t$ : 骨格の体積ひずみ速度、 $g$ : 重力の加速度、 $\beta_P$ : 間隙水の圧縮係数(温度一定条件での)、 $C(\psi)$ : 比水分容量、 $\beta_T$ : 間隙水の熱膨張係数(圧力一定条件での)である。

熱エネルギーの保存方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} & \rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + n \rho_f C_{vf} V_{fi} T_{,i} + (K_{Tij} T_{,j})_{,i} + (n S_r T \frac{\beta_T}{\rho_p} k_{ij} h_{,j})_{,i} \\ & + 1/2(1-n)D_{ijkl} \delta_{kl} T \delta_{ij} \frac{\partial e_{ij}}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

ここに、 $T$ : 温度、 $\rho$ : 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、 $V_{fi}$ : 間隙水の流速、 $K_{Tij}$ : 骨格と水の平均的な熱伝導率である。

### 3. 有限要素法による離散化

#### (1) 基本方程式の離散化

式(1), (3), (4)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(Sandhu 1-1型、荒井ら<sup>2)</sup>)を用いて離散化し、マトリックス形式で整理すると、次式で表される。

$$\begin{bmatrix} K & C & G \\ A & E & D \\ J & 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ h \\ T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & H & 0 \\ 0 & L & V \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ h \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F \\ \Delta Q \\ \Delta P \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(5)$$

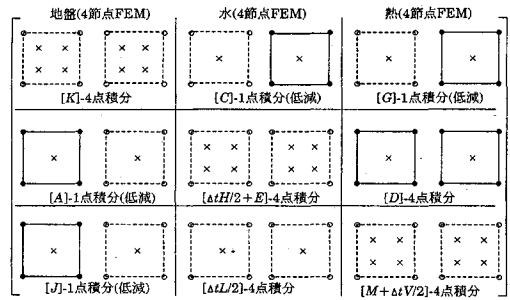


図-1 低減積分によるFEMの離散化

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、 $\Delta F$ : 外力増分、 $\Delta Q$ : 流量増分、 $\Delta P$ : 熱量増分、 $u$ : 変位、 $h$ : 全水頭、 $T$ : 温度の各ベクトル、 $\cdot$ : 時間微分である。

式(5)の微分方程式の時間積分に中央差分法を適用すると、最終的に式(6)の連立方程式が得られる。これを、各時間刻み $\Delta t$ で解いて行く。

$$\begin{bmatrix} K & C & G \\ A & E + \Delta t H/2 & D \\ J & \Delta t L/2 & M + \Delta t V/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ h_t + \Delta t \\ T_t + \Delta t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F + Ch_t + GT_t \\ \Delta Q + (E - \Delta t H/2)h_t + DT_t \\ \Delta P - (\Delta t L/2)h_t + (M - \Delta t V/2)T_t \end{Bmatrix} \quad (6)$$

図-1は、式(6)左辺の係数マトリックスでの Gauss 積分の積分点の数を示している。剛性マトリックスは、地盤のせん断変形成分と水、熱の非対角項に対して低減積分<sup>11)</sup>を、地盤の体積変形成分と水、熱の対角項には Full 積分を用いている。このことにより、せん断変形と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表され、これらの分布が要素内で一定となる。これらから、Sandhu 1-1型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安定した解が求められる。

#### (2) 物理定数からみた各係数と計算精度の関係

図-2は、式(6)における係数マトリックスの物理定数から見た各係数の関係を示す。式(6)の各係数マトリックスの次数は、図-2に示す各物理定数のオーダーで、約10<sup>6</sup>~10<sup>-8</sup>程度の範囲に存在する。これらの中でも、変形に関する剛性 $[K]$ と熱移動に関する $[M]$ は対角項が非対角項より大きく数値的に極めて安定である。しかし、水頭に関する $[H]$ は、通常、体積ひずみの項 $[A]$ より小さく、また、水の熱膨張項 $[D]$ は、さらに数オーダー小さい。したがって、式(6)では、水頭に関して精度良く解く必要がある。

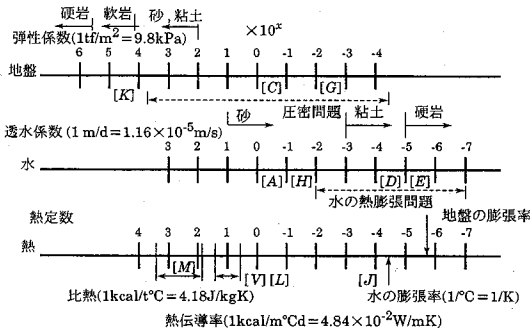


図-2 物理定数からみた各係数の関係



図-3 節理性岩盤の変形特性

#### 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<sup>6)</sup>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<sup>4),5)</sup>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<sup>7),8)</sup>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<sup>9)</sup>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、岩盤の変形特性に複合降伏モデル<sup>4),5)</sup>およびT. F. Cho<sup>7),8)</sup>の方法を適用するとともに透水特性にもT. F. Cho<sup>7),8)</sup>と同様の方法を導入した。

##### (1) 節理群を含む岩盤の変形特性

節理群を含む岩盤の変形特性として、図-3に示すように、岩盤の総ひずみ $\{e_T\}$ を、母岩と各節理群のひずみの和と仮定する。また、母岩と各節理群の応力は等しいものとする(Hill,1963)<sup>17)</sup>。これは、節理群の分布が周期的に分布し、各節理群の体積が母岩と比較して無視できる場合を仮定している。これらの関係を、式(15)~(18)に示す。節理群 $I$ の局所座標の剛性を全体座標系に変換する。

$$\{F_I\} = [T_I]^T \{C_I\} [T_I] \quad (15)$$

節理群 $I$ の局所座標の剛性は次式で表される。

$$\{C_I\} = [K_I]^{-1} S_I \quad (16)$$

節理群を含む全体座標系のひずみは式(17)、

$$\{e_T\} = \sum \{e_I\} + \{e_R\} = [\sum \{F_I\} + \{E\}] \{o\} = [C] \{o\} \quad (17)$$

節理群を含む全体座標系のひずみマトリックスは式(18)で表される。

$$[C] = [D]^{-1} \quad (18)$$

ここに、 $\{e_I\}$ : 節理群 $I$ のひずみ、 $\{e_R\}$ : 母岩のひずみ、 $\{e_T\} = \{e_x T, e_y T, e_{xy} T\}$ 、 $\{o\} = \{o_x, o_y, o_{xy}\}$ 、 $\{E\}$ : 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、 $\{T_I\}$ : 節理群 $I$ の座標変換テンソル、 $S_I$ : 節理群 $I$ の間隔である。

ここで、式(6)を簡単のため式(7)で表す。

$$[k]\{x\} = \{f\} \quad (7)$$

式(8)で示す条件数 $Cond[k]$ が大きく、係数 $[k]$

$$Cond[k] = \lambda_{max} / \lambda_{min} \approx \|k\| / \|k^{-1}\| \quad (8)$$

および外力 $\{f\}$ に誤差 $\{\delta k\}$ および $\{\delta f\}$ が混入した

$$[k + \delta k]\{x + \delta x\} = \{f + \delta f\} \quad (9)$$

場合、結果に与える相対誤差は次式で示される<sup>12)</sup>。

$$\frac{\|\delta x\|}{\|x\|} \leq \frac{Cond[k] \|\delta k\| / \|k\|}{1 - Cond[k] \|\delta k\| / \|k\|} \quad (10)$$

ここに、 $\lambda_{max}$ :  $[k]$ の最大固有値、 $\lambda_{min}$ :  $[k]$ の最小固有値、 $\|\cdot\|$ : ノルム、 $\{\delta k\}$ 、 $\{\delta f\}$ 、 $\{\delta x\}$ : 各係数の誤差。

これは、条件数 $Cond[k]$ に比例している。従って、式(6)にそのまま連立方程式の数値解法を適用すると、数値的な不安定性を起こす恐れがある<sup>13),14)</sup>。これらの対策として次のようなマトリックスのスケールングを行った<sup>15)</sup>。式(7)の係数マトリックス $[k]$ に式(11)のようにスケールングマトリックス $[P]$ 、 $[Q]$ を乗じ、スケールングされたマトリックス $[K]$ を求める。

$$[K] = [P][k][Q] \quad (11)$$

外力項 $\{f\}$ も同様に $[P]$ でスケールングする。

$$\{R\} = [P]\{f\} \quad (12)$$

これらを $[K]$ と $\{R\}$ について解き、未知数 $\{y\}$ を求める。

$$[K]^{-1}\{R\} = \{y\} \quad (13)$$

$\{y\}$ に $[Q]$ を乗じ、もとの $\{x\}$ を求める。

$$\{x\} = [Q]\{y\} \quad (14)$$

ここに、 $[k]$ : 式(6)の左辺の係数マトリックス、 $\{x\}$ : 未知ベクトル、 $\{y\}$ : 外力ベクトルである。

スケールングマトリックスは、

$$[P] = [Q] = (1/\sqrt{k_{ii}})[I] \text{を用いた。}$$

ここに、 $[I]$ : 単位マトリックスである。

式(11)のスケール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。赤井ら(1976)<sup>16)</sup>およびT. F. Cho<sup>7)</sup>が、間隙水圧の係数のみにオーダーングを行っているが、本手法は係数のスケールングに関する一般的な方法である。

$$[T_I] = \begin{bmatrix} \sin 2\theta & \cos 2\theta & -2\sin\theta \cdot \cos\theta \\ \sin\theta \cdot \cos\theta & -\sin\theta \cdot \cos\theta & \cos 2\theta \cdot \sin 2\theta \end{bmatrix} \dots\dots(19)$$

[K<sub>I</sub>]: 節理群Iのバネマトリックスである。

$$[K_I] = \begin{bmatrix} K_{nI} & 0 \\ 0 & K_{sI} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(20)$$

ここに、θ: x軸から反時計回りの節理群の角度である。節理群のバネは、開口幅を想定したバネ定数 K<sub>nI</sub>(垂直方向)、K<sub>sI</sub>(せん断方向)で規定され、そのひずみは、想定した開口幅と1対1で対応する。また、節理群Iの応力とひずみは、式(21)~(24)で求められる。局所座標系における節理群Iの応力ベクトルは次式で表される。

$$\{\sigma_I\} = [T_I] \cdot \{\sigma\} \dots\dots\dots(21)$$

局所座標系における節理群Iのひずみベクトルは

$$\{\epsilon_I\} = [C_I] \cdot [T_I] \cdot \{\epsilon\} = [C_I] \cdot \{\sigma\} \dots\dots\dots(22)$$

これらの応力の成分は式(23)で表される。

$$\{\sigma_I\} = \{\sigma_{nI}, \tau_{sI}\} \dots\dots\dots(23)$$

これらのひずみの成分は式(24)で表される。

$$\{\epsilon_I\} = \{\epsilon_{nI}, \gamma_{sI}\} \dots\dots\dots(24)$$

ここに、σ<sub>nI</sub>: 節理群Iの鉛直応力、τ<sub>sI</sub>: 節理群Iのせん断応力、ε<sub>nI</sub>: 節理群Iの垂直方向のひずみ、γ<sub>sI</sub>: 節理群Iのせん断方向のひずみである。

(2) 節理群を含む岩盤の透水特性

節理群を含む岩盤の透水特性は、図-4に示すように岩盤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し、同じ値を持つものとする。この仮定から、見かけの岩盤の透水係数[K<sub>B</sub>]は、母岩の透水係数と節理群Iの透水係数の和とし、式(25)で表される。これは、岩盤内の動水勾配と流速が小さく、要素内では母岩と節理群の水の流入出を無視し、要素間では平均的に移動することを仮定している。

$$[K_B] = \{\Sigma [t_I]^T \cdot (k_I / S_I) \cdot [t_I] + [k_R]\} \dots\dots(25)$$

ここに、[k<sub>I</sub>]: 節理群Iの透水係数、[k<sub>R</sub>]: 母岩の透水係数、[t<sub>I</sub>]: 節理群Iの座標変換マトリックスである。

二次元の場合、局所座標系の節理群Iの透水係数と母岩の透水係数は式(26)、(27)で表される。

$$[k_I] = \begin{bmatrix} k_{nI} & 0 \\ 0 & k_{sI} \end{bmatrix} \dots\dots(26) \quad [k_R] = \begin{bmatrix} k_{xR} & 0 \\ 0 & k_{yR} \end{bmatrix} \dots\dots(27)$$

ここに、k<sub>nI</sub>: 節理群Iの節理面に垂直方向の透水係数、k<sub>sI</sub>: 節理群Iの面に平行な方向の透水係数、k<sub>xR</sub>: 母岩のx方向の透水係数、k<sub>yR</sub>: 母岩のy方向の透水係数である。

節理群Iの座標変換マトリックスは式(28)となる。

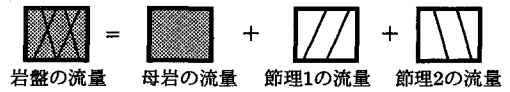


図-4 節理性岩盤の透水特性

$$[t_I] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(28)$$

これは、個々のクラックを考慮した小田<sup>3)</sup>の透水テンソルおよび母岩と節理との水の流入出を考慮した大西ら<sup>18)</sup>、T. F. Cho<sup>7)</sup>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、一般に言わ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<sup>19)</sup>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6項目について解析を実施した。

- (1) 一次元モデルによるFourierの理論解との沈下特性の比較(変形-浸透流連成問題)を行い本手法の離散化における基本的な計算精度を検討する。
- (2) 荒井ら<sup>2)</sup>の一次元モデルとの各時間刻みにおける沈下特性の比較(変形-浸透流連成問題)を行い、本手法で採用している低減積分法の効果を検討する。
- (3) 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(変形-浸透流連成問題)を行い、コンプライアンスマトリックスの定性的な精度を検討する。
- (4) 二次元モデルによる熱変形の効果の検討(変形-浸透流-熱移動連成問題)を行い、熱による変形と透水係数が流速に与える影響度を検討する。
- (5) 大西ら<sup>1)</sup>による二次元モデルとの比較(変形-浸透流-熱移動連成問題)を行い、Sandhu1-2型との精度を比較する。
- (6) 二次元モデルによる各節理群の角度の違いによる変形、透水および熱移動特性の比較(変形-浸透流-熱移動連成問題)をし、その影響度を検討する。

(1) 一次元モデルによるFourierの理論解との比較  
本手法による離散化の精度を見るため、一次元モデルによるFourierの理論解との比較を行った。

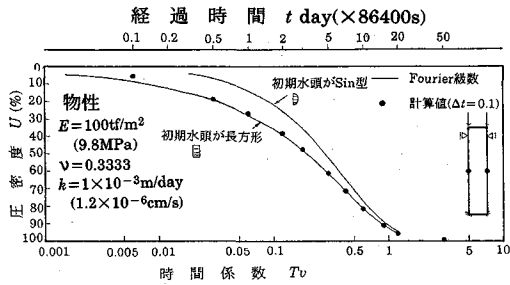


図-5 一次元モデルによるFourierの理論解との比較

表-1 解析物性(荒井ら, 1983)

物性	一次元モデル(地盤[等方性]+水[等方性])
弾性係数	$E=100tf/m^2(0.98MPa)$
ポアソン比	$\nu=0.33$
透水係数	$k_{xR}=k_{yR}=1.0 \times 10^{-6}cm/s$
空隙率	$n=0.3$
単位体積重量	$\gamma=2.0tf/m^3(19.6kN/m^3)$

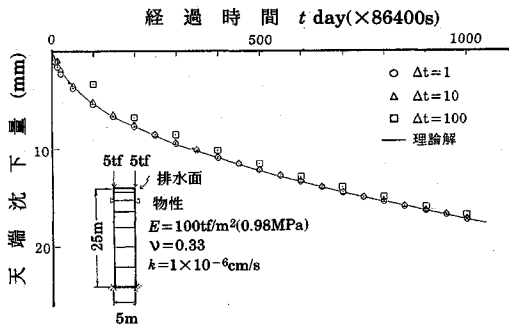


図-6 荒井ら(1983)の一次元モデルとの比較

解析モデルは、幅2m、深さ10mで側方をローラー、下端を固定とし、これらを10要素に分割し、上下端両面から排水されるものとした。図-5は領域中央部の沈下特性の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分かる。

(2) 荒井ら<sup>2)</sup>の一次元モデルとの各時間刻みにおける沈下特性の比較

Sandhu1-1型(4節点)、低減積分の効果を見るため、荒井ら<sup>2)</sup>の研究によるモデルとの比較を行った。表-1は、これらの物性を示す。解析モデルは幅5m、深さ25mとし側方をローラー、下端を固定とし、上端を排水面としている。図-6は荒井らの一次元モデルとの比較である。荒井らの結果では、時間刻み $\Delta t$ が $8.64 \times 10^6s(100day)$ 以下の場合、沈下量が理論解から離れて行くが、本手法では、時間刻み $\Delta t$ を $8.64 \times 10^4, 8.64 \times 10^5, 8.64 \times 10^6s(1, 10, 100day)$ としたが、いずれも理論解に近づいている。

表-2 解析物性(節理群モデル)

物性	一次元モデル(地盤[等方性]+水[節理])
母岩の弾性係数	$E=1000tf/m^2(9.8MPa)$
ポアソン比	$\nu=0.33$
母岩の透水係数	$k_{xR}=k_{yR}=1.0 \times 10^{-8}m/d(1.2 \times 10^{-6}cm/s)$
節理の透水係数	$k_{sf}=1.0 \times 10^{-2}m/d(1.2 \times 10^{-5}cm/s)$
節理の透水係数	$k_{nf}=1.0 \times 10^{-4}m/d(1.2 \times 10^{-7}cm/s)$
空隙率	$n=0.3$
節理角度	$\theta=0^\circ(0rad), \theta=30^\circ(0.524rad), \theta=60^\circ(1.047rad), \theta=90^\circ(1.571rad)$
節理間隔	$S_j=1m$

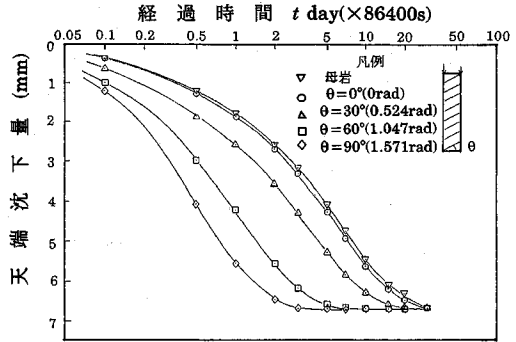


図-7 一次元モデルによる各節理群の異方性角度の違いによる沈下特性の比較

(3) 一次元モデルでの各節理群の角度の違いによる沈下特性の比較(変形-浸透流連成問題)

節理群の角度変化による影響を見るため、図-5に示したものと同一モデルを用いて、各角度の違いによる沈下特性の比較を行った。表-2はこれらの物性を示す。図-7は、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。これらの結果をみると、母岩と、 $\theta=0rad$ の場合がほぼ一致している。 $\theta$ が排水面と直交する方向に近づくに従って、沈下速度が速くなっており、定性的に妥当な傾向を示している。

(4) 二次元モデルによる熱変形の効果の検討(変形-浸透流-熱移動連成問題)

連成問題における熱変形の流速に及ぼす影響をみるため、図-8に示す二次元モデルで変形を考慮した場合としない場合について比較した。二次元モデルの解析条件は、深さ100m、幅200mの下端中央に373K(100°C)の固定温度を与え、側面を排水条件とした。表-3は、解析に用いた物性を示す。図-9は、透水係数が $4.2 \times 10^{-6}cm/s(3.6 \times 10^{-3}m/day)$ で変形を考慮しない場合の流速分布を示し、図-10は、同じ透水係数で変形を考慮した場合の流速分布を示す。変形を考慮しない場合では、側方境界に向かって、ほぼ一律の流速分布を示しているが、変形を考慮した場合は、熱源から遠ざかるにしたがって急速に流速が小さくなっており、側方上部の速度を比較すると図-9の場合より1/1000程度小さくなっている。

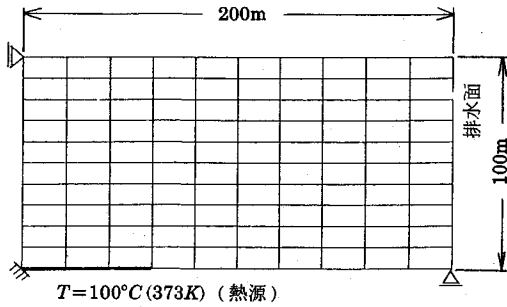


図-8 モデル及び境界条件

表-3 解析物性

物性	二次元モデル(地盤等方性)+水(等方性)+熱(等方性)
弾性係数	$E=1000\text{tf/m}^2(9.8\text{MPa})$
ポアソン比	$\nu=0.2$
透水係数	$k_{xR}=k_{yR}=3.6 \times 10^{-8}\text{m/day}(4.2 \times 10^{-6}\text{cm/s})$
空隙率	$n=0.3$
単位体積重量	$\gamma=2.0\text{tf/m}^3(19.6\text{kN/m}^3)$
固体の比熱	$C_{us}=2.5 \times 10^5\text{cal/t}^\circ\text{C}(1.05 \times 10^3\text{J/kgK})$
水の比熱	$C_{uf}=1.0 \times 10^6\text{cal/t}^\circ\text{C}(4.19 \times 10^3\text{J/kgK})$
固体の熱伝導率	$K_{ts}=0.5\text{cal/m}^\circ\text{Cs}(2.09\text{W/mK})$
水の熱伝導率	$K_{tf}=0.14\text{cal/m}^\circ\text{Cs}(0.586\text{W/mK})$
地盤の熱膨張率	$\alpha=5.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}(5.0 \times 10^{-6}/\text{K})$
水の熱膨張率	$\beta_T=5.0 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}(5.0 \times 10^{-4}/\text{K})$
水の圧縮係数	$\beta_P=4.9 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{tR}(5.0 \times 10^{-10}\text{m}^2/\text{N})$
平均の熱伝導率	$K_{Tm}=nSrK_{tf}+(1-n)K_{ts}$ ; $Sr$ は飽和度
平均の熱容量	$(\rho C_u)_m=nSr\rho C_{uf}+(1-n)\rho C_{us}$

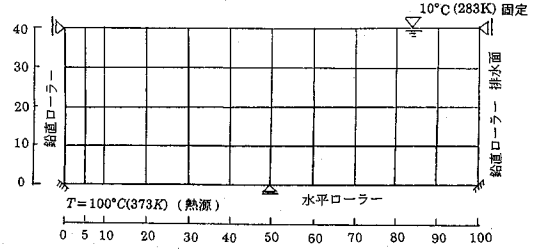
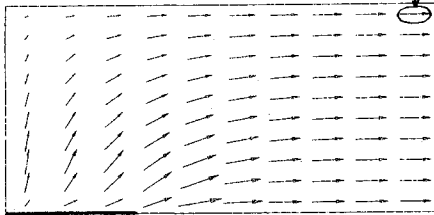


図-11 モデルおよび境界条件(大西ら, 1986)

表-4 解析物性(大西ら, 1986)

物性	二次元モデル(大西ら, 1986)
弾性係数	$E=1000\text{tf/m}^2(9.8\text{MPa})$
ポアソン比	$\nu=0.33$
透水係数	$k_{xR}=k_{yR}=1.0 \times 10^{-7}\text{m/s}(8.64 \times 10^{-3}\text{m/day})$
空隙率	$n=0.3$
単位体積重量	$\gamma=2.0\text{tf/m}^3(19.6\text{kN/m}^3)$
固体の比熱	$C_{us}=2.5 \times 10^5\text{cal/t}^\circ\text{C}(1.05 \times 10^3\text{J/kgK})$
水の比熱	$C_{uf}=1.0 \times 10^6\text{cal/t}^\circ\text{C}(4.19 \times 10^3\text{J/kgK})$
固体の熱伝導率	$K_{ts}=0.5\text{cal/m}^\circ\text{Cs}(2.09\text{W/mK})$
水の熱伝導率	$K_{tf}=0.14\text{cal/m}^\circ\text{Cs}(0.586\text{W/mK})$
地盤の熱膨張率	$\alpha=5.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}(5.0 \times 10^{-6}/\text{K})$
水の熱膨張率	$\beta_T=5.0 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}(5.0 \times 10^{-4}/\text{K})$
水の圧縮係数	$\beta_P=4.9 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{tR}(5.0 \times 10^{-10}\text{m}^2/\text{N})$
平均の熱伝導率	$K_{Tm}=nSrK_{tf}+(1-n)K_{ts}$ ; $Sr$ は飽和度
平均の熱容量	$(\rho C_u)_m=nSr\rho C_{uf}+(1-n)\rho C_{us}$

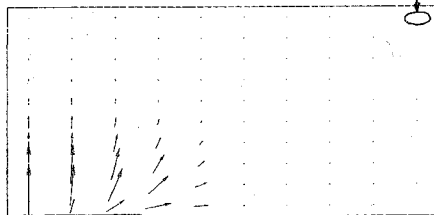
変形固定  $V_x=1.5 \times 10^{-5}\text{m/day}(1.7 \times 10^{-8}\text{cm/s})$



$T=100^\circ\text{C}(373\text{K})$  (熱源)

図-9 熱変形を考慮しない場合の流速(100日後)

変形自由  $V_x=1.7 \times 10^{-8}\text{m/day}(2.0 \times 10^{-11}\text{cm/s})$



$T=100^\circ\text{C}(373\text{K})$  (熱源)

図-10 熱変形を考慮した場合の流速(100日後)

これは、熱による骨格の体積膨張による効果である。また、透水係数が、 $4.2 \times 10^{-8}\text{cm/s}(3.6\text{m/day})$ の場合では、水の熱膨張より透水性の項が卓越しており、変形の境界条件による流速分布の差異は見られなかった。

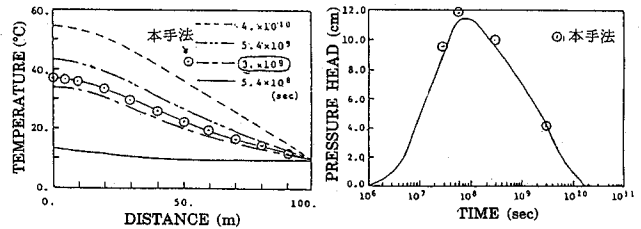


図-12 地表面温度分布

図-13 圧力水頭変化

### (5) 大西ら<sup>1)</sup>の二次元モデルとの比較(変形-浸透流-熱移動連成問題)

Sandhu1-1型とSandhu1-2型の精度を比較するため、大西らの二次元モデルの結果との比較を行った。図-11は、解析モデルおよび境界条件を示す。幅100m、深さ40mの左下端の一点に373K(100°C)を与え、右端側方を排水条件としている。表-4は、これらの物性を示す。図-12は、地表面の温度分布の比較である。本手法の方が、5%程度同じ時間で高くなっている。図-13は、同じく圧力水頭変化の比較である。これは、ほぼ同じ値を示している。

図-14は、左端地表面の鉛直変位の経時変化の比較である。温度分布と同様に、本手法の方が平均的に約5%程度大きくなっている。図-15, 16は $4.8 \times 10^7\text{s}(556\text{day})$ での両者の流速ベクトル分布である。

本手法と大西ら(1986)との比較

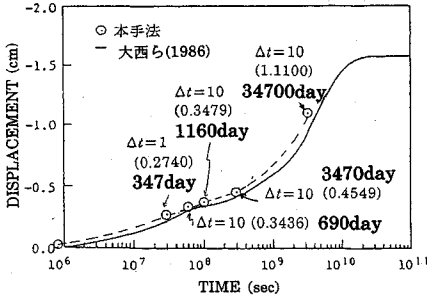


図-14 地表面の鉛直変位の経時変化

time =  $4.8 \times 10^7$  sec (556day) 大西ら(1986)  $2 \times 10^{-10}$  m/sec

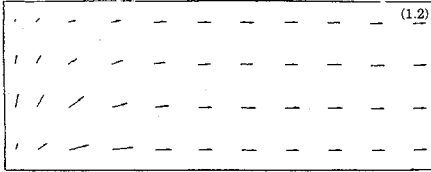


図-15 流速ベクトル分布(大西ら, 1986)

本手法  $2 \times 10^{-10}$  m/sec

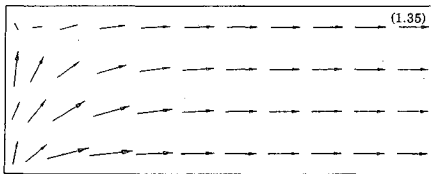


図-16 流速ベクトル分布(本研究)

大西ら(1986) time =  $3.0 \times 10^9$  sec

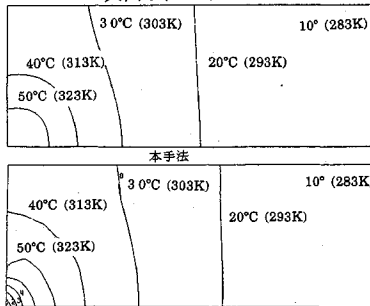


図-17 温度分布の比較

右端側方で本手法の方が約10%程度大きな値を示している。図-17は、 $3 \times 10^9$ s(34722day)での温度分布を示す。これは本手法の方が、約5%程度、熱移動速度が速くなっている。この原因として、本手法の時間刻みが大いことによるものと思われる。

(6) 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(変形-浸透流-熱移動連成問題)

a) 母岩および単一節理群の組合せモデルの検討

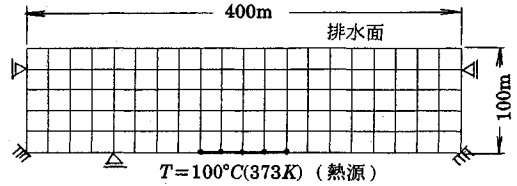


図-18 モデル及び境界条件

表-5 解析物性

物性	二次元モデル(地盤[節理]+水[節理]+熱[等方性])
母岩の弾性係数	$E=1 \times 10^6 \text{tf/m}^2 (9.8 \text{GPa})$
節理の係数バネ	$Kn=1 \times 10^7 \text{tf/m}^3 (98 \text{GN/m}^3)$
節理の係数バネ	$Ks=0.4 \times 10^6 \text{tf/m}^3 (3.92 \text{GN/m}^3)$
ポアソン比	$\nu=0.25$
母岩の透水係数	$k_{xR}=k_{yR}=1.0 \times 10^{-3} \text{m/d} (1.2 \times 10^{-6} \text{cm/s})$
節理の透水係数	$k_{xI}=1.0 \times 10^{-2} \text{m/d} (1.2 \times 10^{-5} \text{cm/s})$
節理の透水係数	$k_{yI}=1.0 \times 10^{-4} \text{m/d} (1.2 \times 10^{-7} \text{cm/s})$
空隙率	$n=0.3$
単位体積重量	$\gamma=2.0 \text{tf/m}^3 (19.6 \text{kN/m}^3)$
固体の比熱	$Cus=2.5 \times 10^5 \text{cal/t}^\circ\text{C} (1.05 \times 10^3 \text{J/kgK})$
水の比熱	$Cuf=1.0 \times 10^6 \text{cal/t}^\circ\text{C} (4.19 \times 10^3 \text{J/kgK})$
固体の熱伝導率	$Kts=0.5 \text{cal/m}^\circ\text{Cs} (2.09 \text{W/mK})$
水の熱伝導率	$Ktf=0.14 \text{cal/m}^\circ\text{Cs} (0.586 \text{W/mK})$
地盤の熱膨張率	$\alpha=5.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} (5.0 \times 10^{-6} / \text{K})$
水の熱膨張率	$\beta_T=5.0 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C} (5.0 \times 10^{-4} / \text{K})$
水の圧縮係数	$\beta_P=4.9 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{tf} (5.0 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N})$
平均の熱伝導率	$K_{Tm}=nSrPcuf+(1-n)Kts$ ; $Sr$ は飽和度
平均の比熱	$(\rho Cv)\bar{m}=nSrPcuf+(1-n)psCus$
節理角度	母岩, $\theta=30^\circ(0.524 \text{rad}), \theta=60^\circ(1.047 \text{rad}), \theta=0^\circ, \theta=90^\circ(1.571 \text{rad}), \theta=0^\circ+90^\circ(0+1.571 \text{rad}), \theta=30^\circ+60^\circ(0.524+1.047 \text{rad}), \theta=\pm 30^\circ(\pm 0.524 \text{rad})$
節理間隔	$S_I=1 \text{m}$

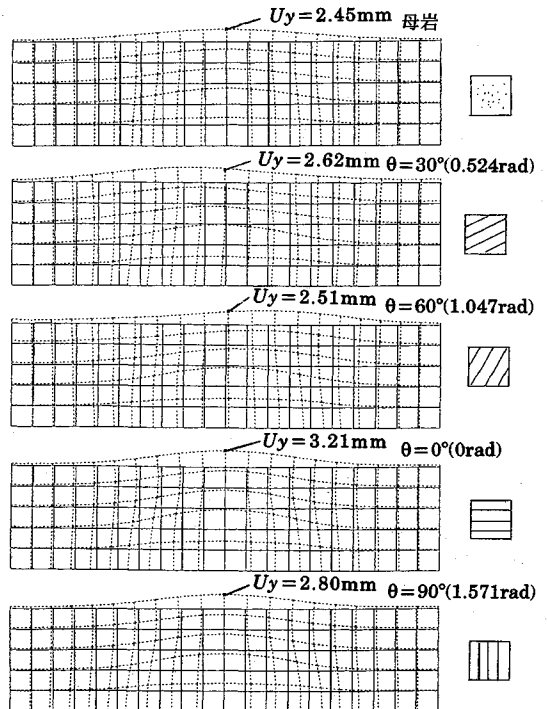


図-19 変形分布(5000日後)

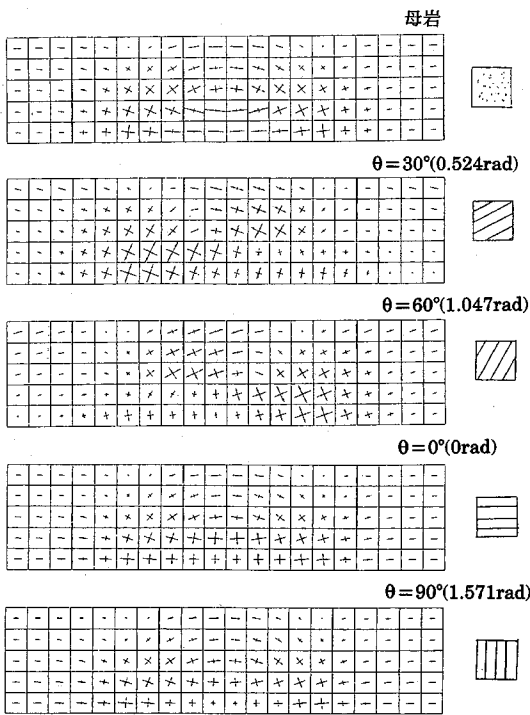


図-20 主応力分布(5000日後)

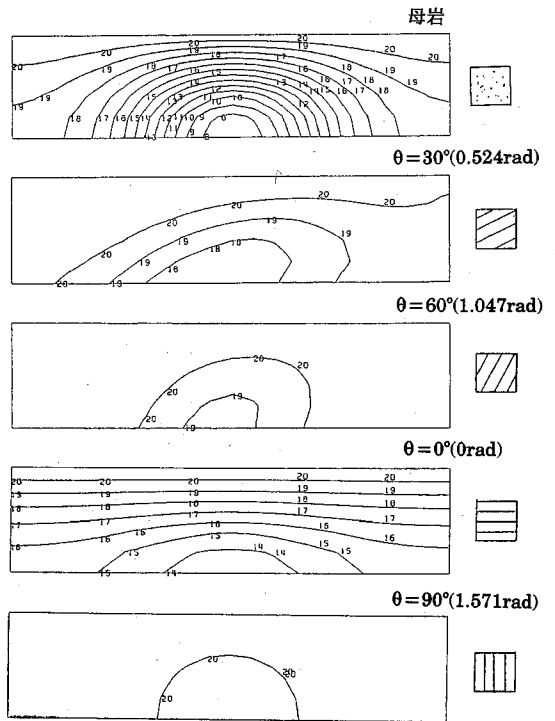


図-22 圧力分布(5000日後)

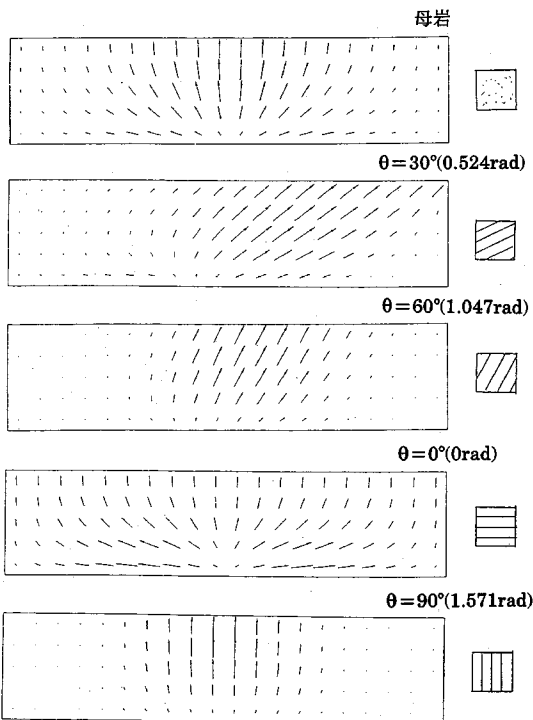


図-21 流速分布(5000日後)

節理群の影響を見るため、母岩に対して単一の節理群が $\theta=30^\circ(0.524\text{rad})$ ,  $\theta=60^\circ(1.047\text{rad})$ ,  $\theta=0^\circ(0\text{rad})$ ,  $\theta=90^\circ(1.571\text{rad})$ の方向に存在している場合について検討した。図-18は、解析モデルおよび境界条件を示す。

表-5に解析に用いた物性を示す。透水特性は一次元モデルと同様とした。図-19は、5000日後の変形分布を示す。鉛直方向の変位は、 $\theta=0^\circ$ が最も大きく、 $\theta=90^\circ$ の場合は母岩に近くなっている。図-20は、同様に主応力分布を示す。これらでは、特に $\theta=30^\circ$ ,  $\theta=60^\circ$ の場合、熱源近傍で応力分布が逆パターンになっている。また、 $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ と母岩を比較すると節理群の法線方向に応力が解放される傾向にあることが分かる。図-21は、同様に流速分布を示す。いずれも節理群の方向に沿って流れているのが分かる。図-22は、同じく圧力分布を示す。節理が排水面に直交している $\theta=90^\circ$ が最も早く圧力が低下し、以下、 $\theta=60^\circ$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $\theta=0^\circ$ , 母岩の順となっている。

#### b) 複数節理群の組合せモデルの検討

岩盤に複数の節理群が存在する場合について検討した。節理群の組合せは、 $0^\circ+90^\circ(0+1.571\text{rad})$ ,  $30^\circ+60^\circ(0.524+1.047\text{rad})$ ,  $\pm 30^\circ(\pm 0.524\text{rad})$ の3ケースを設定した。これらの物性は、単一節理群のものと同様である。



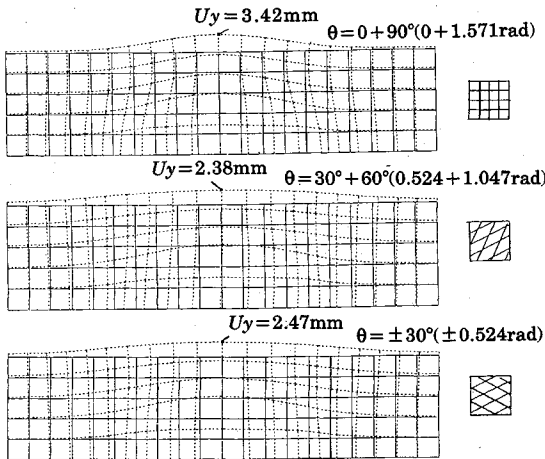


図-23 変形分布(5000日後)

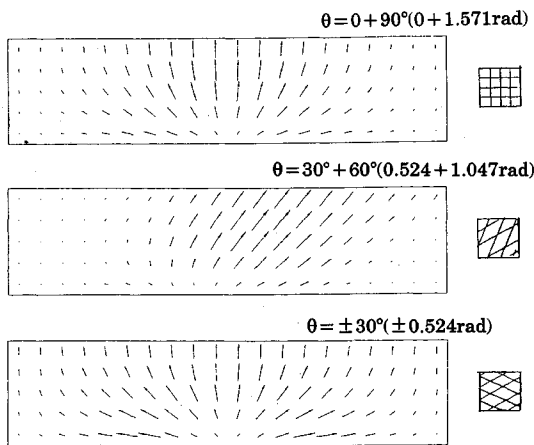


図-24 流速分布(5000日後)

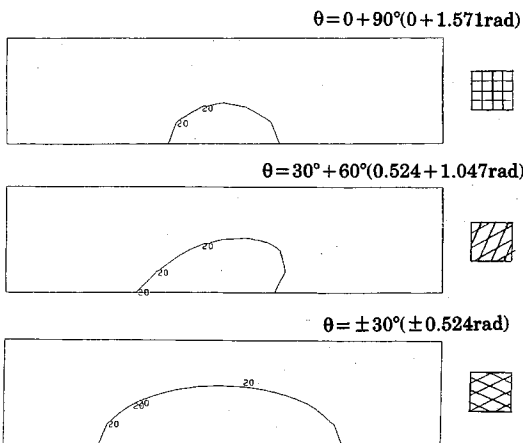


図-25 圧力分布(5000日後)

図-23は、5000日後の変形分布を示す。変形の絶対量は、 $\theta=0^\circ+90^\circ(0+1.571\text{rad})$ 、 $\theta=\pm 30^\circ$  ( $\pm 0.524\text{rad}$ )、 $\theta=30^\circ+60^\circ(0.524+1.047\text{rad})$ の順となっている。変形モードは、単一節理群の各ケースの重ね合わせとして表されている。また、主応力分布も変形の場合と同様の傾向を示し、基本的に節理群の組合せの数が多いほど、応力はそれらの平均的な方向に分散される傾向を示す。

図-24は、同様に流速分布を示す。これも、単一節理群の場合の重ね合わせとして表され、節理群の組合せの平均的な角度の方向に沿って流れている。図-25は、同様に圧力分布を示す。排水面と節理群の方向が直交に近くなる程、圧力が早く消散している。

## 6. 結論

本検討では、大西ら<sup>1)</sup>の定式化を基本に、O. C. Zienkiewicz ら<sup>3)</sup>の圧密係数を導入した。また、これらに有限要素法のSandhu1-1型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。

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、理論解および既存の研究結果との比較を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 標準の4節点要素(Sandhu1-1型)に低減積分を適用した結果、初期載荷時の振動現象をある程度抑えられた。また、その沈下特性は比較的大きな時間刻みでも理論解に収束する。
- (2) 本手法とSandhu1-2型の比較では、圧力水頭は概ね一致しているが、温度、変位、流速分布では本手法が、全体的に5%程度大きい値を示した。これは、本手法の時間刻みが大きいことに起因していると思われる。
- (3) 流速に対する熱変形の影響は、透水係数が小さくなる程顕著である。特に、熱源から離れた場所では、その速度は急激に減少する。また、水の熱膨張率との比が $1.0 \times 10^5 \sim 6$ 以上の透水係数では、熱変形の影響は小さい。
- (4) コンプライアンスマトリックス法による節理群の表現は、各節理群の基本的な性質の重ね合わせの結果として表現される。

これは種々の節理群の組合せが可能であり、個々の節理の応力やひずみが直接求められ、実際の現象を表現できる有効な手法である。

以上は節理群を考慮した一次元および二次元モデルを検討した結果である。これらは、定性的に妥当なものだと判断され、節理性岩盤への適用性が確認された。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，土木学会論文集，第370号/III-5，pp.151~158，1986.
- 2) 荒井克彦・渡辺知幸・田行啓一：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.
- 3) 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.29~34，1987.
- 4) 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46回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp.550~551，1991.
- 5) 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.
- 6) 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，土質工学会論文報告集，Vol. 30, No. 3，pp.161~173，1990.
- 7) Cho, T. F. : Continuum and discrete modeling of porous and jointed rock : Application to the design of near surface annular excavations, The University of Wisconsin, 1988.
- 8) Cho, T. F. 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) Zienkiewicz, O. C. and Shiomi, T. : Dynamic behavior of saturated porous media : The generalized Biot formulation and its numerical solution, Int. Jour. for Num. and Anal. Meth. in Geomech. Vol. 8, pp.71~96, 1984.
- 10) 大津宏康・大西有三・亀村勝美：間隙水と変形応力の連成を考慮した地盤構造物の設計に関する一考察，土木学会論文集，No. 457/III-5，pp.87~91，1992.12.
- 11) Oden, J. T. : RIP methods for Stokesian flows, Finite Element in Fluids, Vol. 4, pp.205~318, 1982.
- 12) Wilkinson, J. H. et al : Linear Algebra, Handbook for Automatic Computation, Vol. 2, Springer-Verlag, 1971.
- 13) Shah, J. M. : Ill-conditioned stiffness matrices, Jour. ASCE, ST 4, pp.443~458, 1966.
- 14) 一松信・戸川隼人編：数値計算における誤差-有限要素法の誤差(武田洋)-，共立出版，pp.161~172，1983.
- 15) 小国力・村田健郎・三好俊郎・ドンガラ J.J.・長谷川秀彦：行列計算ソフトウェア，丸善，pp.75~87，1991.
- 16) 赤井浩一・田村武：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.
- 17) Hill, R. : Elastic properties of reinforced solids : Some theoretical principles, Jour. Mech. Phys. Solids 11, pp.357~372, 1963.
- 18) 大西有三・小林晃・塩田卓夫：二重空隙モデルを用いた地盤挙動に関する研究，土木学会論文集，第454号/III-20，pp.61~69，1988.
- 19) 小林晃・大西有三：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，土木学会論文集，第376号/III-6，pp.101~110，1986.

(1993. 2. 5 受付)

## THE THERMO-MECHANICAL CONSOLIDATION COUPLING ANALYSIS AND ITS DISCRETIZATION ON JOINTED ROCK MASS BY FINITE ELEMENT METHOD

Takeshi SASAKI and Fumio NAGAI

This paper describes the coupling analysis of thermo-mechanical consolidation and its discretization method to simulate the seepage flow due to heat and deformation of nuclear waste storage on jointed rock mass by finite element method. The authors followed basic equations presented by Ohnishi et al. (1986) and an anisotropic stress-strain and permeable constitutive laws are employed for combining arbitrary oriented joint sets by compliance matrixes (T. F. Cho, 1988). Four node standard iso-parametric finite element as Sandhu 1-1 type with reduced integration and scaling method are employed for the stabilities of numerical calculations. The results of two dimensional rock mass models with combining arbitrary oriented joint sets show that the direction of fluid flow is followed along the joint sets, and those are seemed to be clearly explained of the influence of joint orientations.