

MBCモデルによる不連続性岩盤の 三次元変形・浸透流連成解析

田部井 和人¹・森川 誠司²・森 孝之³・岩野 圭太³・吉田 秀典⁴・堀井 秀之⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

E-mail: tabei@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁴正会員 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町2217-20)

⁵正会員 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

岩盤の等価連続体モデルの一種であるMBCモデル(Micromechanics-Based Continuum Model)¹⁾を用いた不連続性岩盤の三次元的な応力・変形挙動と地下水挙動の連成解析手法を開発した。本手法により、不連続面のすべりや開口を考慮した岩盤の安定性や不連続面の開口に伴う岩盤の異方的な透水特性を考慮した地下水挙動を連成して予測することが可能となる。本論文では開発した解析手法の概要を紹介するとともに、円孔モデルの壁面に水圧を作用させた解析や不連続性岩盤中における放射性廃棄物処分空洞掘削を模擬した解析を実施し、連成効果を確認した。

Key Words : micromechanics-based continuum model, jointed rock masses, deformation and flow coupled analysis

1. はじめに

亀裂などの不連続面を多く含む岩盤の変形や地下水挙動は、この不連続面の存在に支配されることが多いと言われている。したがって、岩盤内に重要構造物を建設する場合、不連続面を含む岩盤は荷重方向によって異方的な挙動を示すため、合理的な設計を行うためには、このような力学特性を的確に設計へ反映させることが必要となる。また近年、放射性廃棄物地層処分場における天然バリアや液化石油ガス岩盤タンクなどのエネルギー地下備蓄基地における水封システムなどのシーリングシステムの信頼性を高精度に評価するためには、岩盤の力学挙動だけでなく、掘削による不連続面の開口が地下水挙動へ与える影響も設計に考慮する必要がある。これまでに、筆者らは不連続面を含む岩盤を等価な連続体に置き換え、不連続面の開口やせん断すべりを考慮できる三次元MBC解析プログラムを開発し、その適用性について検討を行ってきた^{2,3)}。また、MBC解析によって得られた不連続面の開口量分布から岩盤の異方的な透水特性の変化を考慮した浸透流解析を実施することにより、不連続面の開口を考慮した地下水挙動を予測する手法を提案した⁴⁾。しかし、局所的な水圧増加に伴う有効応力の低減

により、不連続面が開口する現象や不連続面の開口に伴う岩盤の異方的な透水特性の変化を同時に考慮するには、変形挙動と浸透流挙動を連成させた解析が必要である。そこで、本研究では、MBCモデルによる不連続性岩盤の変形挙動と不連続面開口による異方的な透水性を考慮した地下水挙動を連成させた有限要素解析手法を開発した。

2. 解析手法の概要

(1) 岩盤の変形と浸透流の連成解析

地盤の変形と地下水流動を連成させ、圧密問題を有限要素法により解く手法については、多数の研究がなされている。本研究では、Biotの多次元圧密理論に基づき赤井・田村⁵⁾が定式化した方法を用いている。式(1)に離散化した式を示す

$$\begin{bmatrix} K & L \\ L^T & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \gamma_w h|_{t+\Delta t} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \sum \alpha_i \gamma_w h_i|_{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F + L \gamma_w h|_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 K は要素剛性マトリックス、 L は節点変位から要素の体積変化量を求めるベクトル、 i は隣接要素、 α, α_i は透水係数や隣接要素との重心距離などで決まる変数、 Δu は節点の増分変位、 h は対象要素の全水頭、 h_i は隣接要素の全水頭、 ΔF は増分荷重、 γ_w は水の単位体積重量である。

(2) MBCモデルの概要

MBCモデルは、不連続性岩盤において空洞掘削等により生ずる不連続面の開口やせん断すべりを岩盤の挙動の支配的メカニズムと考え、不連続面を含む岩盤の力学挙動を捉えようとする連続体理論である。定式化にあたっては図-1に示すように不連続面をモデル化し、その挙動に基づき代表要素内において平均操作を行うことにより式(2)に示すように、平均応力 $\bar{\sigma}_{ij}$ と平均ひずみ $\bar{\epsilon}_{ij}$ の関係が求められることができる。

$$\bar{\epsilon}_{ij} = D_{ijkl}^R \bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_m \int_{S^m} ([u_i^{(m)}] n_j^{(m)} + [u_j^{(m)}] n_i^{(m)}) ds \quad (2)$$

ここで、 D_{ijkl}^R は岩盤基質部のコンプライアンステンソル、 V は代表要素の体積、 S^m は代表要素中の m 番目の不連続面、 $n_i^{(m)}$ はジョイント面での単位法線ベクトル、 $[u_i^{(m)}]$ はジョイント面での変位の不連続量である。

(3) 等価透水係数の評価方法

不連続面の開口を考慮した各要素の等価透水係数は、MBCモデルによる三次元変形解析で求められた各要素の不連続面セットごとの開口量から式(3)より求める。

$$K = K_{matrix} + \sum_{i=1}^n R_i^T K_i R_i \quad (3)$$

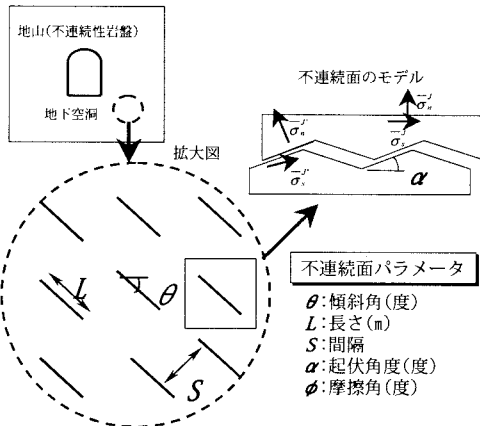


図-1 MBCモデルの概念

ここで、 K_{matrix} は岩盤基質部の等方性透水マトリックス、 n は不連続面セット数、 R_i は i 番目の不連続面セットの局所座標から全体座標への座標変換マトリックスである。また、 K_i は i 番目の不連続面セットに関する局所座標系での透水マトリックスであり、式(4)と式(5)で表される。

$$K_i = \begin{pmatrix} k_i & 0 & 0 \\ 0 & k_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$k_i = \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{1}{12} \frac{b_i^3}{S_i} \quad (5)$$

ここで、 γ_w は水の単位体積重量、 μ は水の粘性係数、 S_i は i 番目の不連続面セットの平均間隔、 b_i は i 番目の不連続面セットの開口幅である。

3. 解析事例

(1) 円孔壁面に水圧を作用させる解析

本解析は開発した解析手法の連成効果を確認することを目的に、円孔壁面に水圧を作用させ、円孔周辺岩盤内の不連続面が開口することにより、周辺岩盤の間隙水圧の変化や周辺岩盤に流入する流量について検討したものである。解析メッシュ及び境界条件を図-2に示す。解析領域は円孔を中心にX方向に5m×Y方向に5mの範囲とした。解析に使用した物性を表-1に示す。Y軸に平行な多数の不連続面を含む岩盤を考え、これをMBCモデルにより等価な連続体にモデル化した。初期地圧は土被り500m相当(12.5MPa)で等方等圧とした。解析ステップは、円孔を掘削後、水圧を0MPaから14.5MPaまで0.5MPaきざみで、約30分かけて壁面に作用させた。

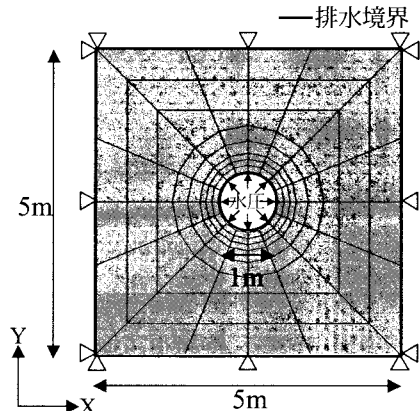


図-2 解析モデル

表-1 岩盤及び不連続面の物性

岩盤 基質部	弾性係数 (GPa)	5
	ポアソン比	0.25
	透水係数 (m/s)	1.0×10^{-9}
不連続面	方向	Y軸に平行
	有効寸法 (m)	1
	間隔 (m)	0.05
	摩擦角 (度)	20
	起伏角 (度)	10

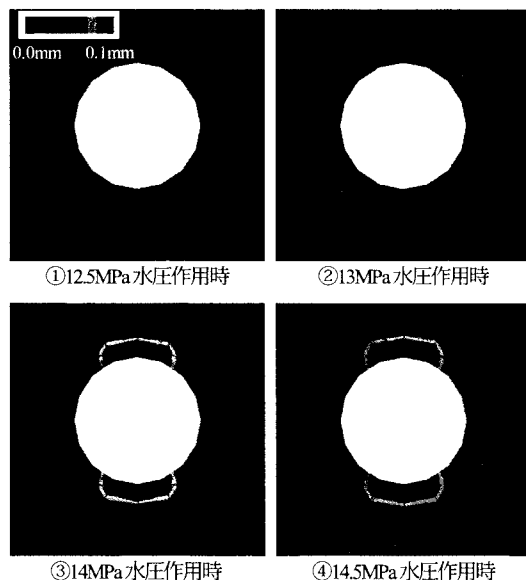


図-3 開口量分布図

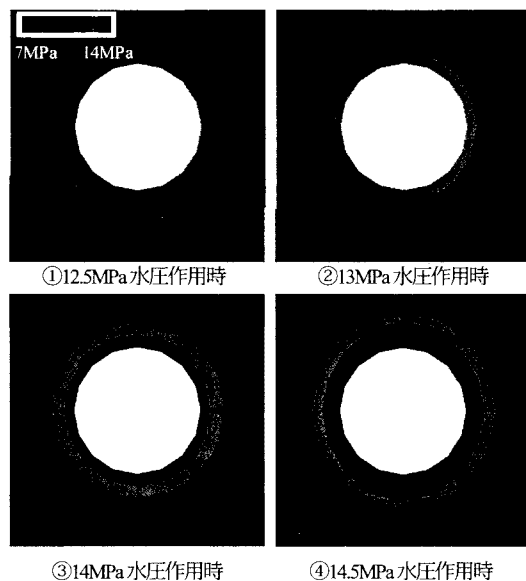


図-4 間隙水圧分布図

図-3に不連続面の開口量分布を示す。12.5MPaまで水圧を増加させた時点で円孔壁面の上下の部分で不連続面が初めて開口する。さらに水圧を増加させると開口が進展する。図-4は円孔周囲の間隙水圧分布である。不連続面の開口した領域では、開口していない領域に比べ、間隙水圧が増加していることが分かる。また、開口が進展するにつれ、間隙水圧が増加する領域も増えている。図-5に円孔壁面近傍における不連続面の開口量の経時変化を示す。壁面から5cmの要素は、水圧が12.5MPaの時点で不連続面が開口し、その後、水圧が14MPaに達するまでは開口量はほとんど増加しないが、水圧が14MPaに達すると、再び開口量が急増する。また、壁面から25cmの要素は水圧が13MPaに達した時点で開口しており、開口が徐々に進展していることが分かる。図-6に円孔の壁面における流入量の経時変化を示す。流入量は、不連続面が初めて開口する水圧が12.5MPaのステップの次ステップで一旦急増する。これは、本手法が不連続面の開口による透水特性変化を次のステップで反映するためである。その後、不連続面の開口に伴い、流入量は再び増加する。このように、水圧の作用によって不連続面が開口する現象や、不連続面の開口により岩盤の透水性が増加し、岩盤に流入する流量が増加するという連成効果を確認できた。

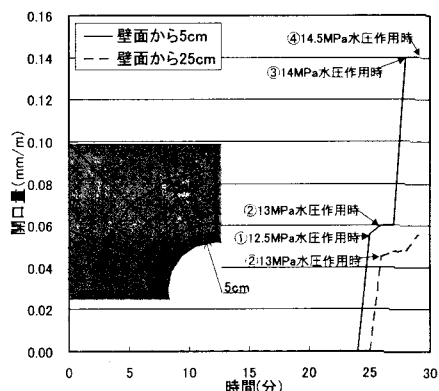


図-5 開口量の経時変化

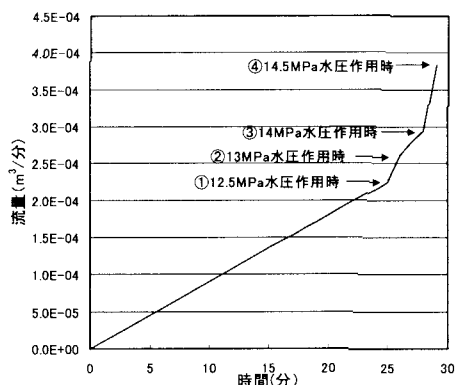


図-6 流入量の経時変化

(2) 放射性廃棄物処分空洞掘削解析

本解析は、高レベル放射性廃棄物処分空洞を模した解析モデルを用いて、空洞掘削時に生じる不連続面の開口が空洞周辺の地下水流動挙動へどのような影響を与えるか検討するために行った。検討対象とした空洞の形状は図-7に示すような断面を有するものとした。処分孔の孔径やそれらのピッチについては、高レベル放射性廃棄物の処分坑道・処分孔のレイアウトとして検討されている案⁶⁾を簡素化し、30mの坑道長に4本のピットがあるというケースを考えた。その概要を記載した空洞周辺の拡大図を図-8に示す。空洞の深度は1,000mを想定した。解析領域は処分空洞を中心に空洞長手方向(X方向)に75m、空洞横断面の鉛直(Z方向)及び水平方向(Y方向)に対してはそれぞれに50mの範囲とした。解析における境界条件としては、境界上の全節点を変位固定および排水条件とした。また、掘削後空洞及びピット壁面は排水条件とした。初期地圧は空洞位置で土被り1,000m相当(27MPa)になるように解析領域の上部に上載荷重を設定し、深度方向には土被りに応じて初期地圧を変化させた。側圧は1.0とした。

周辺岩盤は多数の不連続面を含むが、解析結果の解釈を容易なものとするために、卓越する不連続面は1セットのみと仮定した。具体的には不連続面が坑道長手方向(X軸)に直交する場合(ケース1)、Y軸に直交する場合(ケース2)という2つを考え、こうした不連続性岩盤に関してはMBCモデルによる解析を実施した。比較のために、不連続面を考慮しない場合(ケース3、弾性解析)も追加実施した。解析ステップは、初期地圧及び地下水位を設定した後、坑道およびピットを一括掘削し、その後1年間を放置期間とした。解析に使用した物性を表-2に示す。

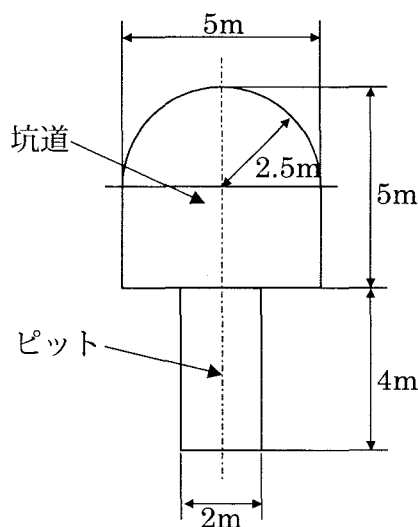


図-7 空洞の断面形状

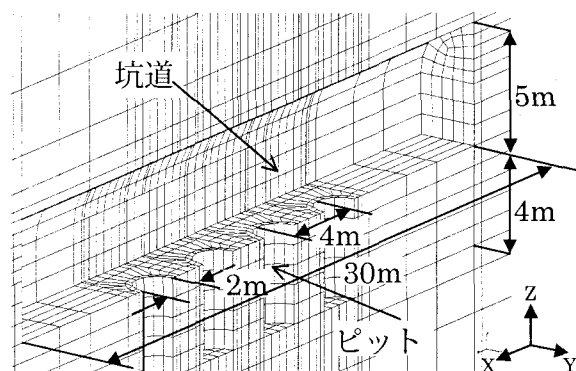


図-8 解析モデル

表-2 岩盤基質部及び不連続面の物性

岩盤基質部	弾性係数(GPa)	6		
	ポアソン比	0.25		
	密度(g/cm ³)	2.7		
	透水係数(m/s)	8.0×10^{-8}		
不連続面		ケース1	ケース2	ケース3
	走向角(度)	0	0	—
	傾斜角(度)	90	0	—
	有効寸法(m)	1	1	—
	間隔(m)	1	1	—
	摩擦角(度)	40	40	—
	起伏角(度)	10	10	—

図-9は、X軸(坑道長手方向)に直交する不連続面を考慮した解析の開口量分布を示す。坑道の妻壁近傍や各処分ピット間で不連続面が開口していることが分かる。

図-10は、Y軸に直交する不連続面を考慮した解析の開口量分布を示す。坑道壁面で不連続面が開口していることが分かる。図-11は、X軸(坑道長手方向)に直交する不連続面を考慮した解析の間隙水圧分布、図-12は、Y軸に直交する不連続面を考慮した解析の間隙水圧分布を示す。図-13は、比較のため不連続面を考慮しない解析の間隙水圧分布を示す。X軸(坑道長手方向)に直交する不連続面を考慮した解析では、不連続面を考慮しない解析に比べ、不連続面が開口している坑道妻壁近傍で透水係数が増加するため、間隙水圧が低下していることが分かる。一方、Y軸(空洞長手方向)に直交する不連続面を考慮した解析では、不連続面を考慮しない解析に比べ、不連続面が開口している坑道壁面近傍で透水係数が増加するため、間隙水圧が低下していることが分かる。掲載した図は空洞掘削直後の結果であるが、その後放置しても結果に変化は見られなかった。これは、今回想定した岩盤が硬岩であり、空洞掘削中に間隙水圧の消散が進んだためと考えられる。

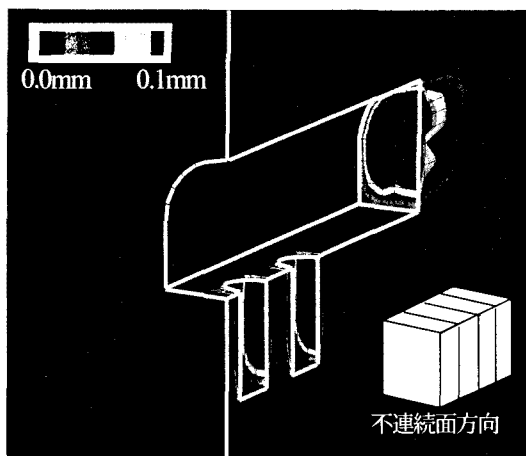


図-9 開口量分布 (ケース1: X軸に直交する不連続面)

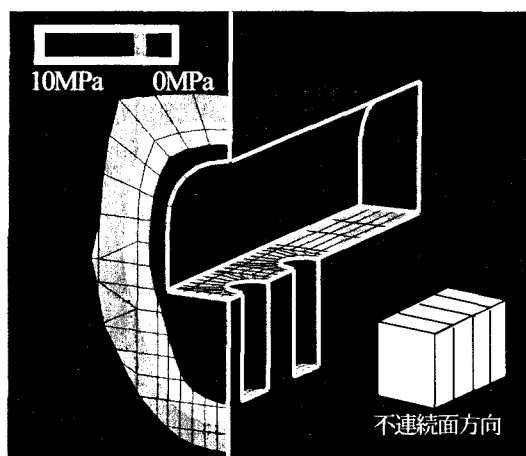


図-11 間隙水圧分布 (ケース1: X軸に直交する不連続面)

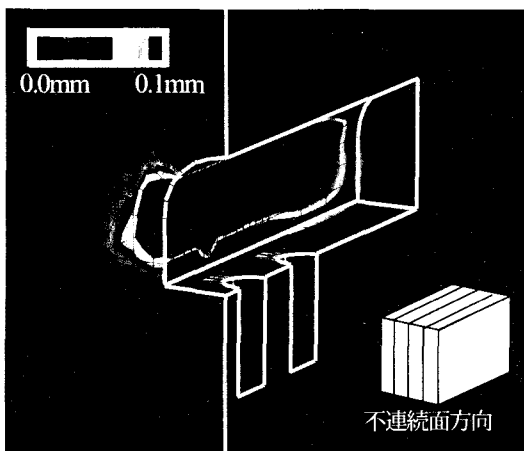


図-10 開口量分布 (ケース2: Y軸に直交する不連続面)

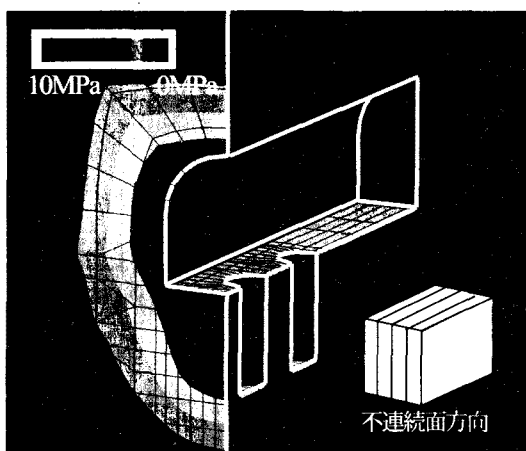


図-12 間隙水圧分布 (ケース2: Y軸に直交する不連続面)

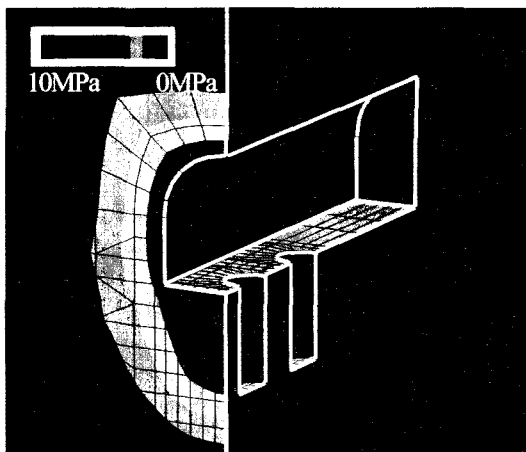


図-13 間隙水圧分布 (ケース3: 不連続面無し)

4. まとめ

MBCモデルを用いて、不連続性岩盤を対象とした三次元的な応力・変形挙動と地下水挙動の連成解析手法を開発した。これにより、不連続面のすべりや開口を考慮した岩盤の安定性や不連続面の開口に伴う岩盤の異方的な透水特性の変化を考慮した地下水挙動を連成して予測することが可能となった。今回実施した円孔壁面に水圧を作用させる解析により、水圧の作用によって不連続面が開口する現象や、不連続面の開口により岩盤の透水性が増加し、岩盤に流入する流量が増加するという連成効果を確認できた。また、放射性廃棄物処分空洞を模擬した解析では、不連続面の開口によるゆるみ域中の異方的な透水特性の評価が可能であることが分かった。今後は、さらに不連続面の物性に関する感度解析を実施するとともに、実構造物への適用、実測との比較を図っていく予定である。

参考文献

- 1) Yoshida, H. and Horii : H. Micromechanics-Based Continuum Model for a Jointed Rock Mass and Excavation Analysis of a Large-Scale Cavern, pp.119-145, Int. Jour. of Rock Mech. and Min. Science, Vol.41, Issue 1, 2004.
- 2) 田部井和人, 森川誠司, 森孝之, 岩野圭太, 堀井秀之, 吉田秀典 : MBC モデルによる円形トンネルの三次元変形解析, pp.989-990, 第38回地盤工学研究発表会, 2003
- 3) 田部井和人, 森川誠司, 森孝之, 岩野圭太, 堀井秀之, 吉田秀典 : MBC モデルによる高レベル放射性廃棄物処分空洞の三次元変形解析, pp.393-394, 土木学会第58回年次学術講演会, 2003
- 4) 田部井和人, 森川誠司, 立川伸一郎, 岩野圭太, 森孝之, 日比谷啓介, 堀井秀之, 吉田秀典 : MBCモデルによる不連続性岩盤の三次元変形・浸透流解析, pp.677-678, 土木学会第59回年次学術講演会, 2004
- 5) 赤井浩一, 田村武 : 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, pp.95-104, 土木学会論文報告集, 1978
- 6) 核燃料サイクル開発機構 : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 総論レポート, 1999

3-DIMENSIONAL HYDRO-MECHANICAL COUPLING ANALYSIS FOR DISCONTINUOUS ROCK MASSES CONSIDERING THE BEHAVIOR OF JOINTS BY MICROMECHANICS-BASED CONTINUUM MODEL

Kazuto TABEL, Seiji MORIKAWA, Takayuki MORI, Keita IWANO,
Hidenori YOSHIDA and Hideyuki HORII

Mechanical and hydraulic behavior of jointed rock masses is strongly affected by the characteristic of joints. Therefore, in designing the rock structures, it is necessary to consider the behavior of discontinuities of rock masses. In this study, the coupled modeling of deformation and flow of the jointed rock masses is carried on the basis of the Micromechanics-Based Continuum approach. The authors developed three dimensional finite element analysis system by using MBC model, by which the deformation and seepage flow of rock masses can be predicted more precisely. In this paper, the outline of the formulation and two numerical examples are shown.