

亀裂開口現象を考慮した大深度坑道掘削の解析的検討

Analysis of the tunnel excavation behavior in deep underground under considering the joint opening phenomenon

森 孝之*・田部井 和人*・岩野 圭太*・中間 茂雄**・佐藤 稔紀**・松井裕哉**

Takayuki MORI, Kazuto Tabei, Keita Iwano, Shigeo Nakama, Toshinori SATO and Hiroya Matsui

In case of excavating the underground structure in deep geological formations, highly precise research and evaluation methods of geological index, such as initial stress distribution, EDZ(Excavation Disturbed Zone), and variation of geological parameters, need to be developed. Especially, considering the sliding and opening behavior of joint is need in jointed rock mass. In this paper, based on some geomechanical investigations with 1,000m borehole, following analysis was carried out in order to reproduce the geological phenomenon.

First of all, 3D rock mechanical model was made for 3D FEM analysis and 3D stress distributions that approximately fit with in-situ data were obtained in the surrounding wide area. Then, based on the result of 3D FEM analysis, 2D MBC(Micromechanics-Based Continuum Model) analysis that can consider the discontinuous rock behavior was conducted for shaft and gallery cases. In the gallery case, the joint sliding and opening behavior was found to vary depending on the orientation of the gallery. And furthermore, hydraulic conductivities in surveyed area are calculated according to the joint opening behaviors.

Key words : 3D FEM, rock mass behavior, MBC model

1. はじめに

地下深部に岩盤構造物を構築する際、合理的な設計・施工や空洞の安定性確保の観点から、対象となる場の初期応力分布および、掘削による影響領域の広がりや物性値の変化を精度よく予測し、評価する技術が必要である。その中でも特に、不連続性岩盤を対象とした評価では、岩盤内に無数に含まれる不連続面の開口やせん断による変形挙動を考慮することが、大深度地下に構造物を設計する上で重要であると考えられる。

本論文では、花崗岩類を主体とした調査区域を対象とし、まず第 1 段階として、地表から実施された 1,000m 級の試錐孔調査によって得られた岩盤力学物性データをもとに、3 次元岩盤力学モデルを構築した。さらにそのモデルについて 3 次元 FEM (Finite Element Method) 解析により初期応力解析を実施し、実測値とのフィッティングを行った。第 2 段階では、3 次元 FEM 解析により得られた応力分布をもとに、岩盤内の不連続面の挙動を考慮可能な MBC モデル (Micromechanics-Based Continuum Model) ¹⁾ を適用して、掘削に伴う坑道周辺岩盤の力学的影響に関する予測解析を行った。その結果、坑道周辺岩盤の破壊発生の可能性や、坑道展開方向による不連続面と空間的位置関係から、力学的影響範囲の違いなどについて考察を行い、さらに坑道周辺の不連続面の開口から岩盤の透水性変化についても予測した。

2. 研究対象領域の地質概要

研究対象領域は、岐阜県瑞浪市に位置する核燃料サイクル開発機構の正馬様用地を中心とした領域である。この領域では、新第三紀中新世の瑞浪層群や第四紀の瀬戸層群が表層部に層厚数十～100m 堆積し、それ以下は基盤となる土岐花崗岩より構成されている。またこの領域には、月吉断層と呼ばれる走向 N80° E、傾斜 63° S の逆断層が存在している。地表から実施された 1,000m 級の鉛直下向き試錐調査 (AN-1 号孔, MIU-1 号孔, MIU-2 号孔, MIU-3 号孔) および既存の調査結果から、月吉断層上盤側の土岐花崗岩内では鉛直幅 300～400m にわた

* 正会員 鹿島建設㈱

** 正会員 核燃料サイクル開発機構

り、割れ目頻度が少ないゾーンが見出されている。

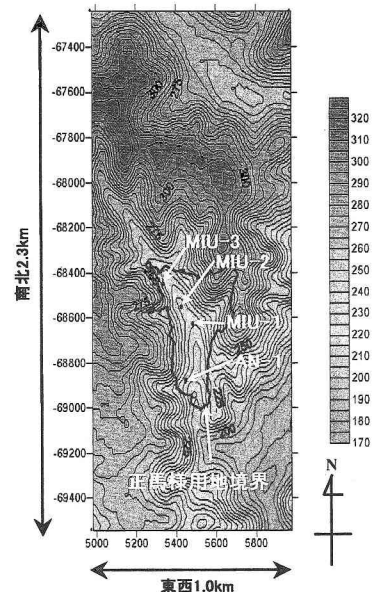
3. 岩盤力学モデルの構築

3.1 解析メッシュの作成

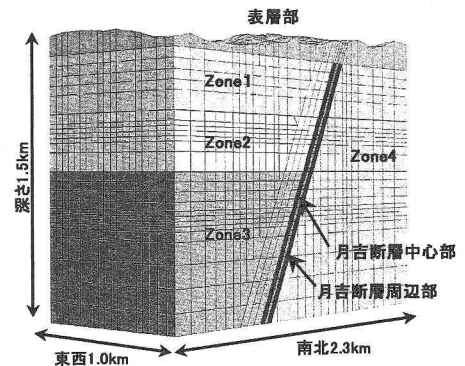
研究対象領域の試錐調査をはじめとした調査結果をもとに、正馬様用地を中心とした岩盤力学モデルの構築を行った。解析領域は、図－1および図－2で示すように正馬様用地を含み、月吉断層の影響を考慮した南北2.3km×東西1.0km×深度1.5kmの大きさとした。調査結果から、表層部（堆積岩）、土岐花崗岩部、月吉断層部の大きく3つにグループ分けした。さらに、土岐花崗岩部を月吉断層上盤岩体（Zone 1～3）と月吉断層下盤岩体（Zone 4）の4つに分け、月吉断層部は断層中心部と周辺部の2つに分けた（月吉断層中心部はジョイント要素とした）。表－1に岩盤区分を示す。なお、深度は、MIU－1号孔の孔口部の高さを基準とした。

表－1 岩盤モデルのゾーニング

岩盤区分	岩盤性状	モデル領域
表層部	新第三紀堆積岩 (砂岩・泥岩類)	GL-90m以浅の領域
Zone1	土岐花崗岩 割れ目が多いゾーン	月吉断層上盤岩体でGL-90m～400m(厚さ310m)
Zone2	土岐花崗岩 割れ目が少ないゾーン	月吉断層上盤岩体でGL-400m～700m(厚さ300m)
Zone3	土岐花崗岩 割れ目が多いゾーン	月吉断層上盤岩体でGL-700m以深の領域
月吉断層 破砕帯	月吉断層および 周縁割れ目帯 (N80E/63S)	＜月吉断層中心部＞ 月吉断層中心部の幅は、鉛直方向に幅30mをもつ領域 ＜月吉断層周辺部＞ 月吉断層中心部の上下にそれぞれ鉛直方向で85m幅をもつ領域
Zone4	土岐花崗岩 月吉断層の下盤側	月吉断層下盤岩体の領域



図－1 解析領域（平面図）



図－2 3次元解析領域

3.2 入力物性値ならびに解析ケース

(1) 入力物性値

表－2に岩盤および断層の物性値を示す。これらは、各試錐孔（AN－1号孔、MIU－1～3号孔）の岩石物理試験・力学試験をもとに各ゾーンごとに決定した。また、月吉断層中心部はジョイント要素としたため、せん断剛性および鉛直剛性を既往研究のジョイントせん断試験結果²⁾から求めた。

(2) 解析ケース

応力場の設定のための3次元 FEM 解析におけるケースを表－3に示す。Case 1以外は、各試錐孔の水圧破碎試験データをもとに側方から、面直およびせん断荷重を付加しており、さらに Case 3と4では、Zone 1～3の間に薄層（弱層）を挿入している。

表－2 岩盤・断層の物性値

項目	第三紀層	土岐花崗岩				月吉断層部		
	表層部	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	断層上盤	断層中心	断層下盤
弾性係数E (GPa)	2.1	49.9	49.4	47.4	48.7	3.5	1.5	3.5
ポアソン比 ν	0.31	0.36	0.34	0.34	0.39	0.36	0.36	0.36
単位体積重量 γ (kN/m ³)	19.1	26.0	26.3	26.6	26.2	27.0	27.0	27.0
ジョイント物性	せん断剛性 k_s (GPa/m)	—	—	—	—	—	0.94	—
	鉛直剛性 k_n (GPa/m)	—	—	—	—	—	264.0	—

表－3 解析ケース

Case1	自重解析
Case2	自重解析 + 側方荷重（薄層の弾性係数は岩盤相当）
Case3	自重解析 + 側方荷重（薄層の弾性係数は1/1,000）
Case4	自重解析 + 側方荷重（薄層の弾性係数は1/1,000,000）

（※側方荷重は北面・東面を固定し南面・西面より付加）

3.3 解析結果

4つの解析ケースのうち、Zone 1～3の間に薄層を設けた Case 4の解析結果として3次元応力コンターを図-3に示す。 σ_x (東西方向)、 σ_y (南北方向) および σ_z (鉛直方向) とともに、月吉断層部分でジョイント要素を挿入しているためその周辺で応力値が小さくなっている。ただし、 σ_y (南北方向) は、自重解析で生じた月吉断層のずれを、南側面より付加した面直応力の作用で相殺され、断層付近の応力値の低下がそれほど見られない。図-4に Case 4におけるMIU-2号孔に相当する位置での深度ごとの岩盤応力解析値と同試錐孔での初期地圧の実測値を示した。この結果、Case 4における解析値と実測値は良く整合していると言える。

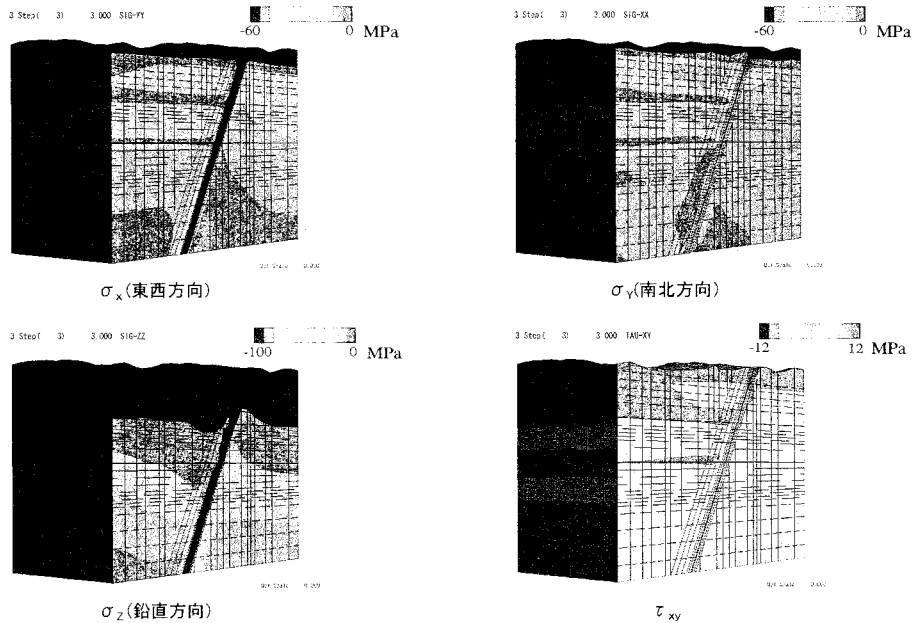


図-3 3次元応力コンター図 (Case 4 解析結果)

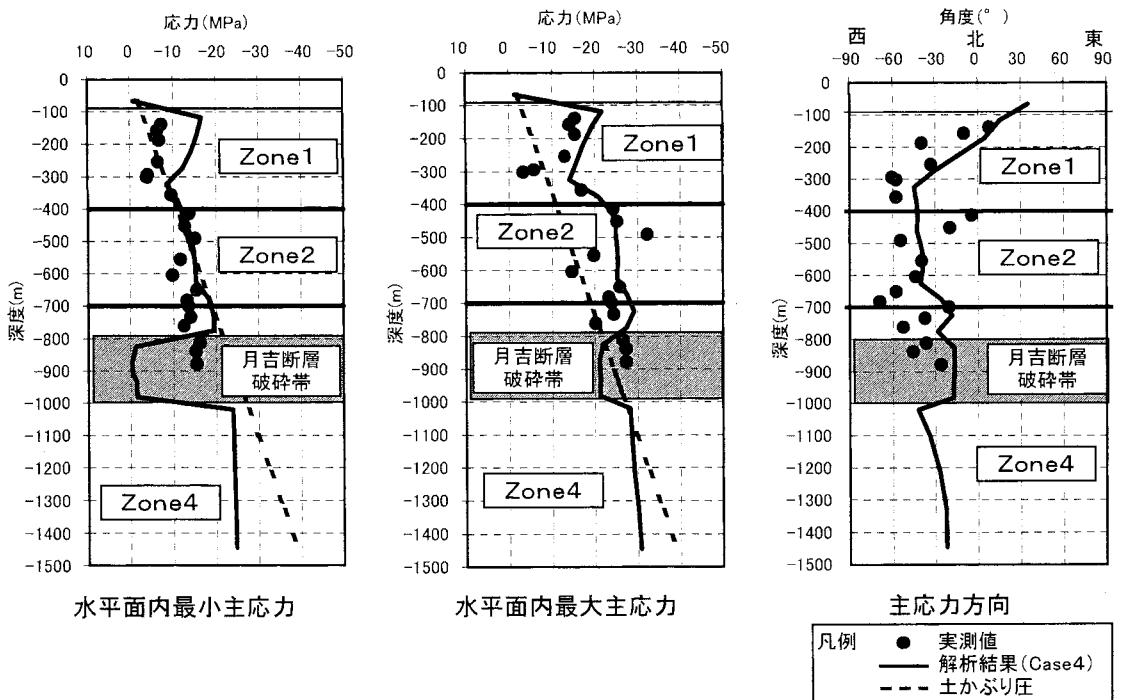


図-4 3次元応力解析結果 (Case 4 解析結果)

4. 坑道掘削解析

4.1 解析モデル

上記で実施した3次元応力分布 (Case 4) を元に、坑道掘削に伴う周辺岩盤の力学的影響について、岩盤内の不連続面の挙動を考慮可能な MBC 解析にて実施した。坑道は円形立坑 (掘削径 7.3m) およびの馬蹄形の横坑 (高さ 3 m×幅 3 m) とした。立坑は深度を GL-200m, -500m, -945m の3断面とし、横坑は-500m, -945m の2断面としており、またさらに横坑については岩盤内の不連続面との位置関係から展開方向も重要なパラメータとなりうるので、坑道軸を水平面内最大主応力方向に対し、 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ に回転したケースも解析することとした。

4.2 MBC 解析概要

MBC モデルは微視構造要素の存在あるいはその発生・成長に支配された材料に対する連続体理論であり、堀井、吉田らによって提案されているものである¹⁾。岩盤にマイクロメカニクスに基づく連続体理論を適用する場合、微視構造要素にあたるものは個々の不連続面である。不連続面を多数有する岩盤を等価な連続体に置き換える方法としては、まず、図-5に示すような不連続面を多数有する岩盤の任意の点に着目し、その点を含む部分領域である代表要素 (R.V.E: Representative Volume Element) を考える。代表要素とは、微視構造要素に比べて十分大きく、かつ物体の代表寸法に比べて十分小さい領域である。構成式の定式化にあたっては、個々の微視構造要素をモデル化し、その挙動に基づき、代表要素内において平均化操作を行うことにより、等価な連続体としての挙動、つまり巨視的な構成式を求め、この構成式が等価な連続体の1点における材料の挙動を与えるものとして連続体の解析を行う。以下に平均応力増分-平均ひずみ増分の構成式を示す。

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

ここで、 D_{ijkl}^R は、基質岩盤のコンプライアンステンソル、 Ω^m は、代表要素内 V 内の m 番目の不連続面、 $n_i^{(m)}$ はその不連続面での単位法線ベクトル、 $[u_i^{(m)}]$ はその不連続面での相対変位量である。つまり右辺の第1項は基質岩盤のひずみであり、第2項は不連続面のすべり・開口によるひずみである。

代表要素における平均応力と平均ひずみの関係は、内在する不連続面の寸法、平均間隔、走向分布に依存し、材料は異方的な挙動を呈することになる。不連続面を多数含む岩盤における掘削解析の場合、地山応力の解放により生じる不連続面の開口・せん断すべりが岩盤挙動の支配的メカニズムである。坑道掘削時の坑道周辺応力場は、応力解放されるものの依然として圧縮場にあるが、その中で不連続面が開口変形を生じるメカニズムとしては図-5に示すような起伏を有する不連続面のモデル化を考える。不連続面上でクーロンの摩擦条件が満足された時、その面でせん断すべりが始まり不連続面法線方向に開口を生じる。こうしたモデル化を行うことにより不連続面の挙動が定式化され、さらに不連続面を含む岩盤の構成式を導くことが出来る。こうして導かれた岩盤の構成式を有限要素法コードなどに組み込むことにより、任意の岩盤構造物・荷重条件における岩盤挙動の解析が可能となる。

4.3 不連続面の物性値

MBC 解析では、不連続面の幾何学的・力学的物性に関する情報が必要となる。MBC モデルによる不連続面パラメータは、「走向・傾斜」、不連続面の「平均間隔」、「平均有効長」、不連続面の「摩擦角」および「起伏角」である。これらの不連続面パラメータについて3次元岩盤力学モデルの岩盤ゾーン毎に設定する必要がある。MBC 解析では、複雑に分布する不連続面の影響を幾つかの同じ幾何学的特性を有する不連続面群の重ね合わせとして表現す

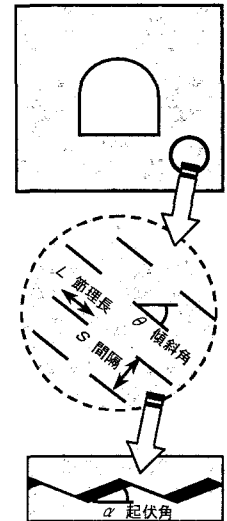


図-5 代表要素の概念と不連続面の起伏モデル

る。不連続面に関するパラメータのうち、走向・傾斜や不連続面の平均間隔については、試錐孔のボアホール観察結果より岩盤ゾーンごとに求めることとした。土岐花崗岩体の Zone 1～4 について亀裂の走向傾斜データを抽出したステレオネットを図-6に示す。岩盤ゾーンごとに走向・傾斜の卓越傾向が明らかに異なっている。ここでは、不連続面の卓越成分①～③を抽出し、解析に用いる不連続面とした。

摩擦角については既往のティルト試験の結果²⁾を反映した。なお、不連続面の平均有効長および起伏角については通常、試錐調査では把握することが困難である。本解析では、平均有効長に関しては、既往の割れ目頻度とトレース長の関係³⁾から、起伏角については、これまでのMBC解析に関する既往文献¹⁾に従ってそれぞれ決定した。表-4に不連続面に関する物性値を示す。各立坑・横坑解析では、解析断面と不連続面の3次元的位置関係を考慮し、走向・傾斜や間隔は、2次元解析断面内へ投影した見掛けの値として物性値の補正を行っている。

4.4 解析結果（横坑のケース）

実施した2次元MBC解析のうち、横坑の解析結果を示す。横坑の解析では図-7で示すように展開方向を4方向に変えて解析しており、初期応力状態および不連続面の物性を解析断面ごとに算定している。図-8にGL-945mにおいて算定した初期応力を示す。図-9に横坑周辺の不連続面の開口量分布を示す。この結果から展開方向によって、不連続面の開口する領域が異なる分布となっていることが分かる。例えば、展開方向0°、45°のケースに比べ、90°、135°のケースは坑道の全周にわたって不連続面が開口しており、これは初期応力の偏圧が一因になっているものと思われる。従って、開口分布は、掘削断面に対して不連続面の傾斜(θ)をはじめとした幾何学的な物性値と初期応力状態の組み合わせで決まると考えられる。

また、掘削による坑道周辺の不連続面の開口から、岩盤内の透水性変化を評価するため、岩盤透水係数の算出を行った。方法としては、原位置透水試験結果より岩盤ゾーンごとの岩盤基質部の透水係数 K_{matrix} を決定し、不連続面の開口による透水係数の変化は Elsworth & Mase による容積透水係数の算出方法⁴⁾を採用した。

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{1}{12} \sum_{k=1}^n \frac{b_k^3}{S_k} + K_{matrix} \quad (2)$$

ここで K は岩盤の透水係数、 γ は流体の単位体積重量、 μ は流体の粘性係数、 S_k は間隔、 b_k は開口幅である。図-10に横坑の透水係数算定結果の一例を示す。特に不連続面の開口する範囲が広い展開方向135°のケースは、坑道周辺岩盤の透水係数が岩盤基質部に比して、2オーダー以上変化するものと予測された。

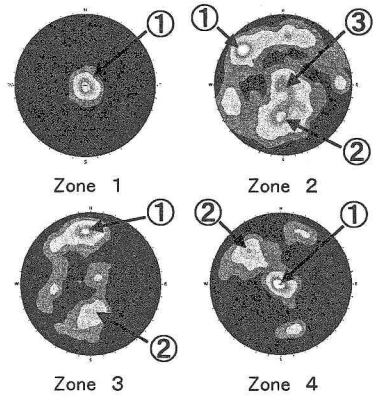


図-6 土岐花崗岩体の不連続面走向・傾斜

表-4 不連続面に関する物性値

項目	土岐花崗岩				月形断層	
	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	断層上盤	断層下盤
走向・傾斜 θ	N89E / 44NW	N41E / 75SE	N84E / 82SE	NS / 4E	N88W / 84SW	N10E / 19SE
間隔(m) S	0.10	0.20	0.23	0.98	0.08	0.61
有効長(m) L	0.24	0.35	0.38	0.85	0.21	0.65
起伏角(°) α	10°	10°	10°	10°	10°	10°
摩擦角(°) φ	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°
走向・傾斜 θ		N87W / 51NE	N85E / 44NW	N47E / 65SE	N59E / 70SE	N65E / 61NW
間隔(m) S		0.30	0.43	0.15	0.25	0.15
有効長(m) L		0.44	0.54	0.30	0.40	0.30
起伏角(°) α		10°	10°	10°	10°	10°
摩擦角(°) φ		25.5°	25.5°	25.5°	25.5°	25.5°
走向・傾斜 θ				NS / 4E		N88W / 84SW
間隔(m) S				3.45		0.10
有効長(m) L				1.71		0.24
起伏角(°) α				10°		10°
摩擦角(°) φ				25.5°		25.5°

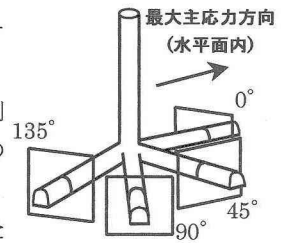


図-7 横坑の展開方向

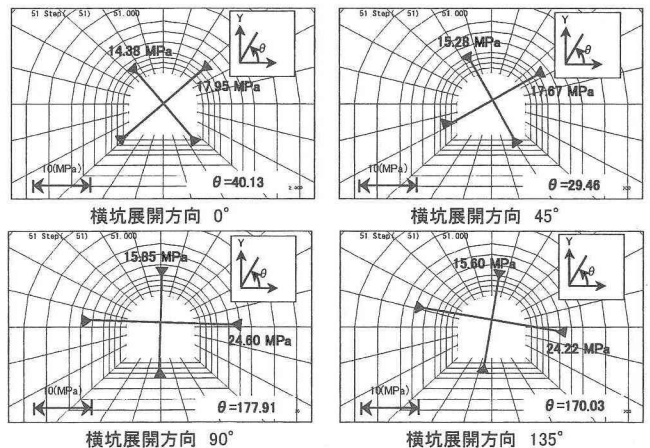
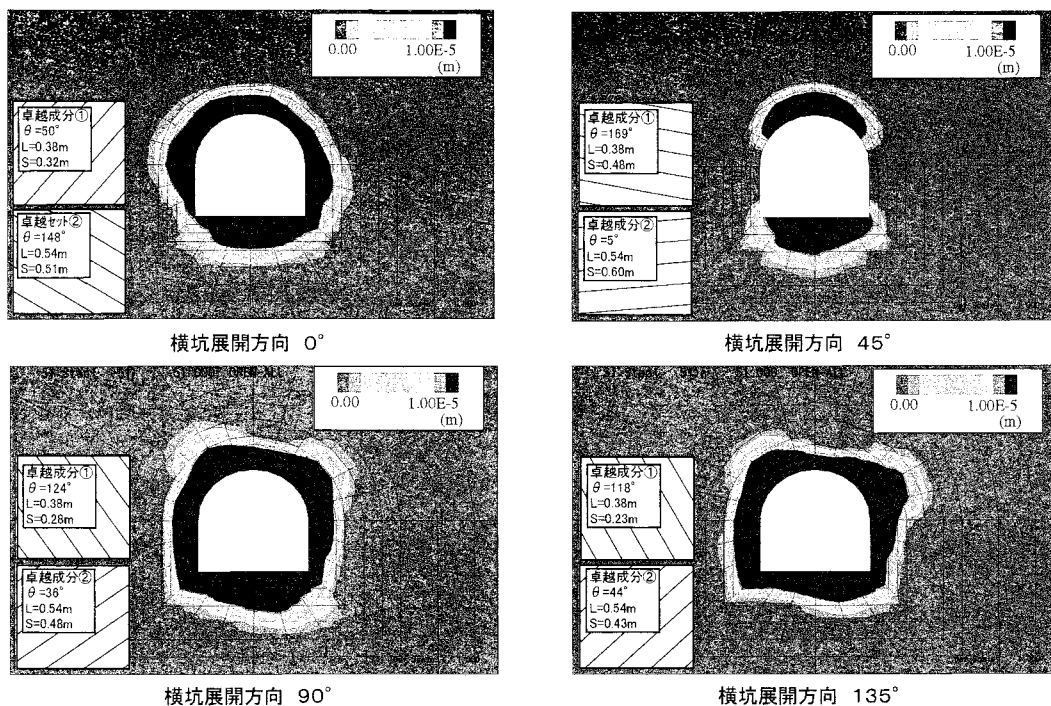


図-8 横坑の展開方向と初期応力 (GL-945m)



※各分布図内には、解析に用いた不連続面の見掛けの傾斜および、有効長、間隔を示す。

図-9 横坑周辺の不連続面開口量分布

5. まとめ

試錐調査データに基づき、3次元 FEM 解析および MBC モデルによる坑道掘削時の掘削影響予測解析を実施し、以下のような成果を得た。

- ① 試錐調査データをもとに岩盤力学モデルを構築し、3次元 FEM 解析を行った結果、実測値に整合するモデル対象領域内の3次元応力分布を再現することができた。
- ② 3次元 FEM 解析により得られた応力分布をもとにして2次元 MBC 解析を立坑・横坑に対し実施した。解析モデルの物性値は試錐調査の岩石試験結果に基づいて極めて堅硬に設定したため、不連続面の開口の絶対量は小さく、施工に関して十分安全であるが、横坑では、展開方向により、複雑な開口量分布が得られた。

初期応力と不連続面の幾何学的物性に関する情報は、坑道周辺の掘削影響領域の推定および、坑道レイアウトの最適設計の一助となるものと思われる。

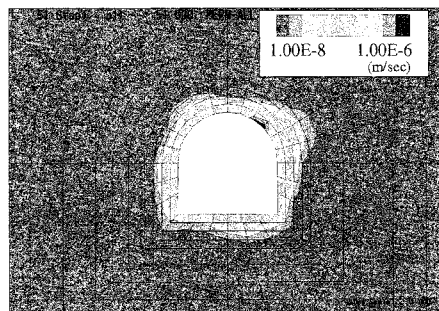


図-10 透水係数算定結果一例
(横坑展開方向 135°)

参考文献

- 1) 吉田秀典・堀井秀之：マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析，土木学会論文集 No.535/Ⅲ-34，pp.23-41，1996
- 2) 畑浩二，他：土岐花崗岩を対象としたジョイントせん断試験，JNC TJ7400 2001-005，2001
- 3) 大津宏康，他：我が国の岩盤における亀裂特性とそのモデル化に関する研究（亀裂モデルの信頼性評価手法の開発），JNC TY8400 2000-006，2000
- 4) Elsworth,D. and Mase,C.R.：Groundwater in Rock Engineering,Comprehensive Rock Engineering,Chapter8 Vol.2 pp.201-226，1992