

等価不均質連続体モデルによる釜石鉱山原位置試験場周辺の地下水解析

GROUNDWATER FLOW SIMULATION AROUND THE KAMAISHI IN-SITU TEST SITE USING AN EQUIVALENT HETEROGENEOUS CONTINUUM MODEL

下茂道人*・山本 肇*・松井裕哉**・仙波 毅**

Michito SHIMO, Hajime YAMAMOTO, Hiroya MATSUI and Takeshi SENBA

Regional simulation of groundwater flow in discontinuous rocks requires a consideration of geometry and distribution of the conductive fractures which create the dominant flow pathways. An Equivalent Heterogeneous Continuum Model (E-H-C Model), in which the discontinuous rock is represented as a continuum with distributed equivalent hydraulic conductivity tensors, has been developed and used for the forward and inverse simulation of flow in a 400m × 400m × 250m volume of rock at the Kamaishi In-situ Test Site which is operated by PNC, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation. The applicability of the E-H-C Modelling approach for discontinuous rocks is discussed by comparing the calculated and observed inflow rate and the pressure distribution.

1. はじめに

花崗岩に代表されるような不連続性岩盤内の地下水流動の評価においては、亀裂や透水性の分布を反映できるモデル化手法が必要である。近年、亀裂ネットワークモデルのように個々の亀裂の空間分布を考慮したモデル化手法が開発され、不連続性岩盤の地下水解析に用いられている。しかし、一辺が数100m以上の大きな領域を対象とした準広域～広域地下水解析に対しては、個々の亀裂をモデル化する方法では、未知数の数が膨大となるため、その適用が困難である。そこで、著者らは、不連続性岩盤を、それと等価な透水性分布を有する連続体に置き換えた等価不均質連続体モデルによる浸透解析手法を開発し¹⁾、岩手県の釜石鉱山550mレベルにある動力炉・核燃料開発事業団原位置試験場周辺の400m×400m×250mの領域を対象として、同モデル化手法の適用を試みた。具体的には、同試験場で得られた亀裂データや水理試験データをもとに等価不均質連続体モデルを構築し、3次元有限要素法による浸透解析を実施するとともに、坑道流量や水圧観測データを用いた3次元逆解析を行い、より定量的な透水性分布の同定を行った。本論文では、一連の解析結果を示し、等価不均質連続体モデルの不連続性岩盤の地下水解析への適用性について議論する。

2. 等価不均質連続体モデル¹⁾

等価不均質連続体モデルとは、与えられた亀裂分布に対する透水テンソルを、領域内部の小領域毎に算定することにより、岩盤内の不連続かつ不均質な透水性分布を表現するモデル化手法である。岩盤内の小要素(体積=ΔV)の透水テンソルを、基質部と亀裂各々の値の体積平均として次式のように定義する。

$$K_{ij} = K_{ij}^m + \frac{g}{12\nu\Delta V} \sum_k \Delta A_k^c t_k^3 (\delta_{ij} - n_i n_j) \quad (1)$$

ここに、 K_{ij} ：要素の透水係数テンソル、 K_{ij}^m ：基質部の透水テンソル、 ΔA_k^c ：ΔV中に占める亀裂kの面積、

* 大成建設(株)技術研究所

** 動力炉・核燃料開発事業団、釜石事務所

t_k : 亀裂kの水理開口幅、 δ_k : クロネッカーのデルタ関数、 n_k : 亀裂kの法線ベクトルの方向余弦である。有限要素法においては、要素毎に(1)式の透水係数テンソルを求めることにより、不連続性岩盤を不均質な透水係数分布を有する連続体としてモデル化できる。本モデル化手法では、未知数の数と亀裂の数とが無関係であるため、亀裂分布を考慮した準広域～広域地下水解析に適する。

3. 釜石鉱山原位置試験場を対象とした三次元浸透流解析
3. 1 地質概要

釜石鉱山原位置試験場は、栗橋花崗閃緑岩体中の標高約575m、地表面下約260mの位置にある。試験場では、既存坑道(NW坑道)から新規に複数の坑道(KD-88、89、90坑道等)およびボーリング孔が掘削され(図-1)、亀裂調査や湧水量測定、水圧測定等が詳細に実施されている。それらの結果によると、坑道壁面からの集中的な湧水や、ボーリング孔に沿って急激な水圧変化が見られるなど、不連続性岩盤特有の不均質な地下水流動が想定される。

3. 2 モデル化および解析の手順

解析の全体フローを図-2に示す。解析領域としては、KD-90坑道を中心とした水平400×400m、鉛直250mの領域を選定した(図-1)。領域の境界上には地表から削孔したKG-1孔があり、地下水圧の連続観測が行なわれている。水理地質構造のモデル化にあたり、地形・リニアメント、亀裂の集中部、坑道内湧水分布等を考慮して、解析領域を亀裂集中部と一般部の2つの物性の異なるゾーンに分けて取り扱うことにした(図-1)。地下水解析モデルとしては、等価不均質連続体モデルの他に、従来手法との比較のため、前述したゾーン単位に不均質性と異方性を与える連続体モデル(以下、ゾーンモデルと呼ぶ)の2種類のモデルを作成した。図-3に解析メッシュ(21157要素、22315節点)を示す。

3. 3 ゾーンモデルの作成

ゾーンモデルでは、各ゾーン内で実施された透水試験結果をボーリングの方向毎(水平2方向および鉛直方向)に整理し、3方向の透水係数を表-1および後出の図-8aに示すようにゾーン毎に与えた。

3. 4 等価不均質連続体モデルの作成

図-4にモデルの作成フローを示す。まずBTV調査結果から、開口亀裂のみを抽出し、亀裂形状を円形と仮定して亀裂の統計分布(亀裂密度、方向、幾何学的開口幅等)を求め、透水試験結果との比較により、水理開口幅を決定した。得られた統計分布を用いて、領域内部で確率論的に亀裂を発生した後、ボーリング孔および坑道と交差する亀裂については、原位置で

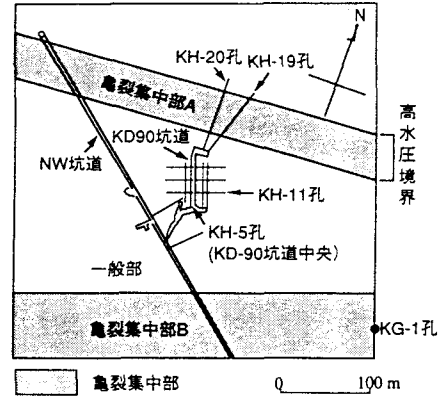


図-1 解析領域(550mレベル)

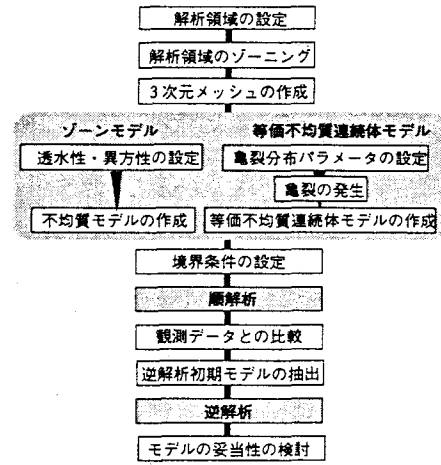


図-2 解析のフロー

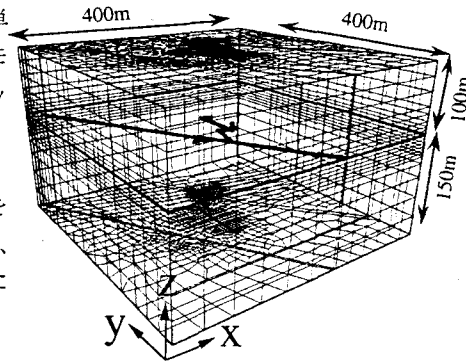


図-3 解析メッシュ(鳥瞰図)

表-1 ゾーンモデルに用いた透水係数

	亀裂集中部	一般部
最大主軸方向(x,z方向)	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-7}
最小主軸方向(y方向)	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}

単位: cm/sec

得られた亀裂の位置・方向・開口幅を決定論的に与えた（コンディショニング）。このようにして発生させた亀裂分布を用いて、要素毎の透水テンソルを求め、等価不均質連続体モデルを作成した。

亀裂の方向分布の決定では、ボーリング孔の方向によるサンプリングの偏りを野口らの方法²⁾により補正した後、自動クラスタリング手法（重心法）により3セットに分類し（図-5）、各々をFisher分布に当てはめた。亀裂の直径 r の確率分布関数としては、負の指数分布を用いた。野口ら²⁾は、NW坑道壁面のトレース長データより、平均直径 $\langle r \rangle$ を5mと推定している。しかし、これは開口亀裂だけを考慮したものではないため、今回は $\langle r \rangle$ を平均開口幅 $\langle t \rangle$ の3000倍と仮定した。開口幅 t の分布関数にも負の指数分布を仮定し、全亀裂数を制限するための下限開口幅 $\hat{t}$ を設定した。下限開口幅 $\hat{t}$ 以上の亀裂の三次元密度 $\rho_v(\hat{t})$ は次式で与えられる。

$$\rho_v(\hat{t}) = \frac{4}{\pi \langle r^2 \rangle} \rho_l \exp \left[-\frac{\hat{t}}{\langle t \rangle} \right] \quad (1/m^3) \quad (2)$$

ここに、 ρ_l ：一次元亀裂密度（1/m）、 $\langle r^2 \rangle$ ：亀裂直径の2乗平均（ m^2 ）である。ボーリングデータから得た $\rho_l=0.47$ （1/m）、 $\langle t \rangle=3.1$ （mm）から、 $\langle r \rangle = \langle t \rangle \times 3000 = 9.3m$ に定めると、 $\hat{t}=3mm$ のとき、 $\rho_v(\hat{t})=1.31 \times 10^{-3}$ （1/ m^3 ）となり、解析領域全体（400m×400m×250m）の発生亀裂数は50,000個程度となる。尚、亀裂集中部（図-1）では、NW坑道に沿った亀裂観察結果から、 ρ_l と $\langle t \rangle$ を一般部の2倍として与えた。モデル化に用いた亀裂発生パラメータを表-2に示す。このパラメータを用いて確率的に発生した亀裂分布に対して、ボーリングKH-5孔・KH-20孔とNW坑道内で観察された開口幅3mm以上の亀裂をコンディショニングした（図-6）。幾何学的な開口幅（ t_g と記す、(2)式の t と同じ）と水理開口幅（ t_h と記す）の関係については、比例関係（ $t_g = \alpha \cdot t_h$ ）を仮定し、透水試験結果と表-2の亀裂パラメータを用いた透水試験のシミュレーション結果の比較から比例定数 α を求めた。図-7は、亀裂発生乱数初期値を100ケース変化させて得られた、シミュレーションによる透水係数分布を実測値（JFT、低圧ルジオン試験）と比較した結果である。この図から、 $\alpha=10^2$ と設定すると、実測の透水係数分布がほぼ再現できることが分かる。

以上のようにして作成した、等価不均質連続体モデルの各要素の平均透水係数（ $= (K_{11} + K_{22} + K_{33}) / 3$ ）の分布を図-8bに示す。

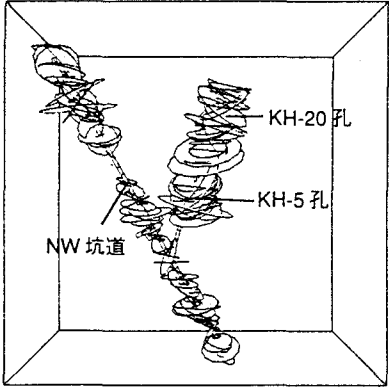


図-6 亀裂分布のコンディショニング

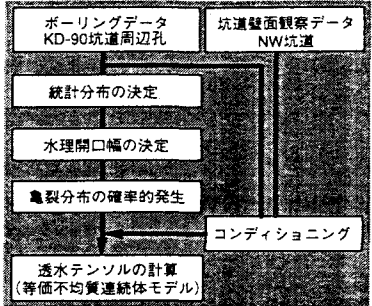
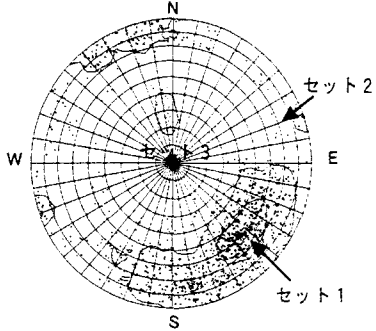


図-4 等価不均質連続体モデル作成フロー



セット	平均方位	標準偏差	比率
1	N52E66N	20.2°	86.5%
2	N38W75S	21.6°	9.5%
3	NS25E	9.6°	4.0%

図-5 亀裂方向分布（ウルフネット、下半球投影）

表-2 モデル化に用いた亀裂パラメータ

パラメータ	亀裂集中部	一般部
$\rho_v(\hat{t})$ (本/ m^3)	1.30×10^{-3}	1.38×10^{-3}
ρ_l (本/m)	0.66	0.33
$\langle r \rangle$ (m)	12.00	6.00
$\langle t \rangle$ (mm)	4.00	2.00
$\hat{t}$ (mm)	3.00	3.00

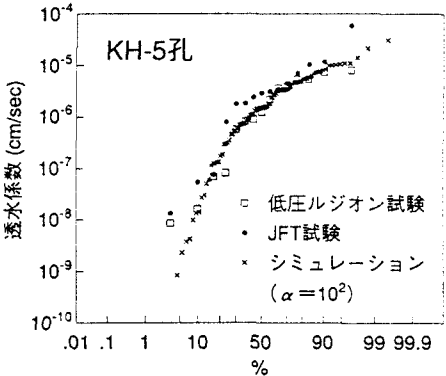


図-7 透水係数分布の比較

3. 5 境界条件

解析領域の外部境界上で水圧データが得られているのは、KG-1 孔 (図-1) のみであり、550 m レベルから100 m 上部に水面を有するほぼ静水圧的な分布を示している。一方、KD-90 坑道北側の亀裂集中部では、約 20kg/cm² の高い水圧が観測されている。そこで、境界条件としては、550 m レベルにおいて、亀裂集中部の外側境界で20kgf/cm²、その他の境界では10kgf/cm² の水圧を有する静水圧分布を与えた。また、坑道壁面は大気圧境界とした。

4. 解析結果

順解析により得られた水圧分布を図-9に示す。また、ボーリング孔内の水圧分布の例を図-10に実測値とともに示す。同図中、等価不均質連続体モデルについては、3 ケースの亀裂分布のリアライゼーションについての結果を示すが、いずれも同様の結果が得られた。

一方、図-8を初期モデルとし、KD-90 坑道周辺のボーリング孔 (全13孔) 内で観測された間隙水圧値と NW 坑道に設置された堰での区間湧水量を用いた逆解析により得られた NW 坑道への湧水量の分布を図-11に示す。逆解析は、参考文献3に示す手法によった。目的関数としては、

$$J = \frac{1}{\sigma_p^2} \sum_{i=1}^{N_p} \|\phi_i^{cal} - \phi_i^{obs}\|^2 + \frac{1}{\sigma_q^2} \sum_{j=1}^{N_q} \|q_j^{cal} - q_j^{obs}\|^2 \quad (3)$$

を用い、 J が小さくなるように、繰返し計算で透水係数分布を求めた。(3) 式の右辺は、水圧値の自乗誤差と流量の自乗誤差をそれぞれの観測値誤差の標準偏差の自乗で除したものである。なお、等価不均質連続体モデルでは、全要素の透水係数を未知数とすると観測データ数が不足するため、ゾーン毎に、各要素の平均透水係数により $10^{-3} \sim 10^{-8}$ cm/s の間の6段階 (対数) でグルーピングし、各グループの対数平均透水係数を未知数とした。

5. 考察

図-8のように、等価不均質連続体モデルでは不均質な透水係数の分布が表現されている。特に、コンディショニングにより、亀裂が集中的に存在する場所 (図中に○で表示) が、高透水領域として表現されている。このような透水係数の分布は、図-9

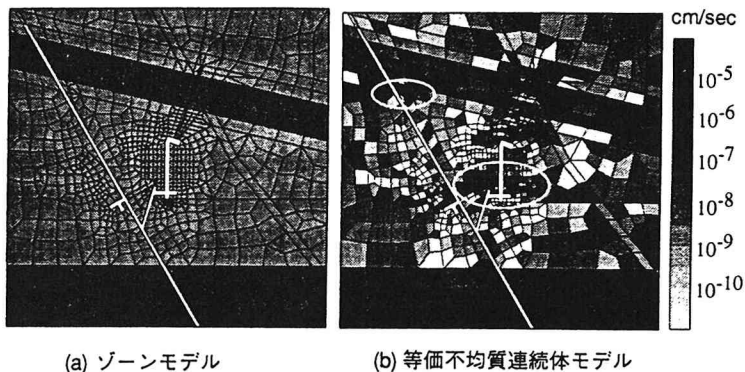


図-8 平均透水係数分布

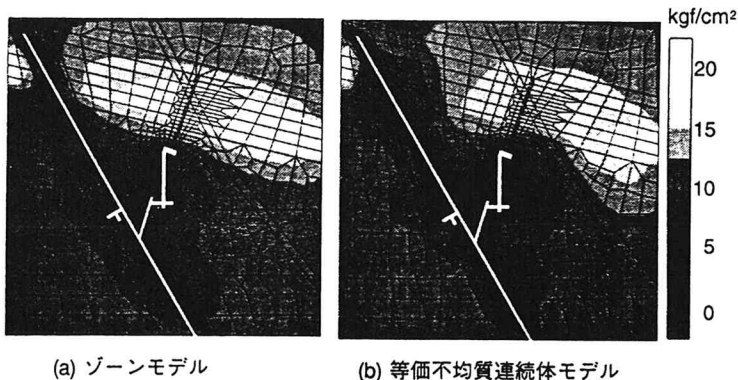
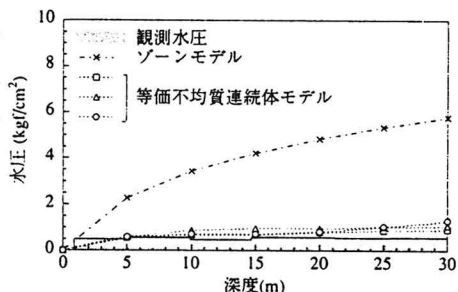
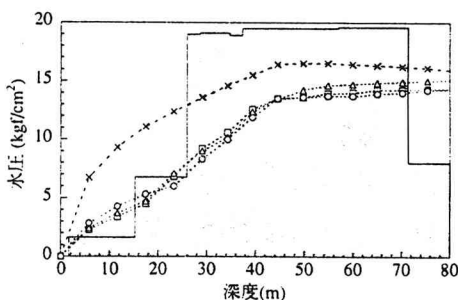


図-9 水圧分布



(a) KH-11 孔 (KD-90 坑道周辺、図-1)



(b) KH-19 孔 (高水圧帯内、図-1)

図-10 ボーリング孔内水圧分布

の水圧分布の差異として現れており、特に、等価不均質連続体モデルの結果では、局所的な透水係数の不均質性を考慮しない従来モデル（ゾーンモデル）に比べて、坑道周辺の広い範囲において水圧低下ゾーンが形成されている事が分かる。KD-90 坑道の壁面から東西方向に削孔されたボーリング孔（KH-11 孔）内の観測水圧分布と比較すると（図-10 a）、等価不均質連続体モデルで得られたような坑道周辺の水圧低下が実際に生じていることが分かる。水圧低下領域が生じる原因は、坑道に交差する開口亀裂からの排水に対して、周辺岩盤から十分な地下水の供給が行なわれないことに起因するものと考えられる。このような、亀裂からの湧水に起因する水圧場は、従来の局所的な透水性の不均一性を考慮しない連続体モデルを用いて表現することは困難である。一方、図-10 b に示したように、KD-90 坑道から北向きに削孔された高水圧帯を貫通するボーリング孔（KH-19 孔）内の水圧分布は、ゾーンモデルのほうが、高圧部の水圧を良く表現できている。図-9 a, b を比較すると、ゾーンモデルでは、亀裂集中部で均質な透水係数を与えているため、解析領域内部まで高水圧帯が広がっているのに対して、等価不均質連続体モデルでは、透水係数の不均質性により、外部境界で与えた局所的な高水圧が領域内部まで及びにくい状況が見られる。しかし、高水圧帯の境界上に水圧観測点がないため、両解析結果の妥当性の定量的な評価は困難である。

逆解析の結果について述べると、水圧値については、ゾーンモデル、等価不均質連続体モデルとも大きな改善はなかった。これは、ゾーンモデルでは、そもそも不均質な水圧場の表現が困難なこと、また、等価不均質連続体モデルにおいては、実測された坑道周辺の水圧分布が順解析の段階では再現されている反面、上述のように高水圧帯がうまく再現されていないことに起因している。一方、坑道内湧水量については、ゾーンモデル、等価不均質連続体モデルとも、逆解析による大きな改善が見られた。図-12 は、等価不均質連続体モデルの逆解析の、繰り返し計算に伴う NW 坑道内湧水量の変化を示したものであるが、4 つの湧水測定区間とも、解析値はほぼ実測湧水量と一致している（図-11 c に区間湧水量を示す）。しかし、NW 坑道沿いの節点流量分布（図-11 b）と、坑道壁面の滴水量の測定結果（図-11 a）を比較すると、等価不均質連続体モデルが実測の湧水量分布をより細かく表現できていることが分かる。

6. おわりに

釜石鉱山原位置試験場周辺の地下水解析により、等価不均質連続体モデルが、不連続性岩盤特有の不均質な水理場（透水性、水圧、流量等）を表現できる手法であることが示された。今後は、境界条件の再吟味や個々の亀裂パラメータの影響について検討を行ない、同モデルによる不連続性岩盤内の地下水解析手法を確立したい。

7. 参考文献

1. 下茂、飯星：不均質等価連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法、第 21 回土木学会年次講演会、1996
2. 野口他：岩盤亀裂群の計測とモデリング、資源素材学会誌、Vol. 107, No. 7, pp. 428-433, 1991
3. 下茂、飯星：三次元逆解析による不連続性岩盤の透水性分布の評価、第 9 回岩の力学国内シンポジウム、pp. 151-156, 1994

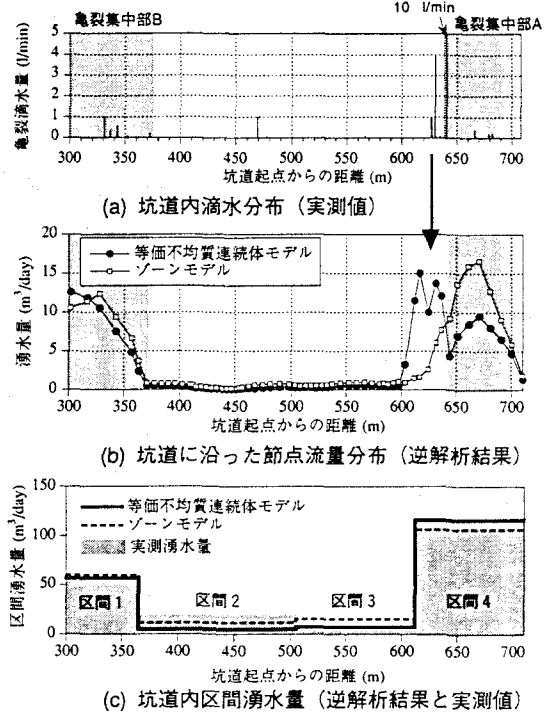


図-11 NW 坑道への湧水量分布

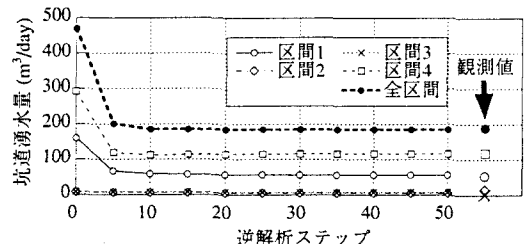


図-12 逆解析ステップと坑道区間湧水量変化