

釜石鉾山における岩盤浸透流解析

(平成9年度)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1998年3月

大成建設株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

環境技術開発推進本部

地層科学研究グループ

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Geoscience
Research Program, Power Reactor and Nuclear Fuel Corporation 9-13, 1-chome,
Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1998

1998年 3 月

釜石鉱山における岩盤浸透流解析

(平成9年度)

下茂道人^{*}、山本 肇^{*}

山本卓也^{**}

要 旨

釜石原位置試験第2フェーズでは、550mレベル坑道周辺の水理地質学な場の理解と既存の解析手法の適用性の検討を目的として、岩盤浸透流解析に関する研究を実施している。

平成6年度は、不連続性岩盤に対する連続体モデル化手法の適用性の検討及び問題点の抽出と、原位置試験場周辺の水理地質構造の理解を深める目的で、第1フェーズで把握されていなかった水理境界の存在を考慮した3次元浸透流解析を実施した。その結果、不連続性岩盤に対する連続体モデルの適用上の問題点として、①岩盤中の透水性割れ目分布の不均質性の考慮、②水理境界のモデルの構築、が抽出された。

そこで、平成7年度においては①解析領域を割れ目ゾーンとその他の領域に分割し、マクロな透水係数の不均一性を考慮したモデル（割れ目ゾーンモデル）と、②亀裂分布の不均質性を考慮したモデル（等価不均質連続体モデル）による3次元浸透流解析を行い、逆解析による透水係数の同定を行った。新しく導入した等価不均質連続体モデルでは、平均的な透水係数・異方性の情報だけでなく、原位置の透水性亀裂や透水係数の分布情報を反映することができ、平成6年度の均質モデルで表現されなかった不均質な水理場をうまく説明し得ることが示された。さらに、逆解析によるモデルの改良を行うことにより、水圧・流量における計算値と観測値が定量的に良く一致した結果が得られた。

本年度は、平成7年度以降に得られた亀裂・透水試験データを追加し、モデルのさらなる改良を行うとともに、不連続体モデルと等価連続体モデルの比較や亀裂分布パラメータの差異が解析結果に与える影響など、等価不均質連続体モデルの適用性に関わる詳細な検討を行った。

本報告書は、大成建設（株）が、動力炉・核燃料事業団の依頼により実施した研究の成果である。

契約番号：090D0223

事業団担当部課室および担当者：環境技術開発推進本部、地層科学研究グループ、山崎真一

*：大成建設（株）技術研究所、**：大成建設（株）エネルギー部

March 1998

Groundwater Flow Analysis at Kamaishi Underground Test Site (H9)

Michito Shimo*, Hajime Yamamoto*

Takuya Yamamoto**

Abstract

This research aims (1) to study the applicability of the existing modelling approach and the numerical method for the prediction of the groundwater flow in fractured rocks and (2) to grasp the geohydrological environment around the Kamaishi in-situ test area. To meet these goals, a series of seepage flow analysis are planned to be conducted using different models such as a continuum model and a discontinuum model.

In H6, as a first step of the study, a seepage flow analysis was conducted using continuum models of homogeneous conductivity. In H7, the Equivalent Heterogeneous Continuum (E.H.C.) model was newly introduced, and the numerical inversion method was also used to improve the model. In the E.H.C. model, the discrete fracture network is constructed by using statistical and/or deterministic method. The hydraulic conductivities of F.E.M. elements are determined by calculating the permeability tensor of a fracture network contained in each element. The hydraulic aperture of fracture is determined by matching the simulated hydraulic conductivity distribution to the in-situ data. The numerical results are well corresponding to the observed data, and that E.H.C. model is useful to express the heterogeneous hydraulic characteristics such as non-uniform flow/pressure profile.

In this year, H9, the previous model was further improved by incorporating the additional in-situ data obtained after the H7 simulation. Moreover, the characteristics of the E.H.C. model was examined concerning with the scale effects of the hydraulic conductivity and the sensitivity of the fracture parameters (such as hydraulic aperture, fracture radius, fracture density) to the hydraulic conductivity.

Work performed by Taisei Corporation under contract with power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : Shinichi Yamazaki, Geoscience Research Program, Power Reactor and Nuclear Fuel Corporation

* : Technology Research Center, Taisei Corporation ** : Engineering Department, Taisei Corporation

目 次

1 はじめに	1
2 研究概要	3
2.1 研究内容	3
2.2 地形・地質概況	6
3 等価不均質連続体モデル化手法	10
3.1 概要	10
3.2 岩盤浸透流解析モデルの分類	12
3.3 モデル化手法	15
3.4 モデル作成のフロー	17
4 亀裂分布の統計量決定	18
4.1 統計量の決定手順	18
4.2 亀裂統計量の決定	19
4.2.1 ボアホールTVデータによる決定	19
(1) 方位分布	19
(2) 開口幅分布と一次元密度	22
4.2.2 透水試験のシミュレーションによる推定	24
(1) シミュレーションの方法	24
(2) 直径分布	26
(3) 水理学的開口幅	29
5 等価不均質連続体モデルの特性に関する検討	
5.1 スケール効果の検討	30
5.2 割れ目パラメータの感度解析	34
6 等価不均質連続体モデルによる岩盤浸透流解析	
6.1 解析手順	36
6.2 解析領域および境界条件の設定	37
6.2.1 解析領域の設定	37
6.2.2 解析領域のゾーニング	40
6.2.3 境界条件の設定	43

6.3 等価不均質連続体モデルの作成	44
6.3.1 モデル作成手順	44
6.3.2 亀裂分布の発生	44
6.3.3 コンディショニング	46
6.3.4 モデル作成結果	48
6.4 定常3次元浸透流解析	49
6.4.1 解析手法	49
6.4.2 解析メッシュ	49
6.4.3 解析条件	49
6.4.4 解析結果	52
6.5 逆解析による3次元透水係数分布の推定	55
6.5.1 逆解析手法	55
6.5.2 逆解析の初期モデル	56
6.5.3 逆解析に用いた観測データ	57
6.5.4 逆解析結果	59
7 まとめと考察	63
8 おわりに	66
参考文献	67

1 はじめに

本研究は、釜石原位置試験場周辺において連続体モデル（均質多孔質媒体モデル、等価不均質連続体モデル）による浸透流解析を実施し、不連続性岩盤を対象とした場合の連続体解析手法の適用性の検討、モデル化手法（調査～解析までの流れ）の確立、及び原位置試験場周辺の水理地質学的環境の理解を目標としている。

平成6年度、7年度の研究においては、釜石鉱山550mレベル坑道内で得られた各種水理・地質データを整理し、3種類の通常の連続体モデル（均質等方性モデル、均質異方性モデル、水理地質的構造をゾーニングした均質異方性モデル）による解析を行うとともに、亀裂分布に起因する不均質性を加味した等価不均質連続体モデルによる順解析及び逆解析を実施した（図-1.1.1）。その結果、等価不均質連続体モデルと逆解析を併用することにより、不連続性岩盤特有の不均質な水理場（透水性、坑道湧水量、試錐孔内水圧など）を定量的なレベルで表現できることが示された。

本年度は、平成6、7年度の研究において得られた知見・課題並びに平成8年度以降に新たに得られた調査結果をふまえ、平成7年度の解析において使用した水理地質構造モデルの改良を行うとともに、透水性のスケール効果の検討や亀裂パラメータに対する感度解析など、不連続性岩盤に対する等価不均質連続体モデル化手法の適用性についての詳細な検討を行う。

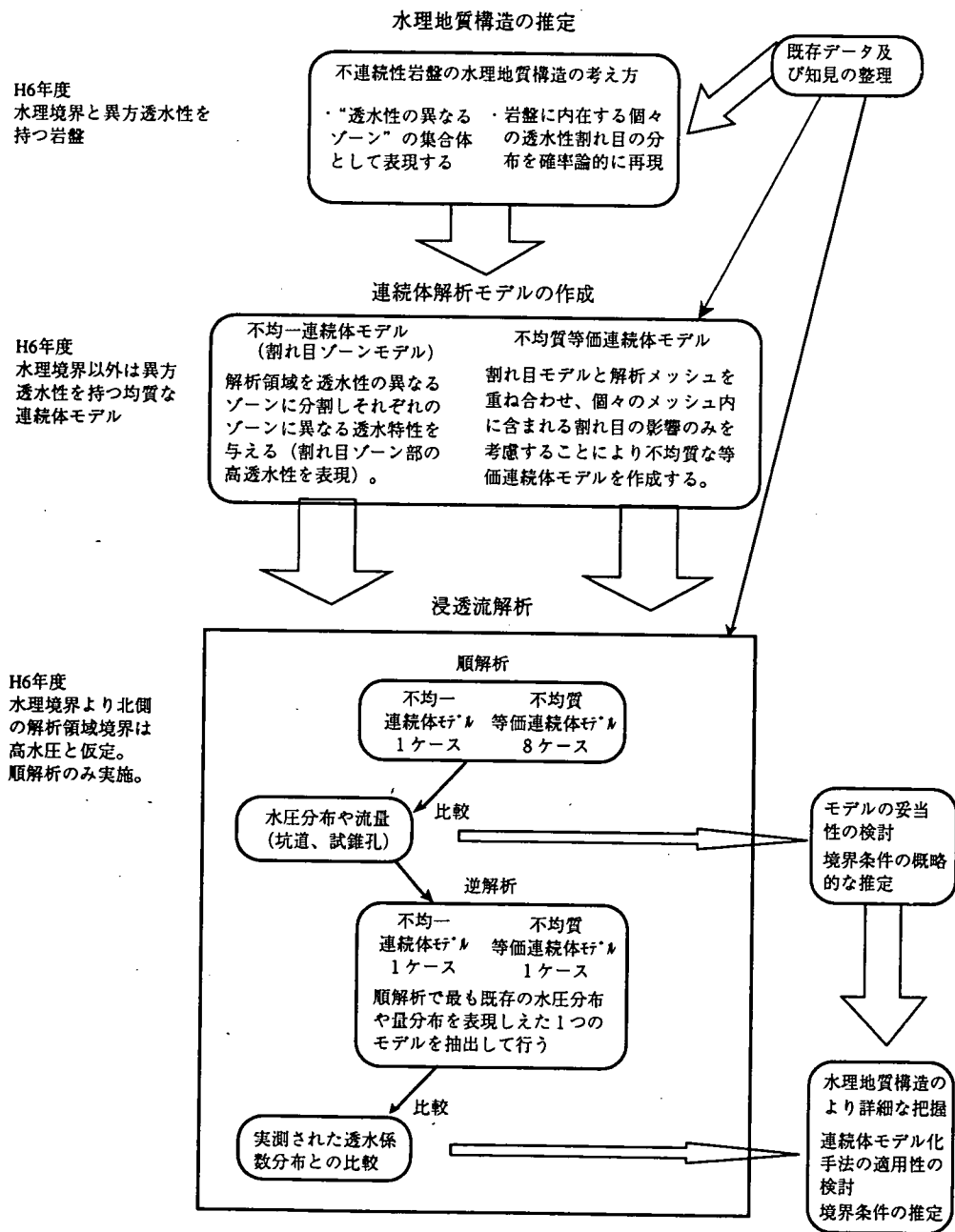


図-1.1.1 平成6年度、平成7年度の研究のフロー

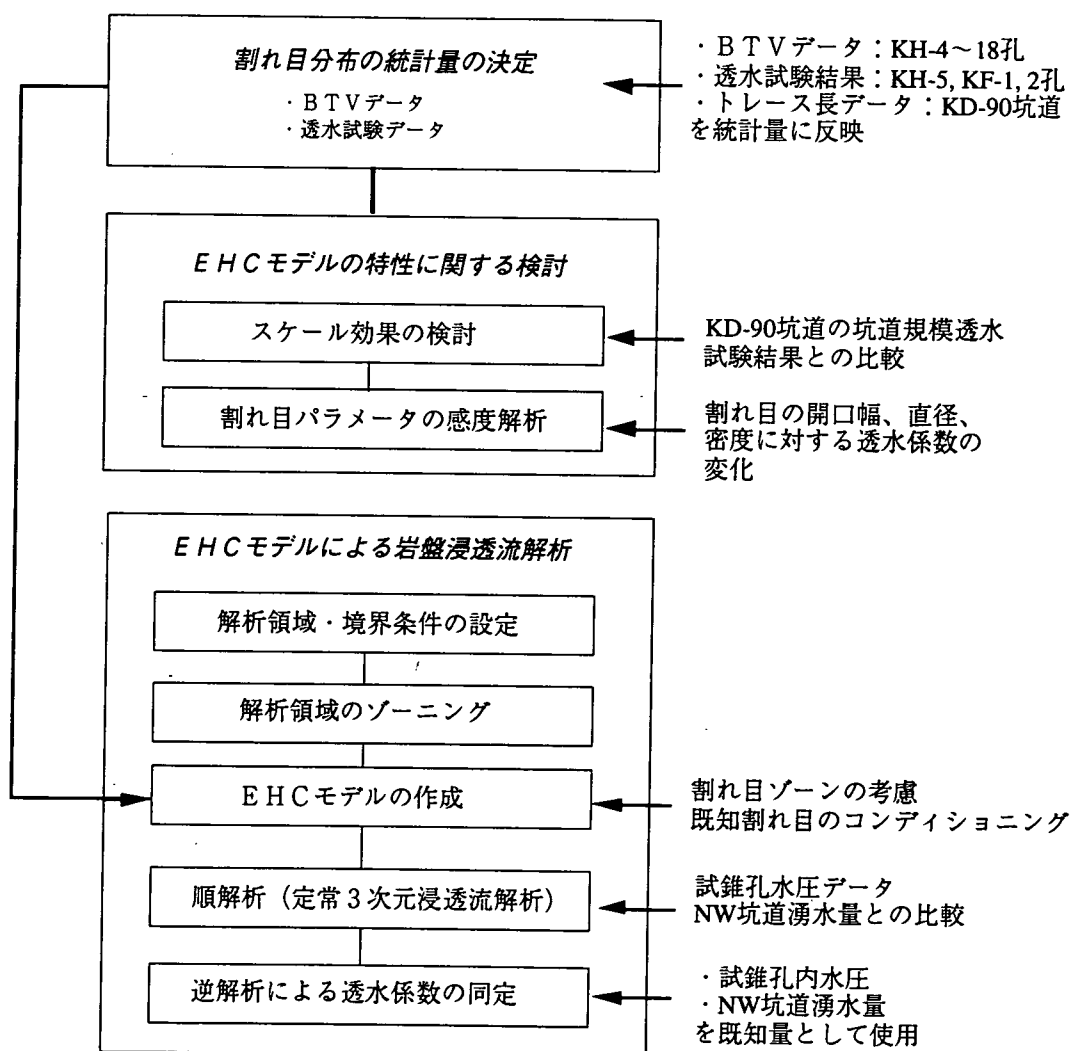
2 研究概要

2.1 研究内容

本年度実施する岩盤浸透流解析のフローを図-2.1.1に示す。今年度の実施項目は以下の通りである。

(i) 等価不均質連続体モデルの特性に関する検討

(ii) 解析モデルの改良



* EHCモデル：等価不均質連続体モデル

図-2.1.1 本年度の岩盤浸透流解析フロー

(i) 等価不均質連続体モデルの特性に関する検討

(1) スケール効果の検討

フラクチャーネットワークモデル (Discrete Fracture Network Model; DFNモデル) と等価不均質連続体モデル (Equivalent Heterogeneous Continuum Model; EHCモデル) による解析を同じ亀裂モデルで行い、解析領域の大きさを変化させることにより透水性のスケール効果を調べる。この結果に基づき、釜石原位置試験場の岩盤のスケール効果について言及する。等価不均質連続体モデルについては、同モデル固有の問題となるメッシュサイズの影響も併せて検討する。

(2) 亀裂パラメータによる感度解析

亀裂の開口幅、密度、トレース長といったパラメータの変動により解析結果に生じる幅 (上・下限値など) を解析的に検討する。パラメータの基準値については釜石鉾山で得られた値を用いる。

(ii) 解析モデルの改良

(1) 亀裂統計量の見直し

平成8年度以降に得られたKF-1, 2孔、KCH-1, 2孔の亀裂データを追加し、亀裂統計量に反映する。

(2) 透水試験のシミュレーション

平成8年度以降に得られたKF-1, 2孔の水理試験データ (流量検層データ) を用いて透水試験のシミュレーションを行う。この結果は、モデルの透水係数分布に反映される。

(3) 割れ目ゾーン部の厚さ、位置、透水性の見直し

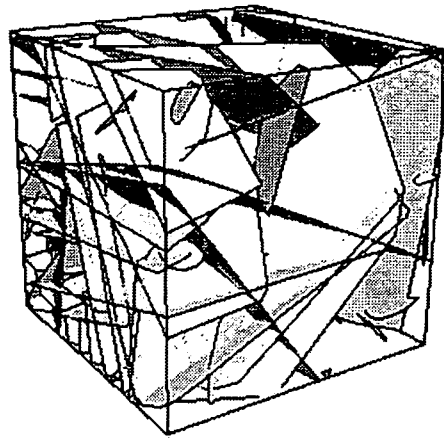
本解析において高透水性ゾーンとしてモデル化されている、解析領域の北側に存在する割れ目ゾーンの厚さ、位置、透水性を再検討する。透水性に関しては、(ii-2) のKF-1孔の結果を反映する。

(4) 境界条件の見直し

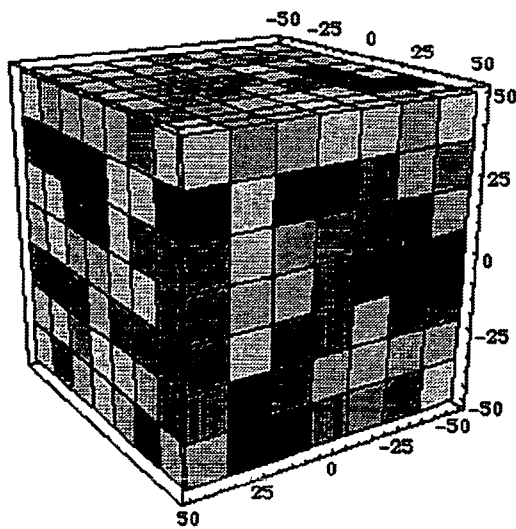
動燃殿が実施している広域地下水流動解析に基づき、境界条件の設定の妥当性のチェックを行う。

(5) 改良モデルを用いた浸透流解析および逆解析

上記の(1)～(4)で構築した連続体解析モデルを用いて、対象領域の水圧応答や湧水量分布を対象に岩盤浸透流解析を実施する。また、坑道湧水量や水圧観測データを用いた逆解析により透水係数の同定を行う。



不連続体モデル



連続体モデル
(不均一、異方性)

小 透水係数 大

図-2.1.1 等価不均質不連続体モデル

2.2 地形・地質概況

釜石鉱山原位置試験場は、栗橋花崗閃緑岩体中の標高約 5 7 5 m、地表面下約 2 6 0 m の位置にある。釜石鉱山の位置を図-2.2.1に、原位置試験場周辺の地形図を図-2.2.2に示す。また、地質平面図および断面図を図-2.2.3(a), (b)に示す。地質の詳細については参考文献を参照されたい（例えば、動燃技報、1993¹⁾）。

鉾山内には多くの探鉾坑道が掘削されているが、原位置試験場は標高550mレベルの坑道内にある（図-2.2.4）。既存の探鉾坑道（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-2.2.5）、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。

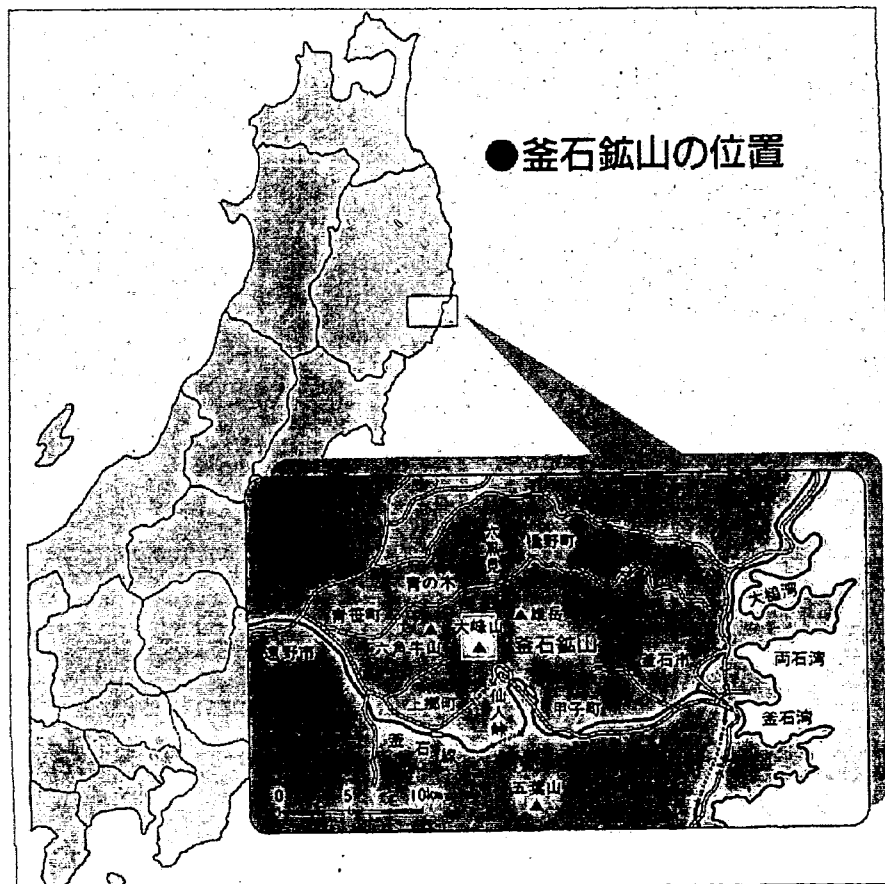


図-2.2.1 釜石鉾山の位置図

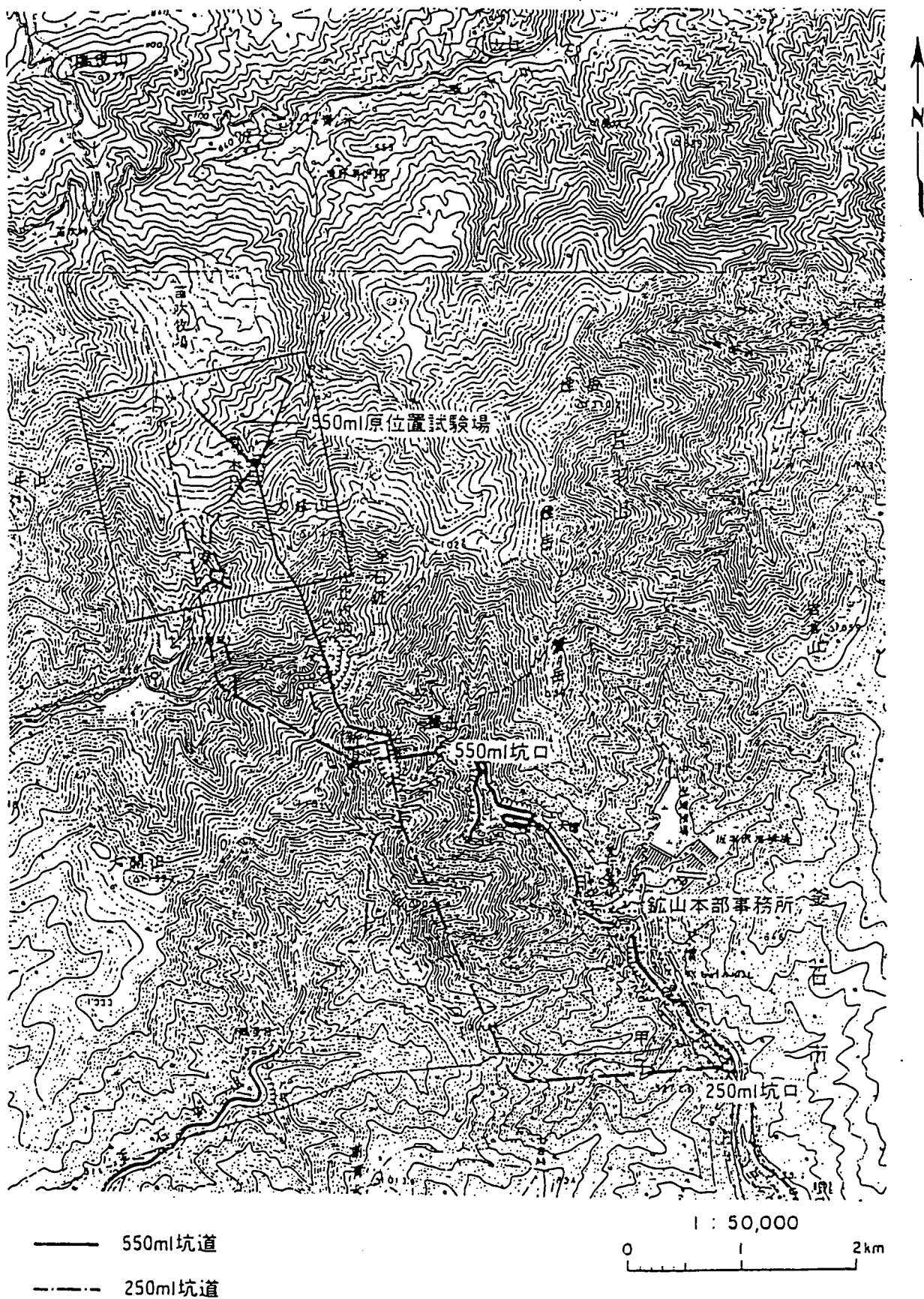
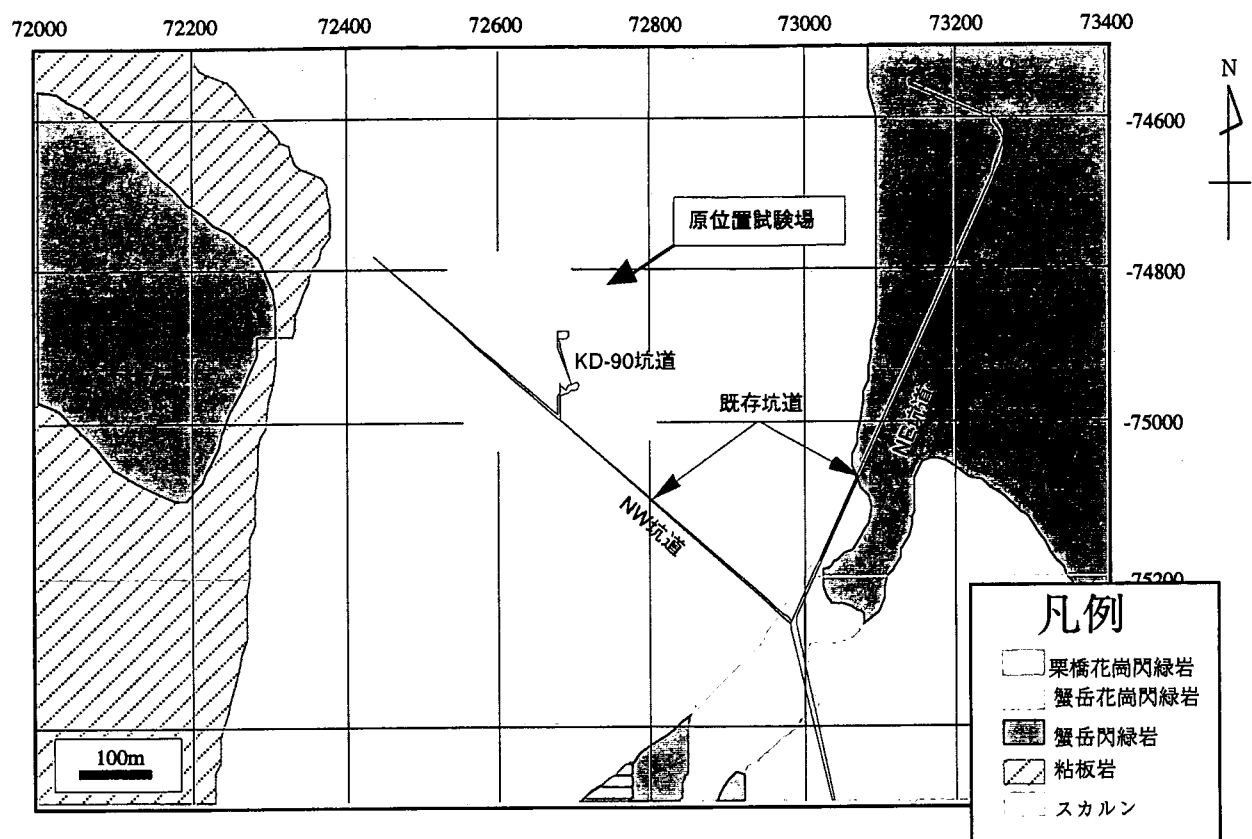
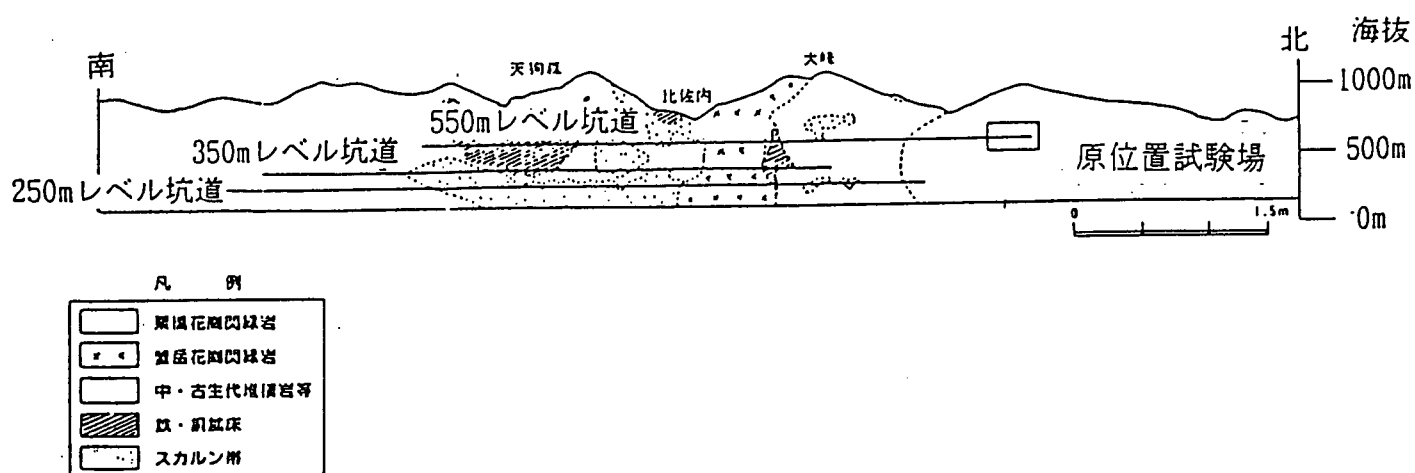


図-2.2.2 釜石鉾山地形図



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2.2.3 釜石鉱山地質図

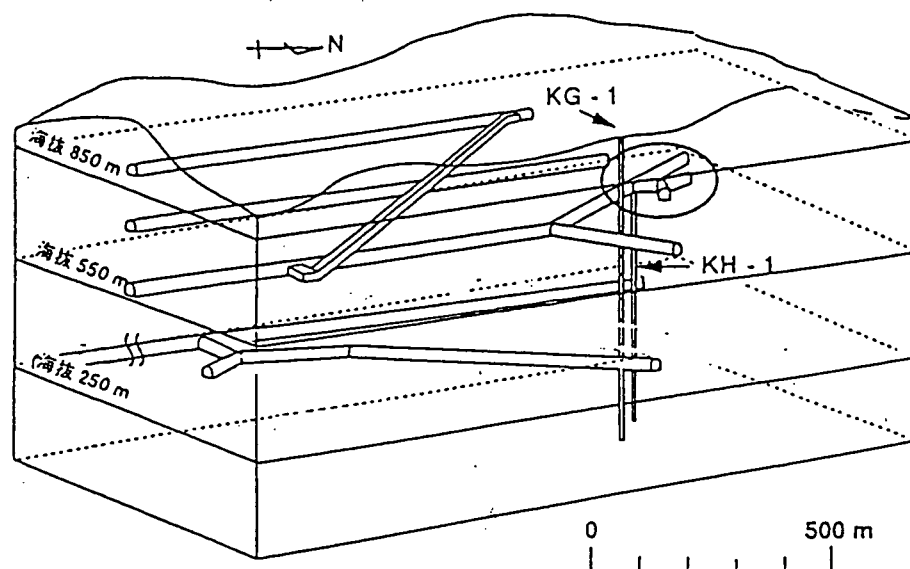


圖-2.2.4 釜石鉏山坑道鳥瞰圖

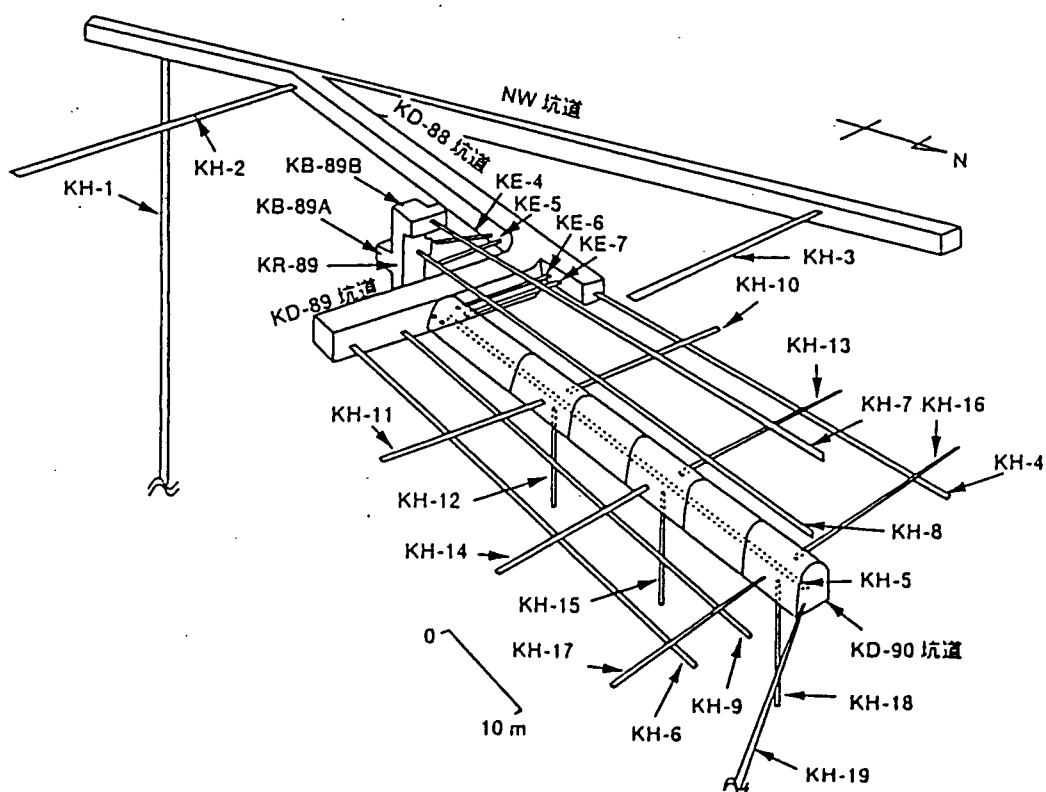


圖-2.2.5 原位置試驗場周邊詳細圖

3 等価不均質連続体モデル化手法

3.1 概要

岩盤中には、図-3.1.1に模式的に示すように、大小の不連続面（亀裂や破碎帯など）が存在している。一般に、これらの不連続面（以下、亀裂と呼ぶ）は、基質部に比べて非常に大きな透水性を有するため、岩盤内の地下水は、主として、これらの亀裂を主たる浸透経路として流動していると考えられる。また、不連続面の透水性は、その開口幅に大きく依存するため（理論的に、亀裂の透水性は、開口幅の三乗に比例する。これを、三乗則（Snow, 1965）と呼ぶ）、岩盤の透水性は場所毎に大きく異なる。すなわち、岩盤は、水理学的に見て、非常に不均質かつ不連続な材料であるといえる。このため、最近では不均質性や不連続性を考慮した岩盤のモデル化手法および浸透解析手法がいくつか提唱されている（Long他, 1982; Dershowitz他, 1989）。その代表的なものが、亀裂ネットワークモデルと呼ばれるものである。このモデルでは、図-3.2.2に示すように、岩盤内の不連続面を有限の広がりを持つ平板（円板または多角面）でモデル化し、個々の亀裂が3次元的に交差しあいながら、地下水の流動経路を形成していると考えられる。解析手法としては、一般に有限要素法を用い、個々の亀裂を平面要素として離散化する。モデルの構築に必要な亀裂の幾何学的な特性（方向、位置、長さ、開口幅）または水理特性（透水量係数、貯留係数など）は、ボーリングや露頭での観察結果およびボーリング孔を用いた透水試験などから確率論的または決定論的（あるいは、両者の組合せ）に与える。亀裂ネットワークモデルは、岩盤内の不連続かつ不均質な地下水の流れを表現できる有力な手法と考えられており、原位置試験結果の評価等への適用事例も見られる（Uchida他, 1990; 内田他, 1994）。しかし、岩盤内の亀裂を一つ一つ離散化する必要があるため、コンピュータの能力が飛躍的に発達した今日でも、実用性には問題が残されている。特に広域を対象とした浸透解析を行う場合には、考慮すべき亀裂の数が多いため、計算量が膨大となる。そこで、より現実的なモデル化手法として、等価不均質連続体モデルという新たなモデル化手法を開発した。これは、亀裂性岩盤を、空間的に不均質な透水性を有する等価連続体に置き換える手法である。

本章では、まず、岩盤浸透解析モデルの分類について述べた後、等価不均質連続体モデルの構築法について述べる。

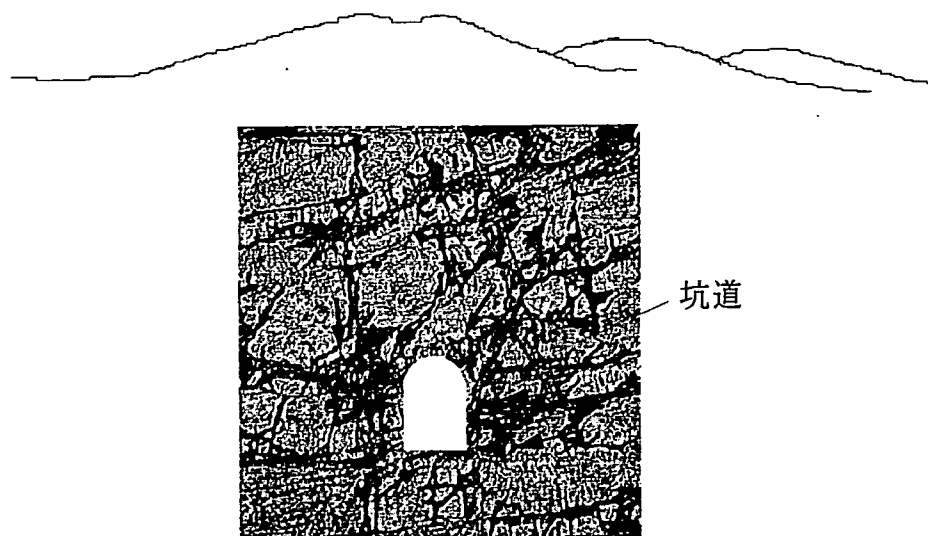


図-3.1.1 岩盤中の地下水の流れ（模式図）



図-3.1.2 亀裂ネットワークモデル

3.2 岩盤浸透解析モデルの分類

亀裂性岩盤を対象とした浸透解析のためのモデルとして、現在用いられているものは、表-3.2.1と図-3.2.1に示すように、不連続体モデルと連続体モデルに大別される。

表-3.2.1 亀裂性岩盤を対象としたモデルの分類

連続体モデル (Continuum model)	等価空隙体モデル (Equivalent porous media model) 二重空隙体モデル (Double porosity model)
不連続体モデル (Discrete model)	亀裂ネットワークモデル (Fracture network model)

等価空隙体モデルでは、亀裂性岩盤をそれと等価な水理特性（透水係数、貯留係数）を有する均質な空隙体で近似する。均質空隙体中の地下水流れの解析には、従来土中を流れる地下水の解析に用いられてきたダルシー則と質量保存の式を支配方程式とする理論(Porous medium flow theory)を適用する。Long他(1982)は、後述の亀裂ネットワークモデルを用いた数値実験により、亀裂の数が多い場合や大きな亀裂が分布する岩盤では、巨視的に見て等価な透水係数が存在する事を示した。また、Oda(1986)は、比較的亀裂密度が大きな岩盤について、亀裂分布から等価な透水係数を求める手法として、クラックテンソルを用いる手法を提唱している。

二重空隙体モデルは、岩盤の基質部と亀裂をそれぞれ空隙体で近似し、両者の流れについての運動方程式（ダルシー則）および両者間の相互作用（亀裂部と基質部の地下水の移動）に関する式をたて、これらと質量保存の式より、亀裂性岩盤内の地下水流れを解く。本モデルは、特に非定常状態にある亀裂性岩盤内の地下水挙動を解析する事を目的として考案されたモデルであり、未知数（水頭）は、基質部と亀裂部に

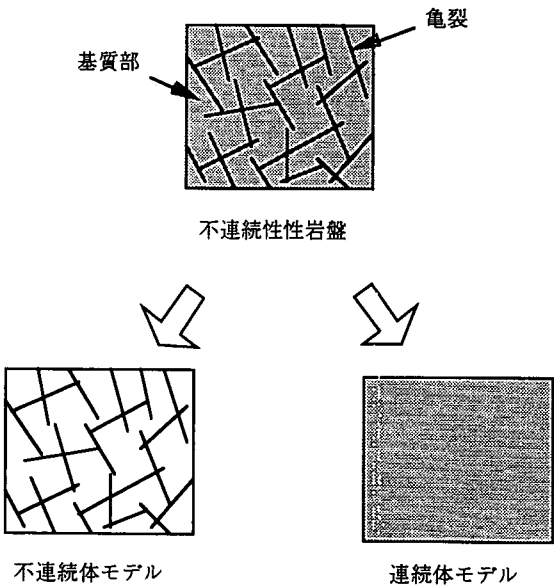


図-3.2.1 亀裂性岩盤のモデル化

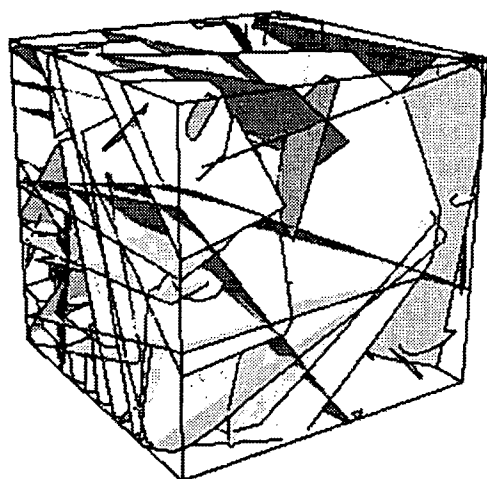
ついて別々に定義する。

以上の連続体モデルに対して、亀裂ネットワークモデルは、岩盤内に存在する連続した亀裂を流路とするネットワークを考え、この中を流れる水の流れを解析する。岩盤の基質部は、亀裂部との透水性との違いにより、通常は無視される。一般に、個々の亀裂は円形または多角形で近似し、透水性の評価には、三乗則（亀裂を2枚の平行平板でモデル化した場合に、その透水量係数は、開口幅の三乗に比例する）を適用する。

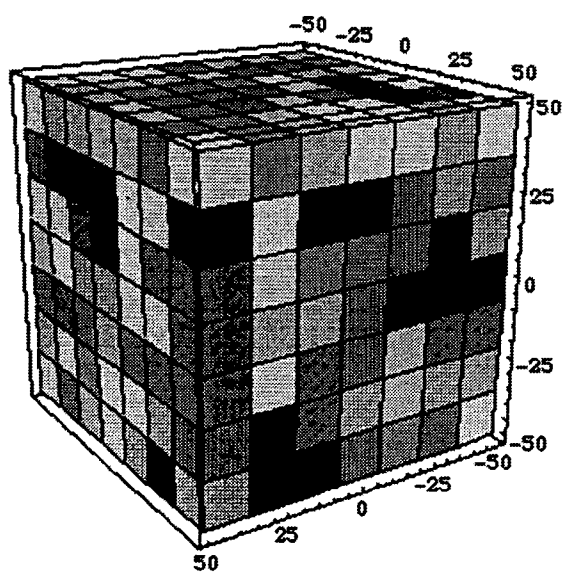
上記の各モデルのうち、不連続体モデル（亀裂ネットワークモデル）は、ボーリング調査や露頭調査から得られる亀裂分布特性に関する情報（亀裂密度、方向、長さ、開口幅等、およびこれらの空間的、統計的分布）をそのままモデルに反映できる点で、連続体モデルに比べて優れている。しかし、広域的な地下水の流れを解析する場合には、個々の亀裂をすべてモデル化するのは現実的でない。

そこで、平成7年度の解析より、連続体モデルの簡便性と不連続体モデルの柔軟性の利点を活かした新たなモデル化手法、「等価不均質連続体モデル」を採用した。本手法は、図-3.2.2に示すように、領域内を有限要素に離散化した上で、個々の要素の透水テンソルを亀裂分布パラメータから算定することにより、岩盤内の不連続かつ不均質な水理特性分布を表現するモデルである。

等価不均質連続体モデル



不連続体モデル



連続体モデル
(不均一、異方性)



図-3.2.2 等価不均質連続体モデルの概念

3.3 モデル化手法

図-3.3.1をもとに、モデル化の概念を示す。図では、簡単のために、2次元場で示すが、3次元問題についても同様である。岩盤内の小要素 ΔV の透水テンソルおよび比貯留係数を、基質部と亀裂各々の値の体積平均として定義する。

$$K_{ij} = K_{ij}^m + \frac{g}{12\nu\Delta V} \sum_k \Delta A_k^c t_k^3 (\delta_{ij} - n_i n_j) \quad (3.1)$$

$$S = \frac{1}{\Delta V} \left\{ (\Delta V - \Delta V^c) S^m + \sum_k \Delta V_k^c S_k^c \right\} \quad (3.2)$$

ここに、 K_{ij} ：要素の透水係数テンソル、 S ：要素の貯留係数、 $\Delta V^c = \sum_k \Delta V_k^c$ ： ΔV 中の亀裂の総体積、 K_{ij}^m ：基質部の透水テンソル、 K_{kij}^c ： ΔV 中の亀裂 k の透水テンソル、 S^m ：基質部の比貯留係数、 S_k^c ： ΔV 中の亀裂 k の比貯留係数、 ΔV_k^c ： ΔV 中に占める亀裂 k の体積、である。今、3次元空間に分布する個々の亀裂を開口幅 t を有する平行平板でモデル化すると、平均透水テンソルおよび平均比貯留係数は、次式のように表される。ただし、 ΔV 中の亀裂の体積が ΔV に比べて無視できる程小さい、すなわち、

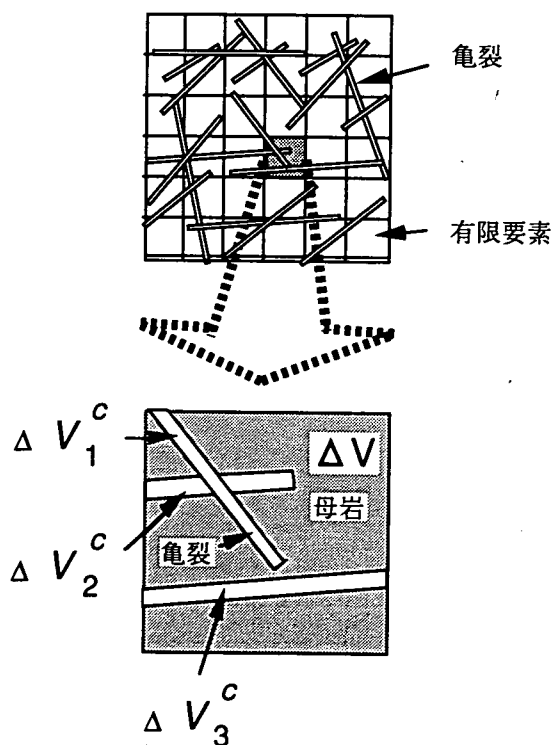


図-3.3.1 モデル化の概念

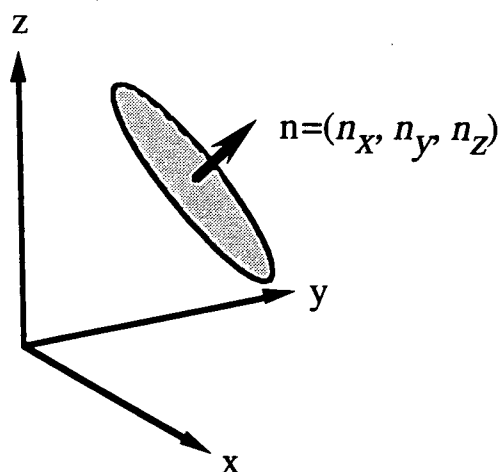


図-3.3.2 亀裂の法線ベクトル

$\Delta V^c/\Delta V \ll 1$ と仮定する.

$$K_{ij} = K_{ij}^m + \frac{g}{12\nu\Delta V} \sum_k \Delta A_k^c t_k^3 (\delta_{ij} - n_i n_j) \quad (3.3)$$

$$S = S^m + \frac{1}{\Delta V} \sum_k \Delta A_k^c t_k S_k^c \quad (3.4)$$

ここに、 ΔA_k^c ： ΔV 中に占める亀裂 k の面積、 δ_{ij} ：クロネッカーのデルタ関数、 n_i ：亀裂 k の法線ベクトルの方向余弦（図-3.3.2参照）である。

有限要素法においては、上記の ΔV を各要素の体積とみなすと、同様なアプローチにより、要素毎に異なる透水テンソルおよび比貯留係数を有する不均質な連続体として岩盤をモデルすることができる。

本モデル化手法は、下記のような利点がある。①不均質な透水性の分布や局所的な流れを表現できる。②従来の有限要素法による連続体浸透解析プログラムを用いることができる。③未知数の数（節点数）が亀裂の数と無関係であるため、広域地下水解析に適する。④基質部の透水性の分布を考慮できる。⑤要素分割が亀裂や破碎帯の位置に左右されない。また、一方で、次のような欠点もある。①要素内の亀裂が少ない場合には、要素の透水性を、2次の透水テンソルで表現するのは、厳密な意味では正しくない。②平均化の手法を用いているため、個々の亀裂の不連続性を正確に考慮することができない。

3.4 モデル作成のフロー

等価不均質連続体モデルによる、岩盤内地下水解析の流れを図-3.4.1に示す。解析の流れは、大きく亀裂分布の生成、有限要素解析のためのメッシュの作成、浸透解析の3つのステップからなる。まず、亀裂調査結果をもとに、亀裂分布を確率論的に発生させる。この場合に、破碎帯や大規模な亀裂等既知の情報が得られているものについては、決定論的に与えてもよい。亀裂の透水性（または、これから得られる水理学的な開口幅）の算定には、透水試験結果を参考にする。次に、解析領域を有限要素で離散化する。要素作成に当たっては、トンネル、地下空洞等の構造物の形状や地質境界等を考慮する。次に、3.3で述べた手法に基づき、各要素の透水テンソルを算定する。このようにして得られたモデルに、境界条件を与え、通常の連続体解析コードにより浸透解析を行なう。以上が、概略のフローである。実データを用いたモデル作成の詳細については、第6章で述べる。

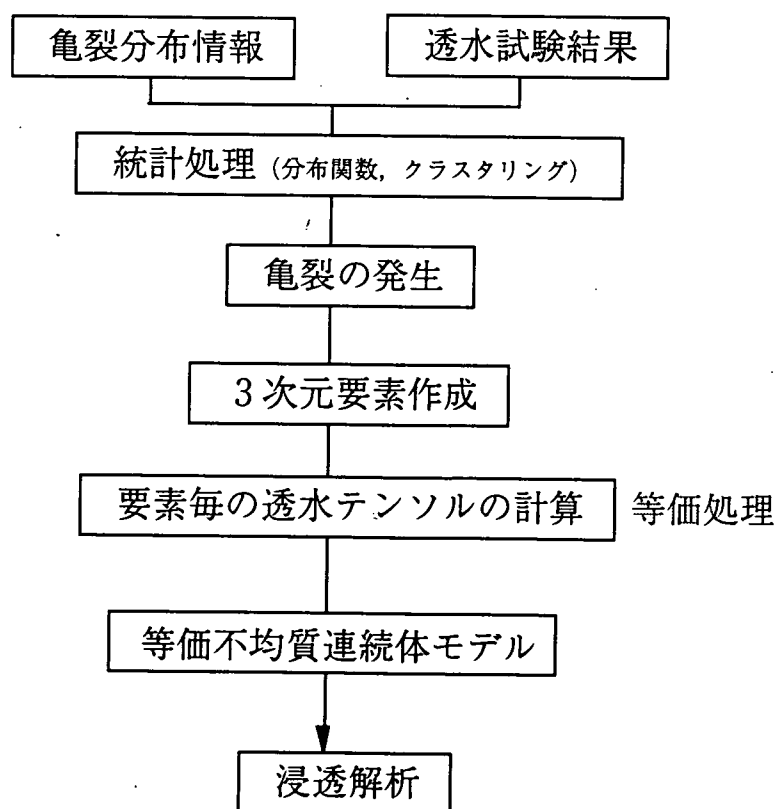


図-3.4.1 等価不均質連続体モデルの作成フロー

4 亀裂統計量の決定

4.1 亀裂統計量の決定手順

等価不均質連続体モデルを作成するためには、原位置データに基づいて亀裂の幾何学的な方位、開口幅、直径の統計分布および3次元亀裂密度を決定する必要がある。特に透水モデルにおいては、岩盤壁面や孔内で観察される開口幅（幾何開口幅）ではなく、水理的に有効な開口幅（水理開口幅）を用いる必要がある。

図-4.1.1に亀裂統計量の決定手順を示す。まず、BTV調査結果から開口亀裂のみを抽出し、孔内密度（一次元密度; ρ_l ）、面の方向、幾何学的開口幅（apparent aperture; t_g ）などの分布を決定した。次に、ボーリング孔内での透水試験を模擬したシミュレーションを行い、これを実測の透水係数分布との比較することにより、亀裂の直径（ r ）の分布と体積密度（ ρ_v ）ならびに水理学的開口幅（ t_h ）を推定した。分布関数としては、方位：ビンガム分布、開口幅と直径：負の指数分布、密度：ポアソン分布を各々採用した。

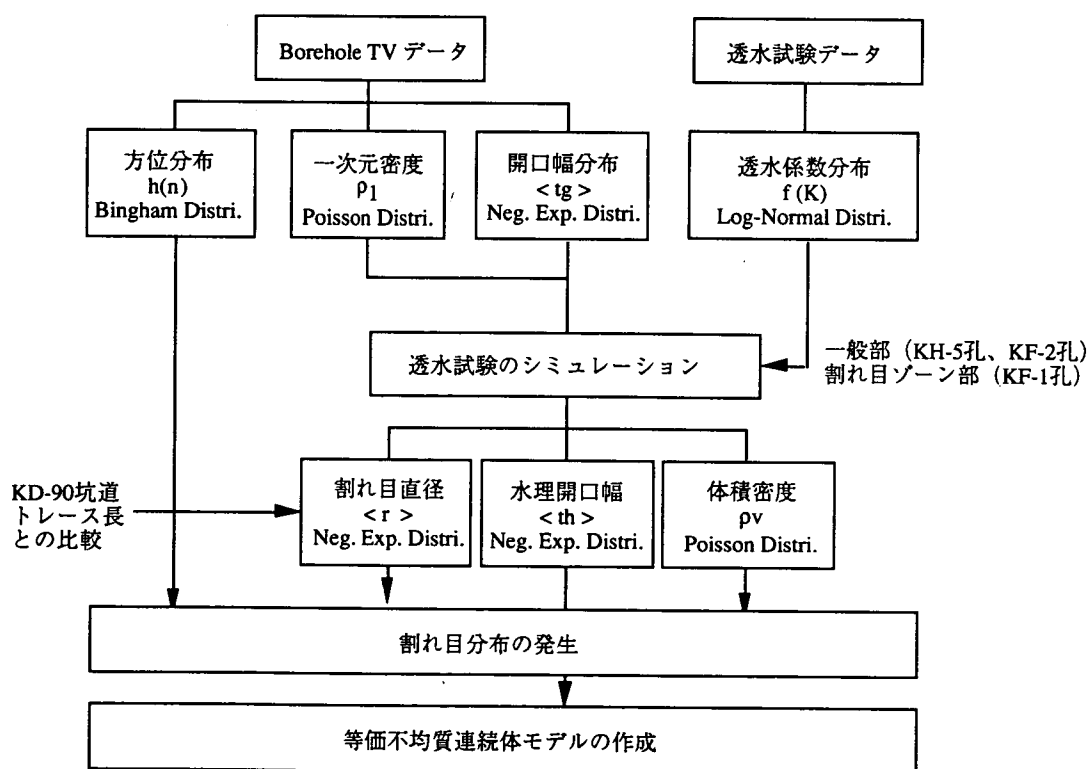


図-4.1.1 亀裂統計量の決定手順

4.2 亀裂統計量の決定

4.2.1 ボアホールTVデータによる決定

(1) 方位分布

KH-4～18孔の孔軸方向は、KH-4～9（N19W水平方向）、KH-10, 11, 13, 14, 16, 17孔（N71E水平方向）、KH-12, 15, 18孔（鉛直方向）の3グループに分けられる。各グループ毎に得られた方位分布を図-4.2.1に示す。この図から、ボーリング孔の方位によって、方位分布が異なって得られていることが分かる。一般に、ボーリング孔内の方位分布には孔軸との交差角の大きい亀裂ほど相対的に多く観察されるサンプリングの偏りが含まれているので、この偏りを次式で補正した（野口他、1992）。

$$E(n) = E_b(n) / n_e \qquad n_e = |e \cdot n|$$

(4.1.1)

ここに、**e**：ボーリング孔の単位方位ベクトル、**n**：亀裂面の単位法線ベクトル、 $E_b(n)$ ：ボーリング孔内で観察される亀裂方向分布、 $E(n)$ ：補正後の分布である。

図-4.2.1の3つの分布に対して各々上記の補正を行い、それらを合成して真の方向分布を推定した結果を図-4.2.2 (a)に示す。この分布に対して次式のビンガム分布（Bingham Distribution）に当てはめた（図-4.2.2 (b)）。

$$f(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi d} \exp\left\{(\kappa_1 \cos^2 \phi + \kappa_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \theta\right\}$$

(4.1.2)

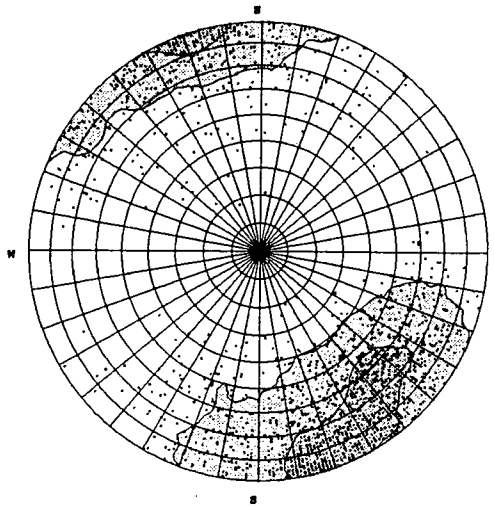
ここに、 θ ：平均方位からの角度、 ϕ ：平均方向周りの回転角、 κ_1 、 κ_2 ：分散パラメータ、 d ：正規化のための定数、である。得られた各セットの平均方位と分散パラメータを表-4.2.1に示す。

表-6.3.2 方位分布パラメータ（ビンガム分布）

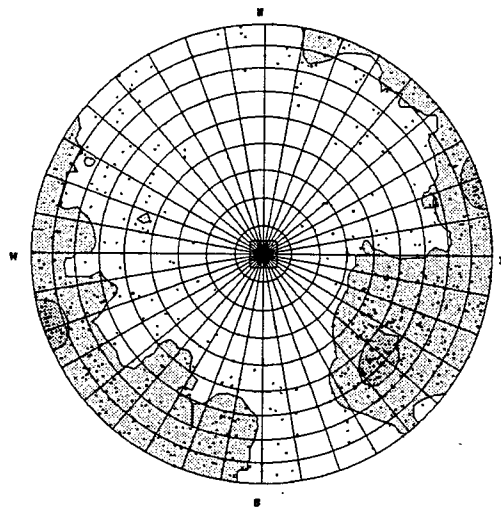
Plunge (°)	234.6
Dip (°)	66.4
κ_1	-5.7
κ_2	-5.7

亀裂面の法線ベクトルの方向をplunge/dipにより表現

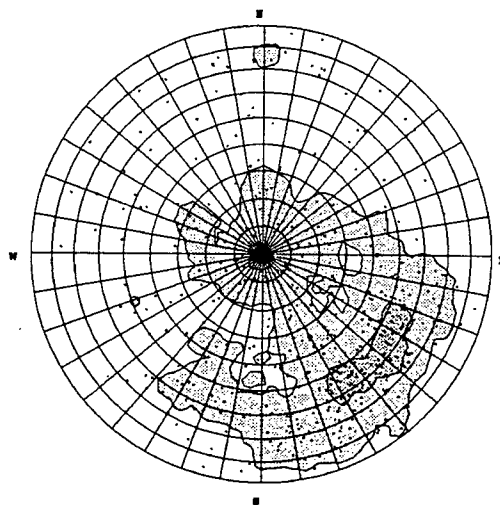
plunge：北方向を0度とし時計周りを正,dip：水平を0度
分散パラメータ κ ：分散(°)=1/ $\kappa \times 180.0/\pi$



(a) KH-4~9孔
(方位：N19W水平)

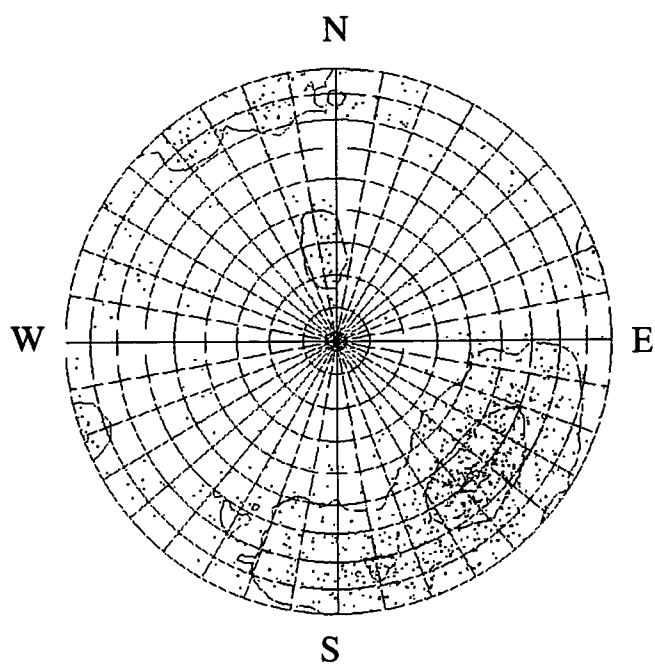


(b) KH-10, 11, 13, 14, 16, 17孔
(方位：N71E水平)

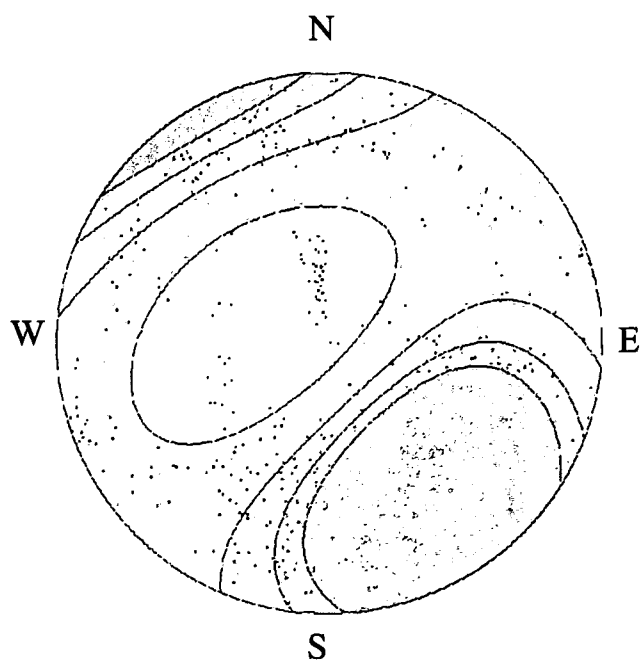


(c) KH-12, 15, 18孔
(方位：鉛直)

図-4.2.1 亀裂の方位分布 (KH4~18孔、ウルフネット下半球投影)



(a) 補正・合成後の分布



(b) Bingham分布への当てはめ

図-4.2.2 亀裂の方位分布の補正と分布関数の当てはめ
(ウルフネット下半球投影)

(2) 開口幅分布と一次元密度

開口幅の分布関数には、負の指数分布を仮定した。負の指数分布の確率密度関数 $f(t)$ は次式で与えられる。

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad (4.1.3)$$

ここに、 λ は1/平均開口幅である。この式から分かるように、負の指数分布は片対数グラフ上で直線となり、傾きの逆数が平均値となる。また、超過確率 $F(t)$ は次式で与えられる。

$$F(t) = \exp(-\lambda t) \quad (4.1.4)$$

いま、単位長さの計測線と交差する幅 t 以上の開口亀裂数として一次元亀裂密度 $\rho_1(t)$ を考えると、それは次式で表される。

$$\rho_1(t) = \rho_1(0) \exp(-\lambda t) \quad (4.1.5)$$

一方、ボーリング孔と交差する開口亀裂の頻度をBTVデータから求めることにより、一次元密度 $\rho_1(t)$ は次式で評価できる。

$$\rho_1(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N(t)} \frac{1}{n_i} \quad (4.1.6)$$

ここに、 $N(t)$ ：幅 t 以上の開口亀裂数、 L ：計測線の長さ、 n_i ：ボーリング孔方位の単位方向ベクトルと亀裂面の単位法線ベクトルの内積である。

KH-4孔～KH-18孔のBTVデータを用いて(4.6)式により $\rho_1(t)$ の分布を求めた結果を図-4.2.3に示す。同図中の分布を(4.5)式に当てはめた理論曲線を同図中に実線で示す。この関係から、

$$\begin{aligned} \text{一次元亀裂密度} &: \rho_1(0) = 0.47 \text{ (1/m)} \\ \text{平均開口幅} &: \langle t \rangle = 3.1 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

と求められる。

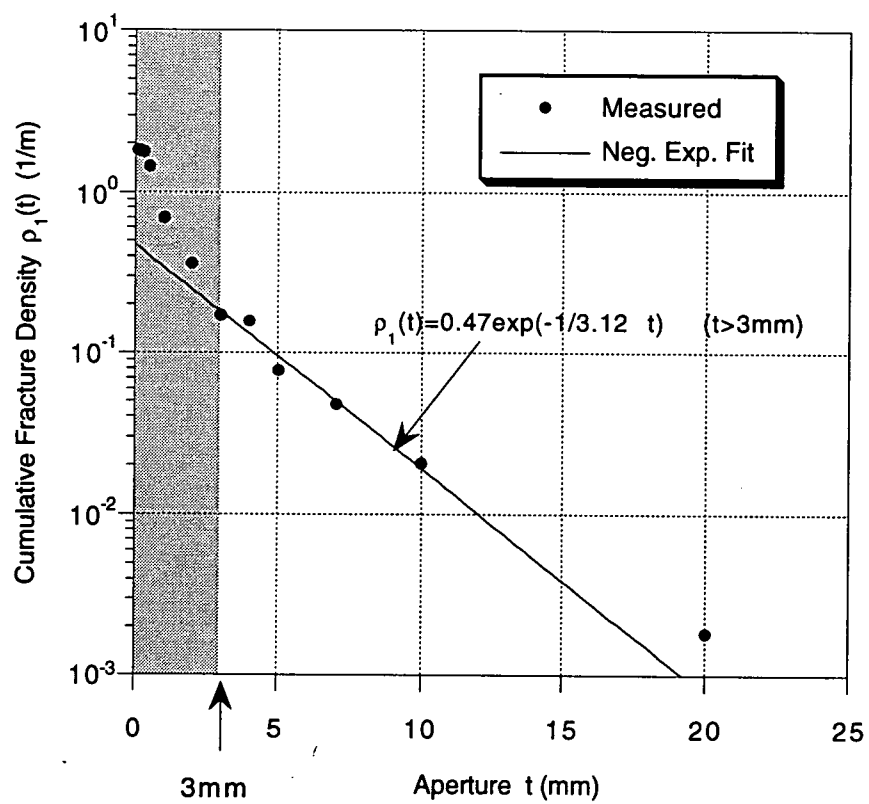


図-4.2.3 亀裂開口幅と一次元密度の関係 (KH-4孔～KH-18孔)

4.2.2 透水試験のシミュレーションによる推定

(1) シミュレーションの方法

亀裂の平均直径と水理開口幅については、ボーリング孔内透水試験を模擬したシミュレーションを行い、得られた透水係数分布を実測と比較することにより決定した。その手順を図-4.2.4に示す。

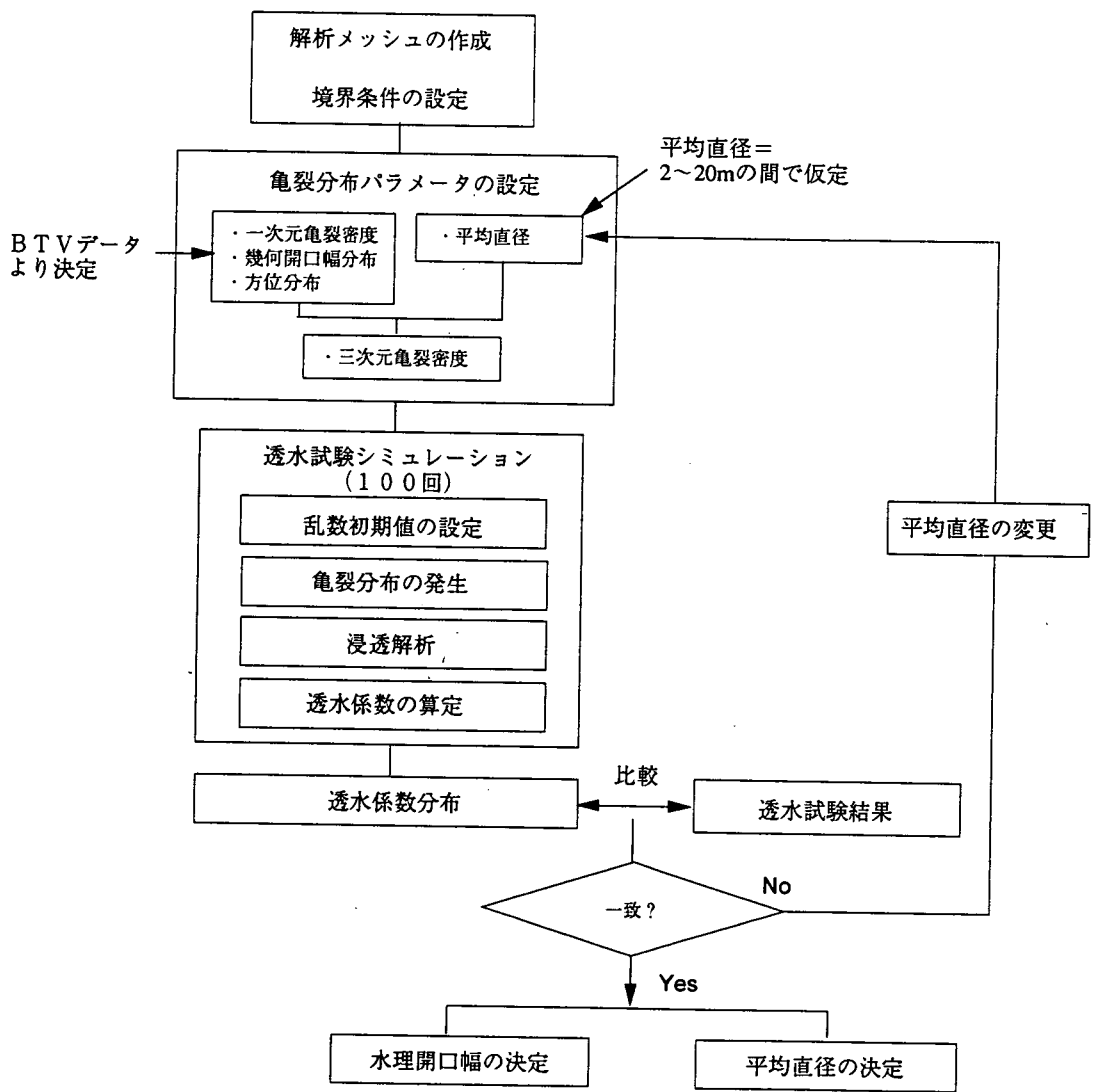


図-4.2.4 透水試験シミュレーションの手順

透水試験のシミュレーションでは、まず、図-4.2.5に示すような一辺65mの立方体領域において亀裂を発生し、等価不均質連続体モデルを作成する。次に、側方境界において圧力水頭=0を与え、解析領域中心の透水試験区間を模した5m区間より圧力水頭=1で注水した時に各々得られる流出量から透水係数を算出する。この解析を亀裂発生 of 乱数初期値を変えて100ケース行うことにより透水係数分布を求める。

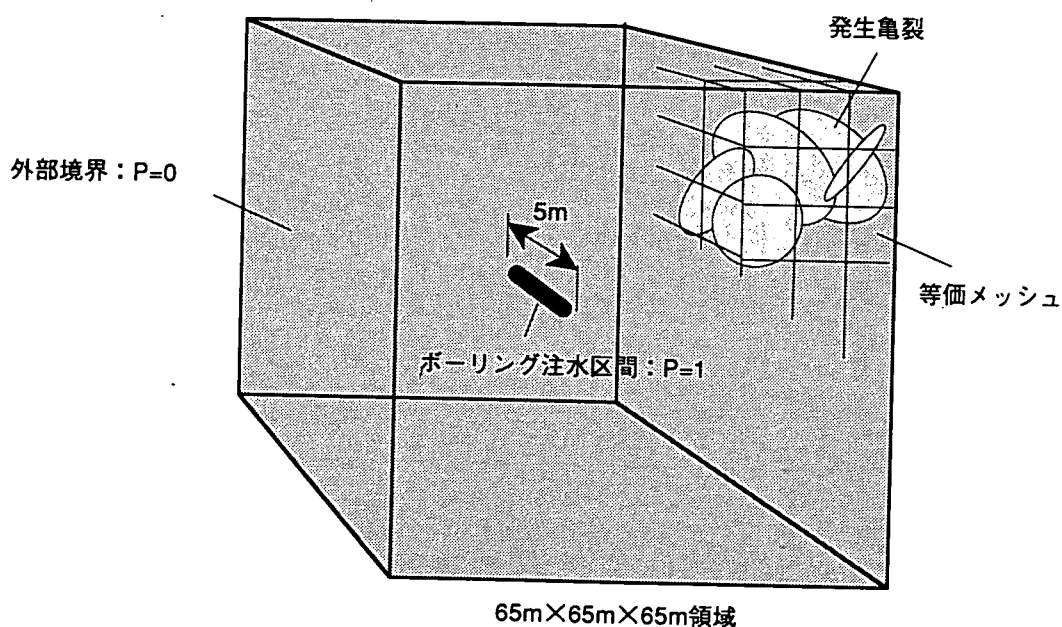


図-4.2.5 透水試験シミュレーションの解析条件

(2) 直径分布

亀裂の直径分布は、通常、坑道壁面上のトレース長の計測結果を基に決定される。平成7年度の解析においてKD-90坑道のトレース長データから直径を推定すると2 m程度が得られた。しかしながら、前回用いたトレース長データでは、分岐構造を持つ亀裂の細かいセグメントも一つの亀裂として扱っており、そのようなデータから求めた平均直径では亀裂の連続性を過少評価していることが懸念される。

そこで今年度は、亀裂の直径分布を透水試験のシミュレーションから決定するアプローチを採用した。これは、実測の透水係数の分布に合うような直径分布を求める方法である。ただし、直径分布は負の指数分布に従うことを仮定する。この仮定により、分布を規定する未知量は直径の平均値のみとなる。

その概念を図-4.2.6に示す。いま、BTVデータから決定した一次元亀裂密度 ρ_l を固定する。その場合、亀裂中心の三次元亀裂密度 ρ_v （単位体積内に含まれる亀裂中心点の平均個数）は次式で求められる（Oda, 1983）。

$$\rho_v = \frac{4}{\pi} \rho_l \frac{1}{\langle r^2 \rangle} \quad (4.2.1)$$

ここに、 ρ_l ：一次元亀裂密度、 $\langle r^2 \rangle$ ：亀裂の直径の2乗平均である。特に、亀裂の直径分布が負の指数分布の場合には、 $\langle r^2 \rangle = 2 \langle r \rangle^2$ である。

すなわち、三次元亀裂密度 ρ_v は亀裂直径の2乗平均に反比例する。平均亀裂直径を大きくするほど、三次元亀裂密度が減少して亀裂分布の不連続性が大きくなり、透水係数の分散（あるいは標準偏差）が増大する。そこで、図-4.2.6(b)に示すような平均

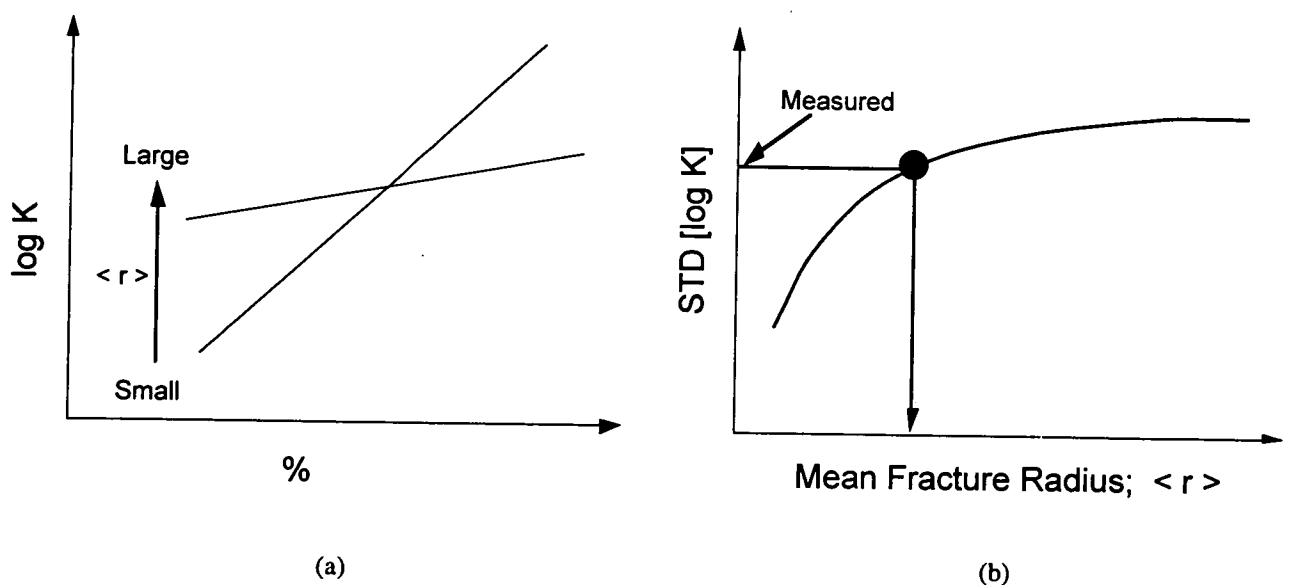


図-4.2.6 透水試験のシミュレーションによる平均直径の推定

直径と透水係数の標準偏差の関係をシミュレーションから数値的に求め、実測の透水係数の標準偏差と比較することにより、最適な平均直径を推定する。

まず実測値として、550mレベルNW坑道沿いのKF-1孔とKF-2孔において、水理試験（流量検層）で求められた透水係数分布を図-4.2.7に示す。KF-1孔は割れ目ゾーン部に、KF-2孔は一般部に位置している。両孔の透水係数の対数平均と標準偏差を表-4.2.1に示す。

次に、平均直径を2～20mの間で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対数正規確率紙にプロットした結果を図-4.2.8に示す。このグラフの直線性から対数正規分布に近似されることが分かる。また、平均直径を大きくするに従い、透水係数のバラツキが大きくなっているのが分かる。平均直径に対する透水係数の標準偏差（ $\sigma [\log K]$ ）の変化を図-4.2.9に示す。

表-4.2.1中の標準偏差を図-4.2.9上にプロットした結果から、KF-1孔とKF-2孔について平均直径を求めると各々8m、5mとなる。

表-4.2.1 透水係数の平均値と標準偏差（孔内透水試験結果）

ボーリング孔	対数平均値 [cm/s]	標準偏差 (log K)
KF-1孔	7.96×10^{-6}	0.84
KF-2孔	1.23×10^{-6}	0.59
KH-5孔	7.74×10^{-7}	0.97

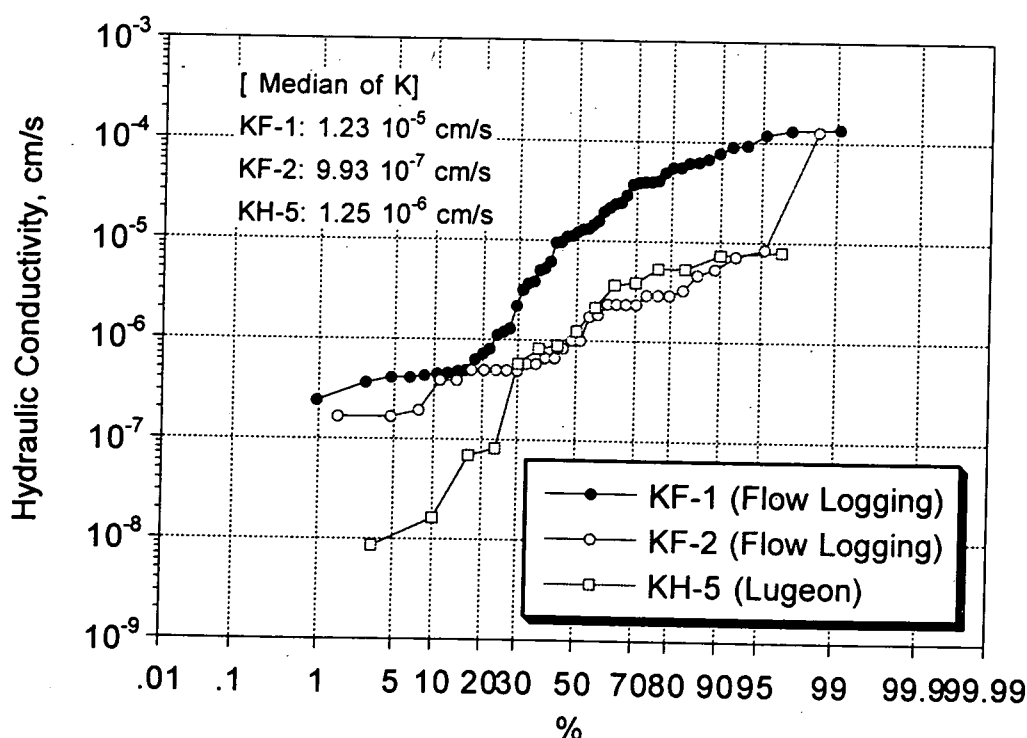


図-4.2.7 透水係数分布の実測値（KF-1, KF-2, KH-5孔）

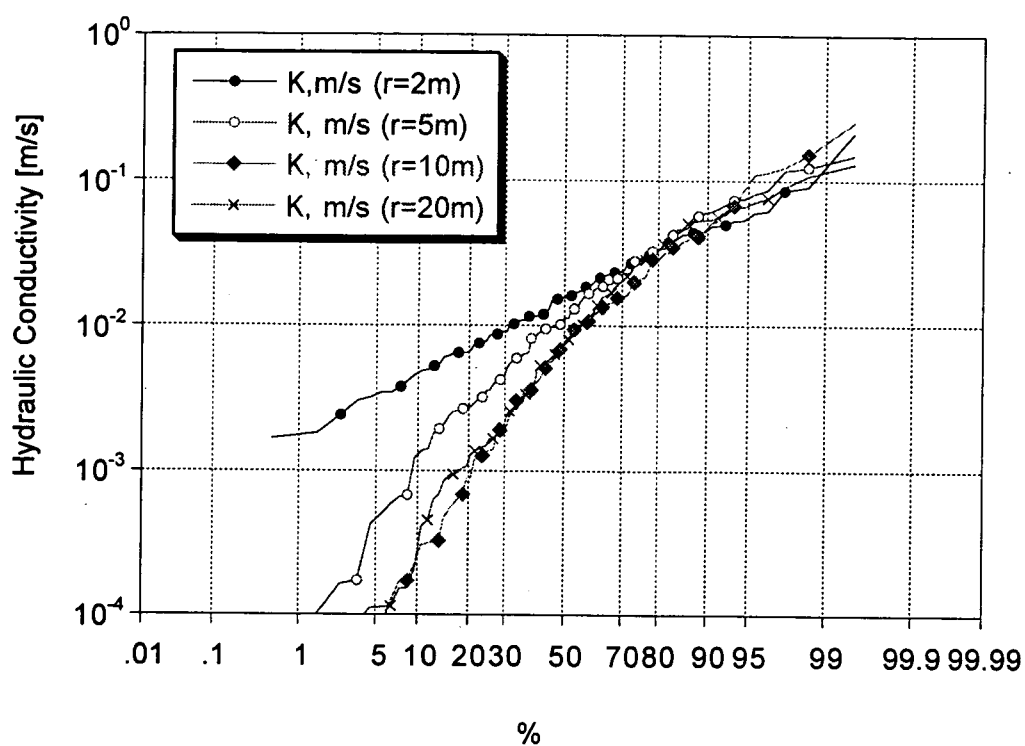


図-4.2.8 平均直径による透水係数分布の変化 (シミュレーション)

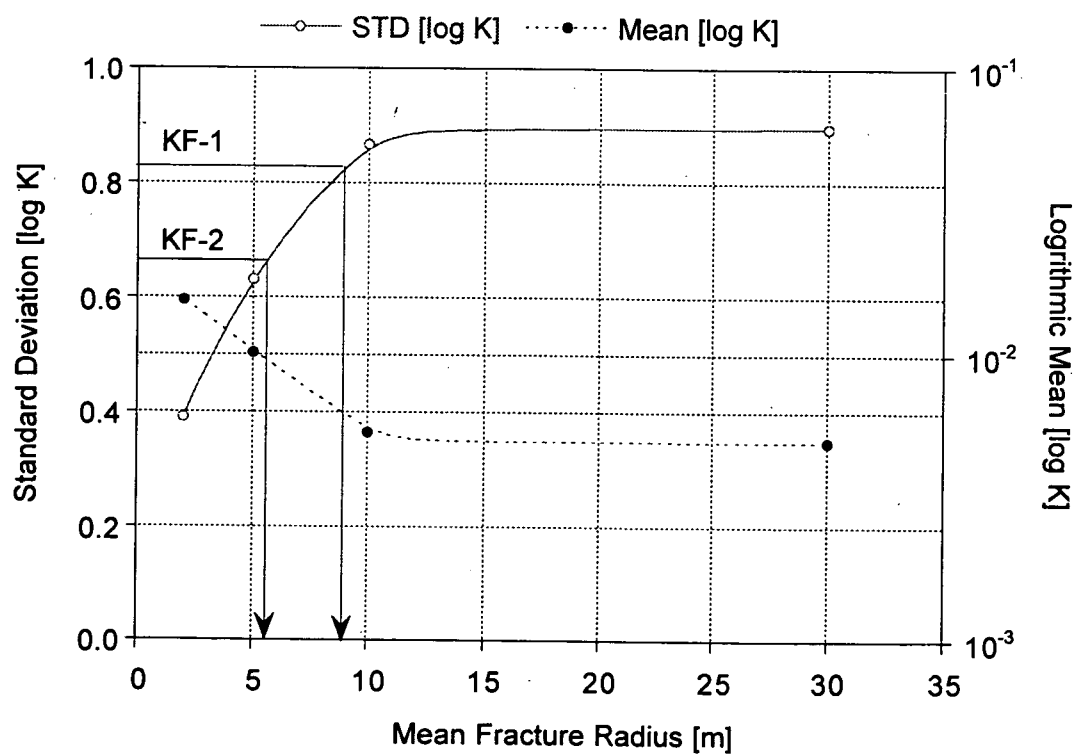


図-4.2.9 透水係数の平均および標準偏差と平均亀裂直径の関係

(3) 水理学的開口幅の決定

幾何学的な開口幅（幾何開口幅 t_g と記す）と水理的に有効な開口幅（水理開口幅 t_h と記す）は一般に異なる。両者の関係については、次の比例関係を仮定した。

$$t_g = \alpha \cdot t_h \quad (4.2.2)$$

上記比例定数 α を求めるために、先に決定した幾何開口幅 t_g を用いて透水試験のシミュレーションを行い、それを透水試験結果と比較する。亀裂面内流れの三乗則が成り立つとすれば、 α はシミュレーション結果と透水試験結果の比の三乗根により求められる。

(2)で求めた平均直径（KF-1孔：8m、KF-2孔：5m）を用い、透水試験のシミュレーションから得られた透水係数分布を、実測値にフィットさせた結果を図-4.2.10に示す。この図からKF-1孔とKF-2孔の場合について各々 $\alpha=41$ 、93と求められ、水理開口幅は幾何開口幅の数10～100分の1程度と評価され、また、亀裂ゾーン内部に存在するKF-1孔の平均的な水理開口幅は、一般部に位置するKF-2孔の約2倍と求められた。

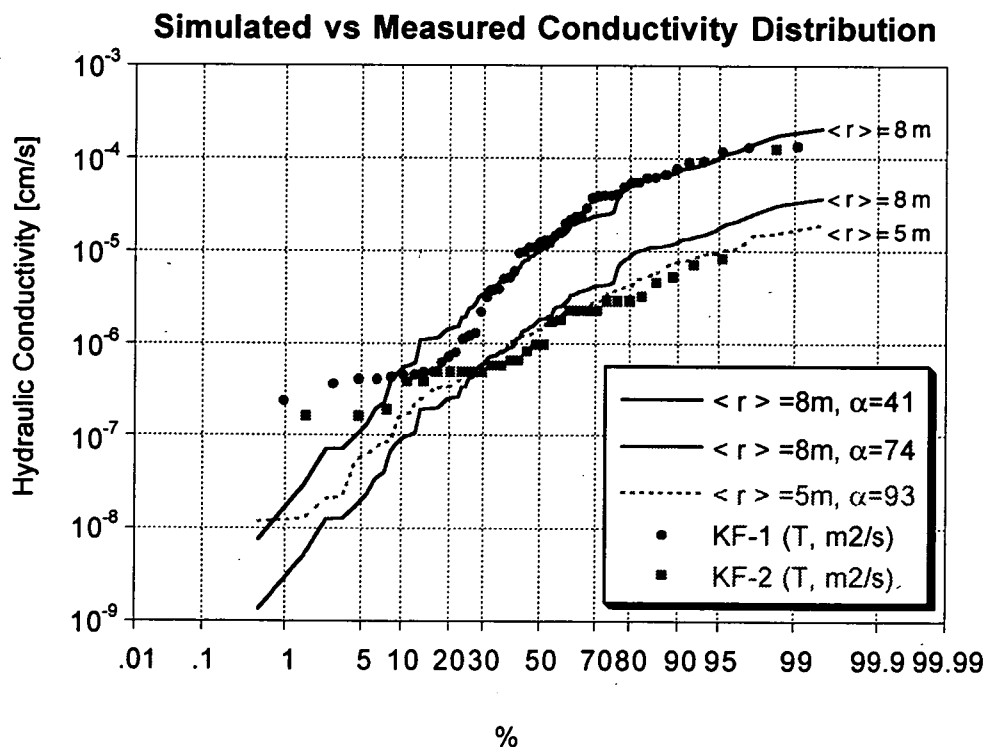


図-4.2.10 透水係数分布（シミュレーションと実測のフィッティング）

5 等価不均質連続体モデルの特性に関する検討

5.1 スケール効果の検討

等価不均質連続体モデル（以下、EHCモデルと呼ぶ）では、各解析メッシュ内に存在する亀裂分布に対してクラックテンソル理論を適用し等価な透水テンソルを計算する。その大きな利点は、不連続な亀裂分布をテンソル近似することにより、個々の亀裂を要素分割する必要がなく、計算容量や計算時間を短縮できる点にある。

EHCモデルはDFNモデル（不連続モデル）の近似になっており、メッシュサイズがREV（Representative Elementary Volume）に達するほど十分大きければDFNモデルとEHCモデルから得られる透水係数は理論的に一致する。しかしながら、メッシュサイズが小さい場合には、以下の理由により両者は一致しないことが予想される。

すなわち、EHCモデルでは、

- ・メッシュ内の亀裂分布の不連続性の効果を考慮していない
- ・不連続体を連続体へ置き換える際に等価透水テンソルの近似を用いている

ところが、メッシュサイズを大きくすると透水係数の分布幅が狭くなり、不均質性の表現という本モデル化手法の有利性が逆に損なわれることになる。そこで、EHCモデルの近似がどの程度のメッシュサイズまで有効であるかを調べておく必要がある。

そこで、解析領域の大きさとメッシュサイズを変化させてDFNモデルとEHCモデルによる浸透解析を行い、等価透水係数のスケール効果を調べるとともに、両モデルの違いを調べた。

(1) 解析内容

解析では、まず、4章で求めた亀裂分布パラメータを用い、一辺80mの立方体領域に亀裂を発生させ、これから一辺の長さが10m、20m、30m、50m、100mの立方体ブロックを取り出してDFNモデルとEHCモデルを作成した。EHCモデルについてはメッシュの一辺の長さ（メッシュサイズ、 ΔX ）を変化させたモデルも併せて

表-5.1.1 解析ケース（スケール効果）

モデル	$\Delta x(m)$	スケール（立方体の一辺の長さ）[m]				
DFNモデル		10	20	30	50	100
EHCモデル	2.0	〃	〃	〃	〃	〃
	5.0	—	〃	〃	〃	〃
	10.0	—	—	〃	〃	

長さ（メッシュサイズ、 ΔX ）を変化させたモデルも併せて作成した。次に、立方体領域の一つの側面に一定圧力水頭 1 m、反対側の面に圧力水頭 0 mを与え、その他の 4 面を不透水境界とした境界条件を与えて浸透流解析を行い、次式により等価な透水係数を求めた。

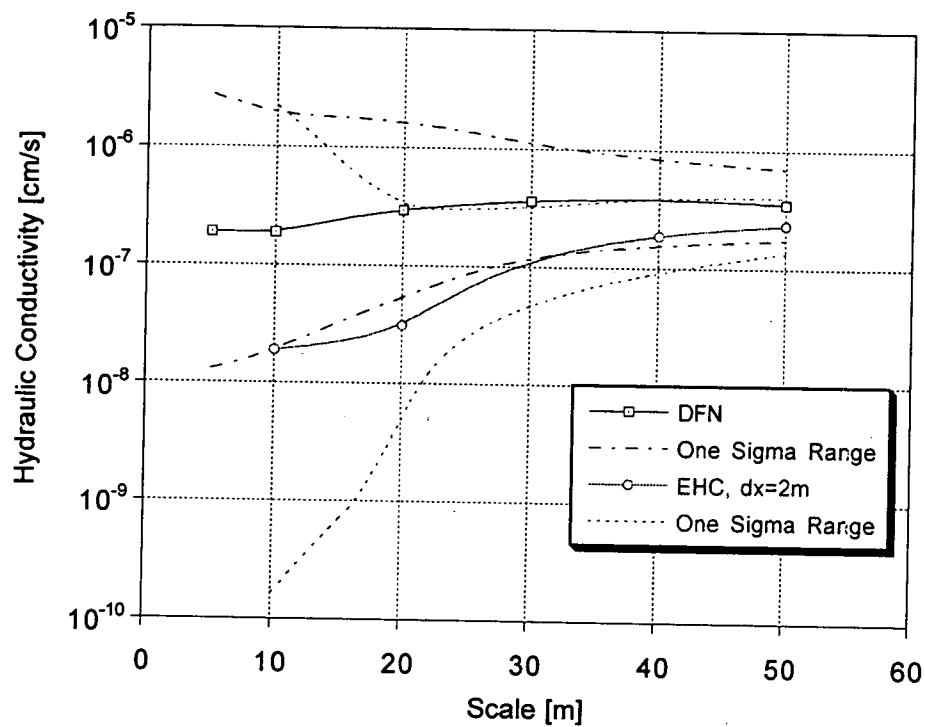
$$K=Q/\Delta H L$$

ここに、 Q ：流量[m³/s]、 ΔH ：水压差[m]、 L ：立方体の一辺の長さ [m]、 K ：等価透水係数[m/s]である。なお、立方体の方向はKD-90坑道と平行とし、一定圧力境界面はKD-90坑道と平行な 2 面とした。これは、KD-90坑道で得られた坑道規模透水試験結果との比較を考慮したためである。

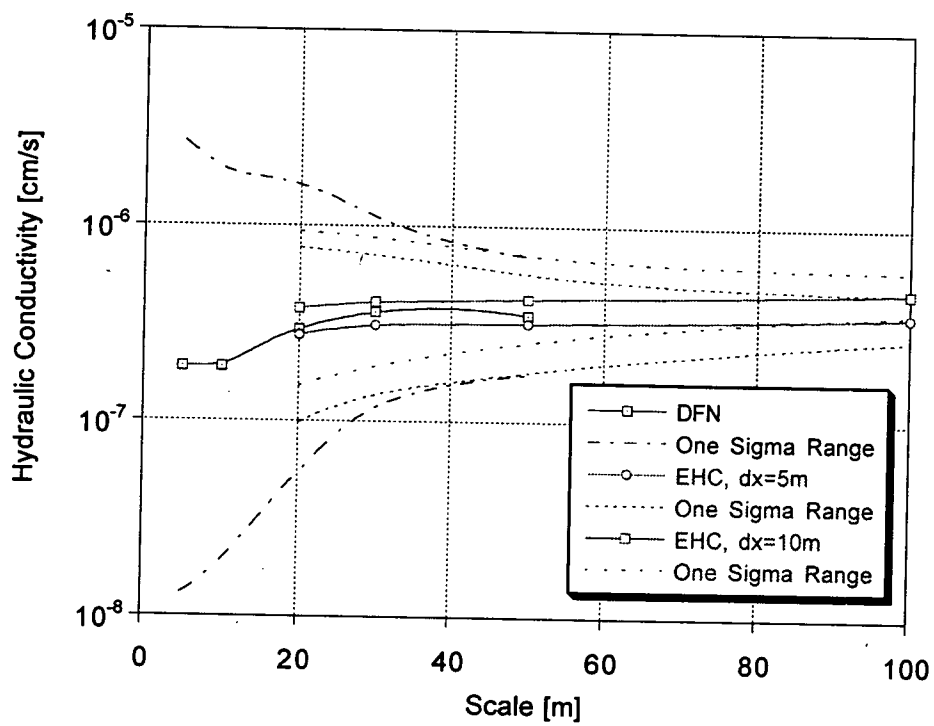
(2) 解析結果

解析結果を図-5.1.1に示す。図中(a)は、メッシュサイズを2mとした場合のEHCモデルをDFNモデルと比較したものである。この図から、解析領域を 40 m程度とればDFNモデルとEHCモデルの等価透水係数がほぼ一致することが分かる。ただし、EHCモデルでは亀裂の不連続性を直接評価していないため、領域が大きくなると等価透水係数が大きくなる傾向が見られる。従って、この程度メッシュサイズを用いる場合には、不連続性の影響を考慮した補正係数を用いる必要がある。次に、EHCモデルのメッシュサイズを5m、10mと大きくした場合の等価透水係数をDFNモデルとともに図-5.1.1 (b) に示す。このようにメッシュサイズを大きくとることによって平均が一定に近い等価透水係数が得られる。次に、透水係数の（対数）標準偏差とスケールを図-5.1.2に示す。メッシュサイズを大きくしたEHCモデルでは、DFNよりも標準偏差が小さくなり、分布の不均質性が低くなる効果が見られる。

REVに関しては、解析領域を 40 m程度とれば透水係数の標準偏差が0.3程度となり、このスケールはKD-90坑道の亀裂解析や坑道規模透水試験から評価されたREVのサイズとほぼ対応する。



(a) DFNモデルとEHCモデル ($\Delta x=2\text{m}$) の比較



(a) DFNモデルとEHCモデル ($\Delta x=5\text{m}, 10\text{m}$) の比較

図=5.1.1 等価透水係数のスケール効果

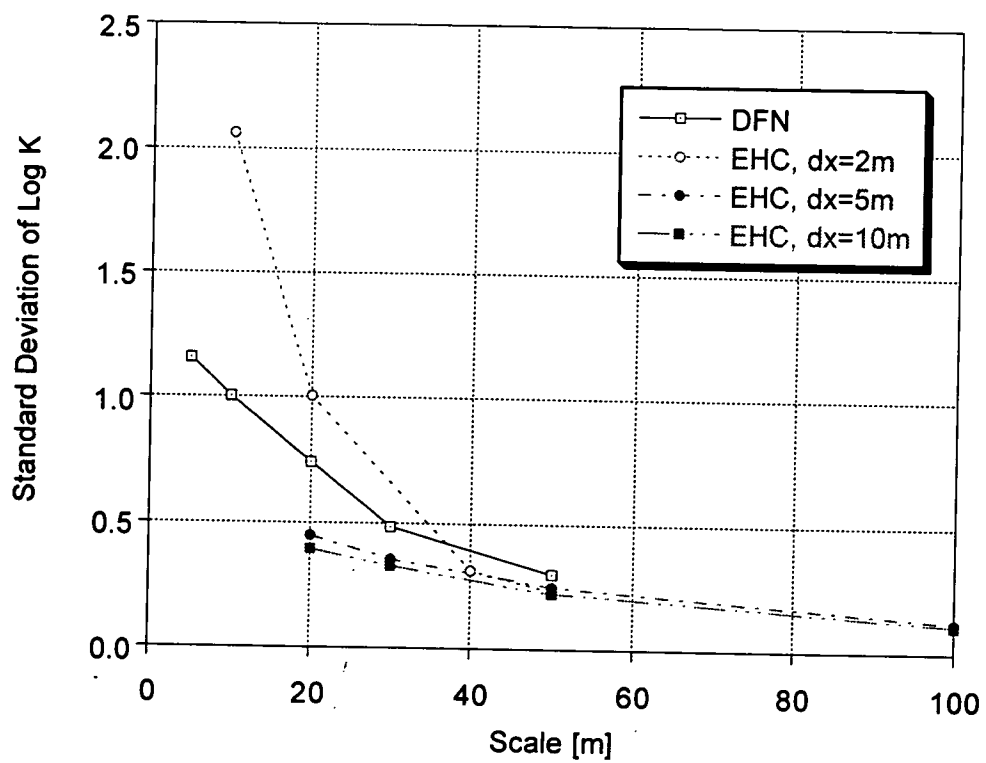


図-5.1.2 等価透水係数の標準偏差のスケール効果

5.2 亀裂パラメータの感度解析

ここでは、平均開口幅、平均直径、密度などの亀裂パラメータの差異が透水係数の分布に及ぼす影響を調べる。

表-5.2.1に示すように亀裂パラメータを変化させたケースについて、4章と同様の透水試験のシミュレーションを行い、透水係数分布の変化を調べた。直径については2～20mまで変化させ、密度と開口幅については、表中の2ケースを検討した。

表-5.2.1 解析ケース（亀裂パラメータの感度解析）

	ケース 1	ケース 2
平均開口幅 [mm]	3.1	1.3
一次元密度 [1/m]	0.5	1.8
平均直径 [m]	2, 5, 10, 20	

解析結果を図-5.2.2に示す。この図から、平均直径が小さくなるに従って透水係数分布の傾き（標準偏差）が小さくなることが分かる。また、一次元密度を大きめに評価したケース2では、ケース1と比べて全体的に傾きが緩くなっており、透水係数が比較的均一となっている。これらの結果から、平均透水係数は平均開口幅と密度により影響され、分布のバラツキは平均直径による影響が大きいことが分かる。また、図-5.2.1を見ると、密度が高いケース2の方が直径に対する感度が低いことが分かる。

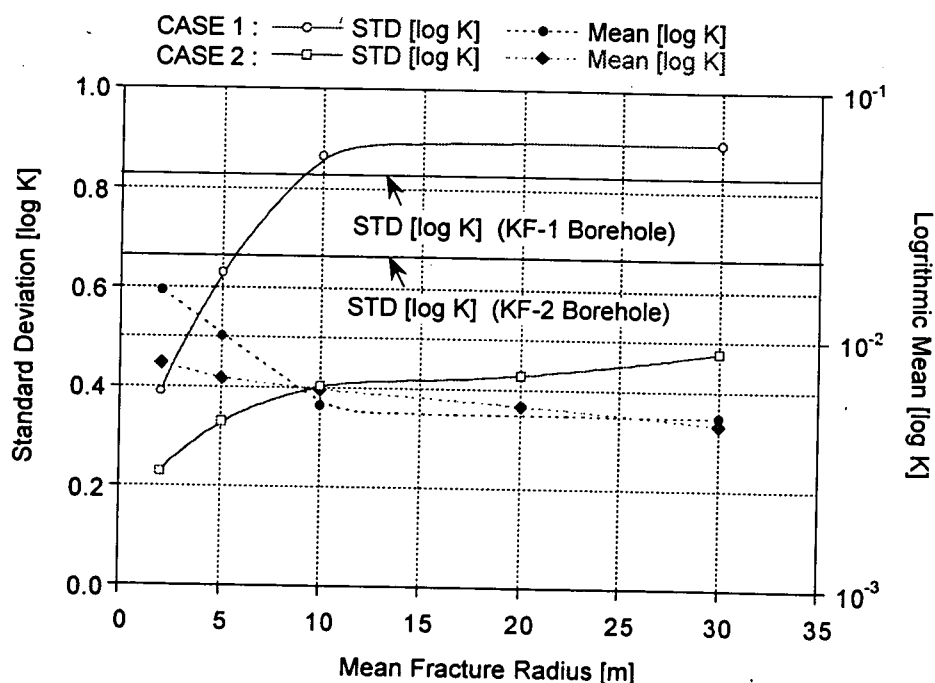
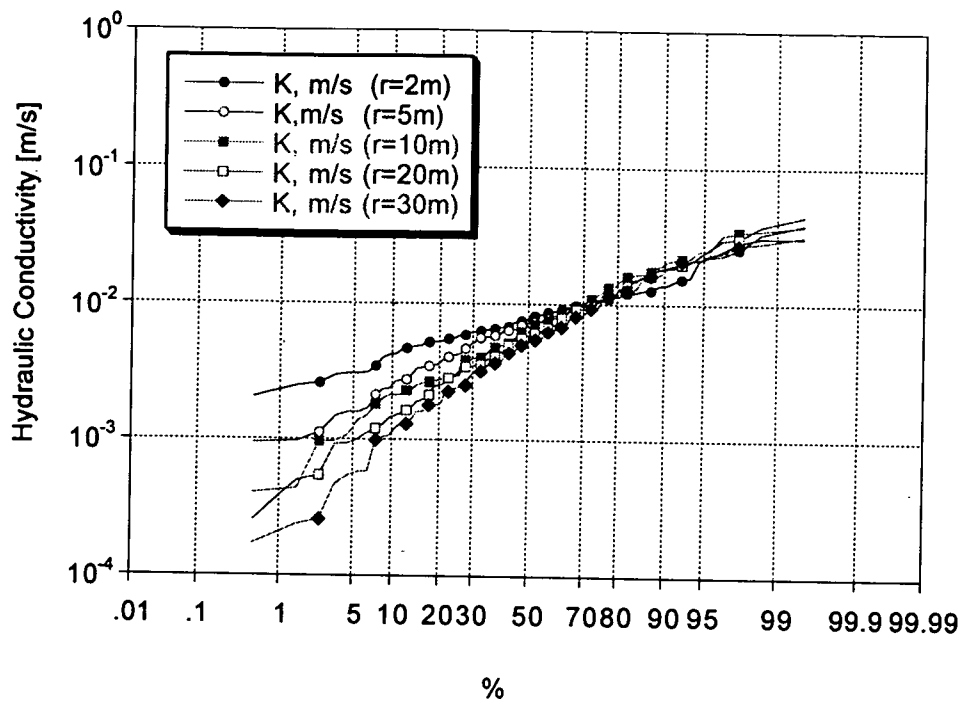
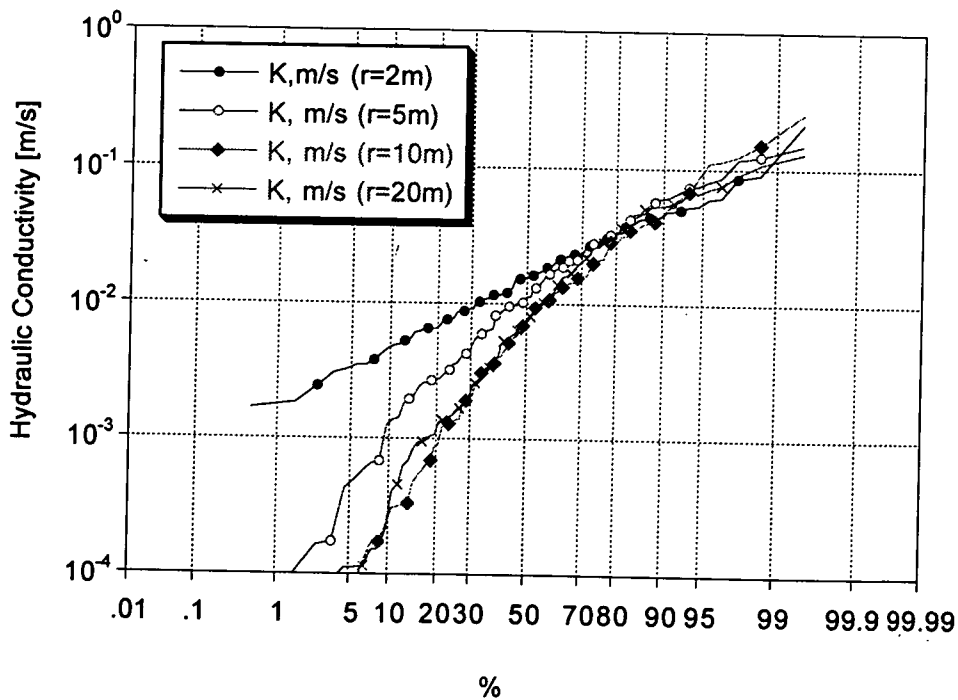


図-5.2.1 透水係数の平均・標準偏差と平均直径の関係



(a) $\rho l=1.8(1/m)$ 、 $t=1.3(mm)$ の場合 (ケース 1)



(b) $\rho l=0.5(1/m)$ 、 $t=3.1(mm)$ の場合 (ケース 2)

図-5.2.2 解析結果に及ぼす亀裂パラメータの影響

6. 等価不均質連続体モデルによる岩盤浸透流解析

6.1 解析の全体フロー

平成6、7年度の解析と同様に、釜石鉱山550mレベル坑道内原位置試験場周辺の数100m四方の領域を対象として解析を行う。図-6.1.1に解析の全体フローを示す。まず、同試験場周辺の水理地質構造を元に、解析領域内の物性をゾーンにより分類する（ゾーニング）。次に、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定常浸透解析を実施する。この結果を観測データと比較し、逆解析に用いる初期モデルを抽出する。最後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うと共にモデルの妥当性を検討する。

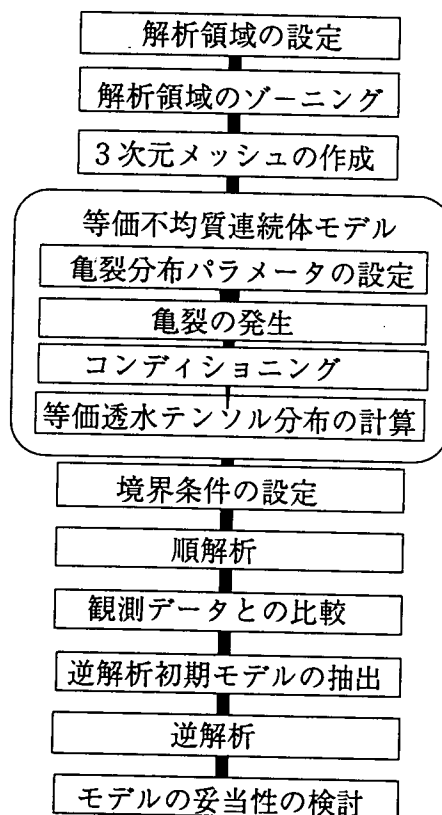


図-6.1.1 解析の全体フロー

6.2 解析領域および境界条件の設定

6.2.1 解析領域の設定

解析領域は、KD-90坑道を中心とし、その周辺の坑道、立坑、試錐座、試錐孔（表-6.2.1）を含む領域で、高間隙水圧帯を含む領域とする（図-6.2.1）。

解析領域の設定にあたっては、地表から削孔されたKG-1孔における間隙水圧測定結果に基づいて、その側方境界と上下境界を設定する。

表-6.2.1 解析領域内に含まれる構造

坑 道	: NW坑道、KD-88、KD-89、KD-90 アクセス坑道、人工バリア坑道
立坑、試錐座	: KR-89、KB-89A、KB-89B
試錐孔	: KH-1～21,23,25, KF-1, KF-2
割れ目ゾーン	: A（高間隙水圧帯）、B

(1) 側方境界

KD-90坑道入口から約250m離れたKG-1孔は、リニアメント解析により求められた割れ目ゾーンB内に位置している（図-6.2.1参照、割れ目ゾーンA、Bについては6.2.2で後述）。図-6.2.2に示したKG-1孔における間隙水圧計測結果によると、550mレベルにおける間隙水圧は、KD-90坑道掘削終了（1990年11月23日）2年後（1992年11月28日）に約10kgf/cm²で、その後もあまり変化が見られない。また、KD-90坑道周辺の試錐孔における間隙水圧計測結果によると、KD-90坑道から30m範囲内での間隙水圧は最大でも3.0kgf/cm²程度で、KG-1孔とKD-90坑道の間で約7.0kgf/cm²の間隙水圧の低下が見られる。

したがって、解析領域は、間隙水圧が最も低下していると思われるKD-90坑道を中心に間隙水圧が唯一地表から計測されているKG-1孔をその側方境界とする図-6.2.1に示すような1辺400mの正方形領域とする。

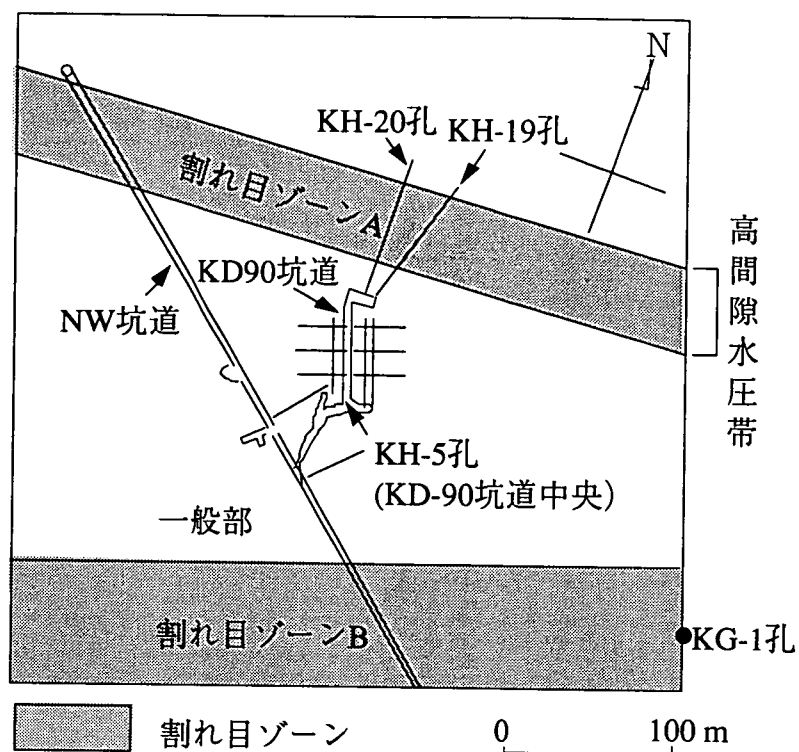


図-6.2.1 解析領域平面図（標高550mレベル）

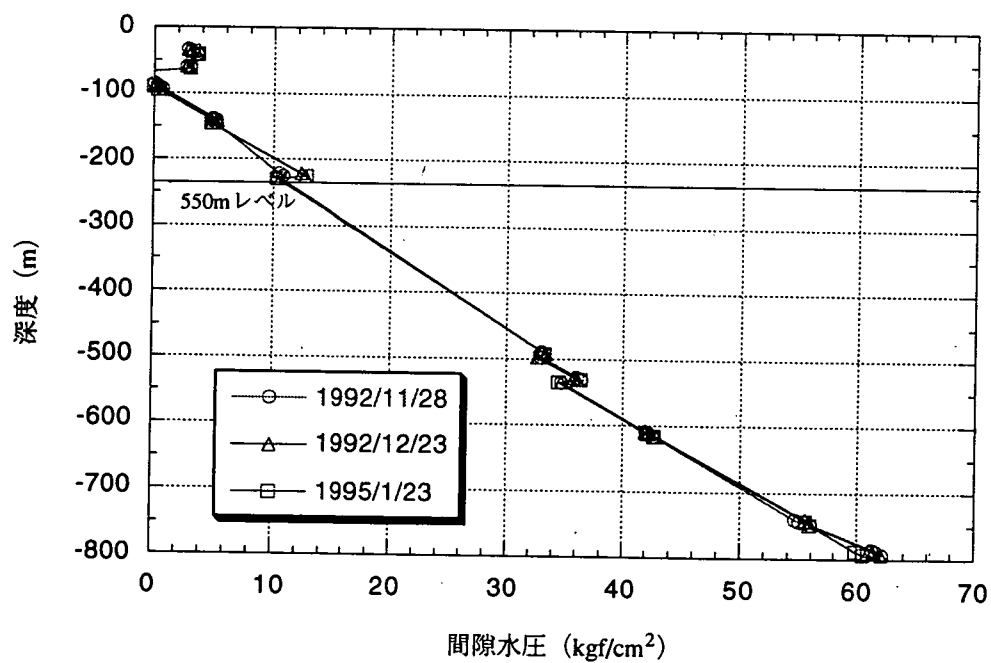


図-6.2.2 KG-1孔における間隙水圧経時変化

(2) 上部・下部境界

図-6.2.2のKG-1孔における間隙水圧計測結果において、550mレベル坑道とその上下のレベルの坑道（680mレベル坑道、250mレベル坑道）における間隙水圧を比較して上部境界と下部境界について検討する。

550mレベル坑道上部の680mレベル坑道の全水頭は、その下にある標高640mにおける水頭とほぼ同じで、その間の間隙水圧の乱れはあまり見られない。したがって、上部境界はこの範囲内に設定することとし、次節の境界条件の設定より550mレベルにおける側方境界の間隙水圧は 10.0kgf/cm^2 であるため550mレベルから100m上方に上部境界を設定することとした。

550mレベル坑道下部の250mレベル坑道近傍における全水頭は、550mレベルに比較して低下しており、250mレベル坑道により乱されて間隙水圧が局所的に低下していると考えられる。したがって、下部境界は、250mレベル坑道を含まない位置、すなわち、550mレベルと250mレベルの間400mレベルに設定することとする。

したがって、上部境界は550mレベル坑道から上方100mの位置（標高650m）、下部境界は550mレベル坑道から下方150mの位置（標高400m）に設定した。

以上により、解析領域は、図-6.2.4に示すようにKD-90坑道を中心とした $400\text{m} \times 400\text{m} \times 250\text{m}$ の領域となる。

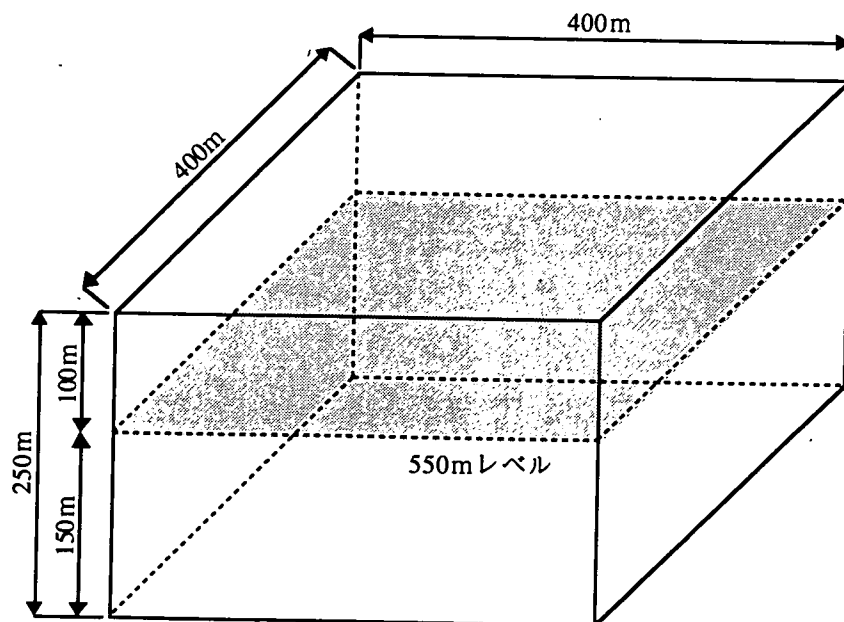


図-6.2.4 解析領域鳥瞰図

6.2.2 解析領域のゾーニング

原位置試験場周辺の水理地質構造的特徴のうち、リニアメント解析と坑道内の亀裂観察から想定される割れ目ゾーンとKD-90坑道北側のボーリング孔（KH-19孔）で観察された高間隙水圧帯に注目し、解析領域のゾーニングを行った。

(1) 割れ目ゾーン

原位置試験場周辺には、図-6.2.5に示すように、地表のリニアメントと各坑道レベルの坑道内の亀裂観察結果から判断される2つの割れ目ゾーンAとBがある。割れ目ゾーンAは、KD-90坑道北側に位置し、ほぼ東西方向にある。割れ目ゾーンBは、KD-90坑道南側に位置し、N70° E方向にある。

(2) 高間隙水圧帯

KD-90坑道の周辺のボーリング孔内水圧は全体的に低い（2～5kg/cm²程度）。これに対して、KD-90坑道北側から真北方向に削孔されたKH-19孔の削孔時の湧水量と口元での水圧の変化を図-6.2.7に示す。この図より、深度50m付近から湧水量と水圧が急激に増加しているのが分かる（約20.0kgf/cm²）。隣接して同様の方向に削孔されたKH-20～25孔においても高い間隙水圧が観測されており、東西方向に連続する高間隙水圧帯の存在が示されている。この高間隙水圧帯とNW坑道内で多量の湧水が見られる区間を結ぶゾーン（図-6.2.6参照）は、図-6.2.5に示したリニアメント解析で得られた割れ目ゾーンAの位置とほぼ一致する。

以上の水理地質的特徴を考慮し、本解析では、図-6.2.1のように、解析領域を割れ目ゾーン（A、B）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。また、境界条件の設定に当たっては、割れ目ゾーンAと高間隙水圧帯が対応することから、亀裂ゾーンAに沿って高い水圧を与えることとした。

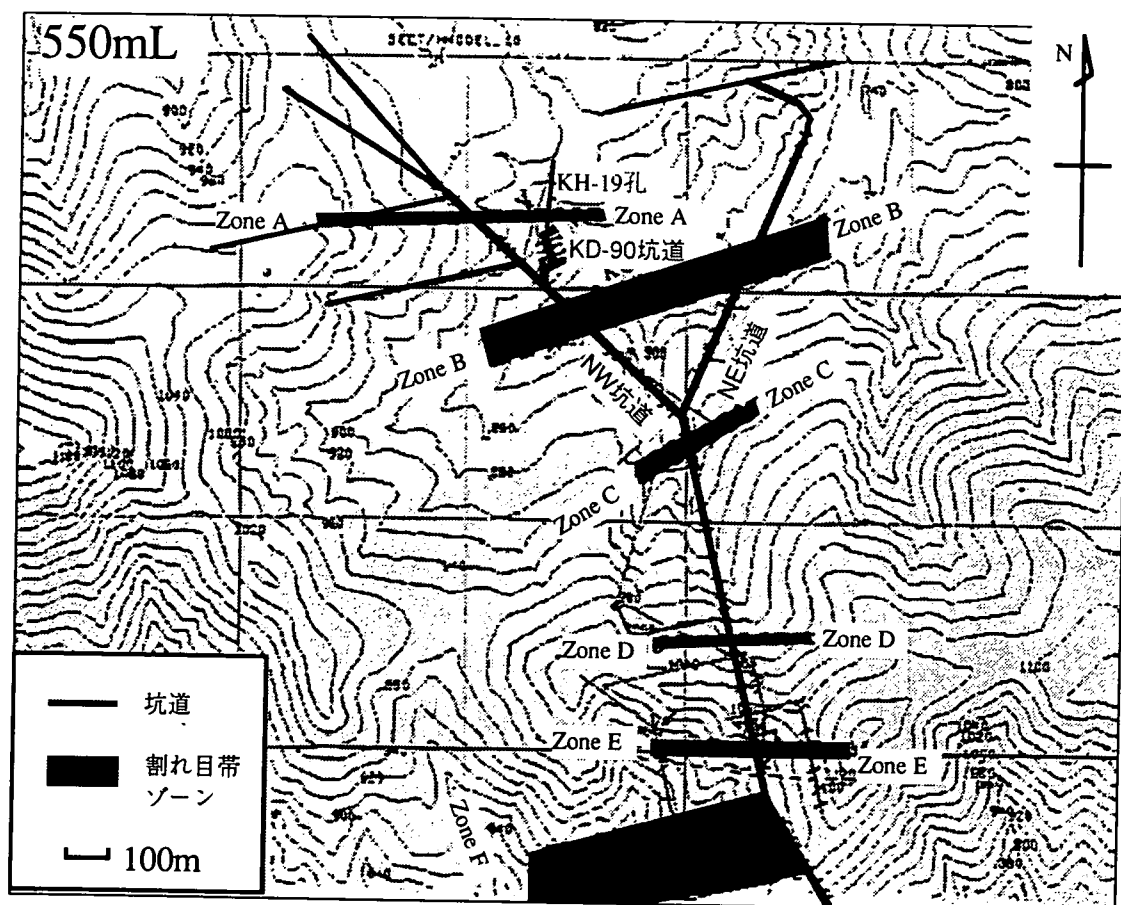


図-6.2.5 リニアメント解析により得られた割れ目ゾーン位置図 (長他、1994)

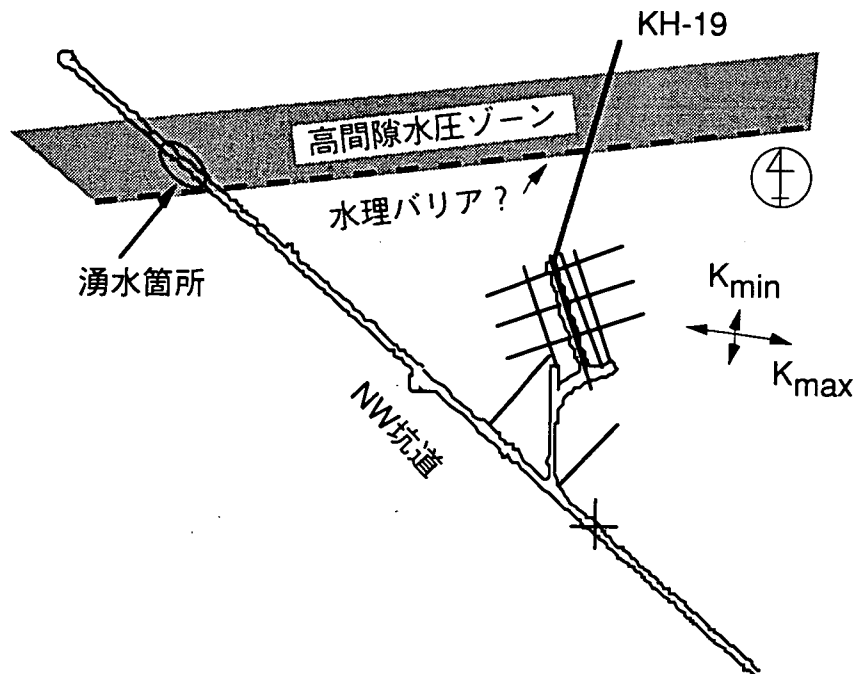


図-6.2.6 高間隙水圧帯の推定位置

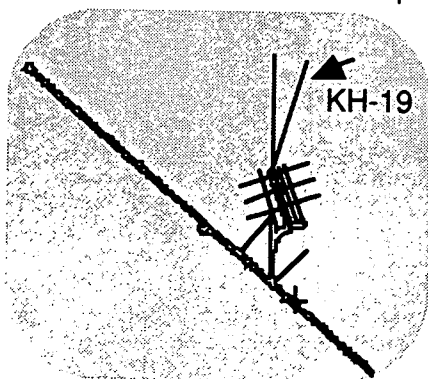
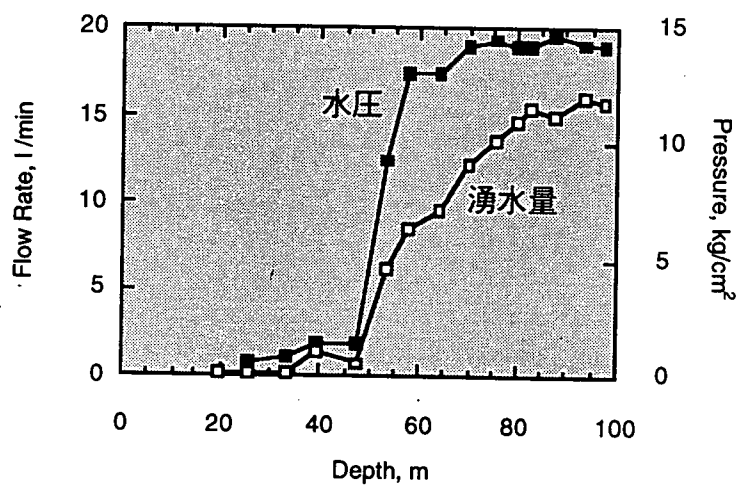


図-6.2.7 KH-19削孔時の間隙水圧と湧水量 (口元)

6.2.3 境界条件の設定

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坑道北側の高間隙水圧帯では、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、高間隙水圧帯に対応すると考えられる割れ目ゾーンの外側境界で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（図-6.2.8）。

[一般部] 定水位境界： 10kgf/cm² (550m レベル)
[割れ目ゾーン] 定水位境界： 20kgf/cm² (550m レベル)

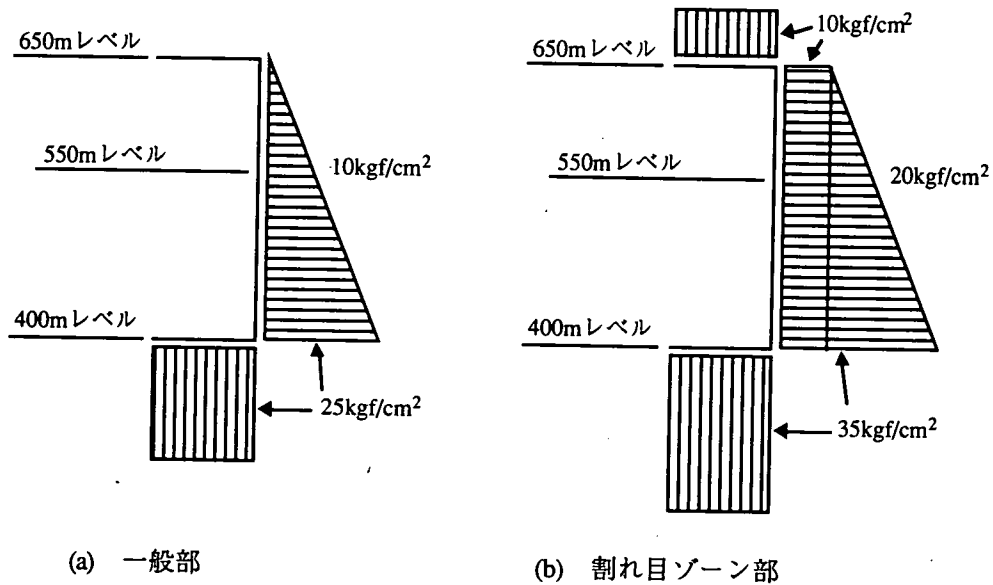


図-6.2.8 定水位境界模式図

6.3 等価不均質連続体モデルの作成

6.3.1 モデル作成手順

図-6.3.1にモデルの作成フローを示す。まず、4章で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する。特に、ボーリング孔および坑道と交差する亀裂については、原位置で得られた亀裂の位置・方向・開口幅を決定論的に与える（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する。

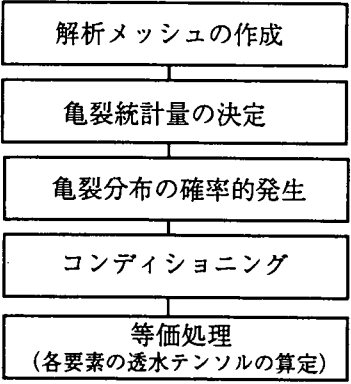


図-6.3.1 等価不均質連続体モデルの作成手順

6.3.2 亀裂分布の発生

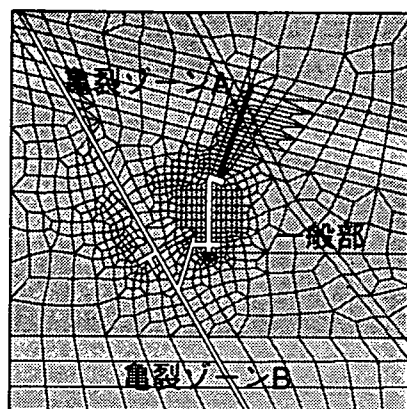
4章で決定した亀裂の統計分布パラメータを表-6.3.1に示す。亀裂分布の発生では、割れ目ゾーン部とその外部（一般部）での亀裂分布特性の違い（水理開口幅と直径の平均値が割れ目ゾーン部で大きい）を反映し、さらに、ボーリング孔や坑道で観察された亀裂を決定論的に加えた（コンディショニング）。

表-6.3.1 亀裂の統計分布パラメータ

	割れ目ゾーン部	一般部	分布関数
一次元亀裂密度(1/m)	0.47		ポアソン分布
平均幾何開口幅(mm)	3.1		負の指数分布
平均水理開口幅 (mm)	0.08	0.03	負の指数分布
平均亀裂半径 (m)	8	5	負の指数分布
三次元亀裂密度(1/m ³)	1.30×10^{-3}	1.38×10^{-3}	ポアソン分布

不均一モデル

コンディショニング



亀裂ゾーン部と一般部の亀裂
分布特性の違いを反映

ボーリング孔・坑道との
交差部では、観察された
亀裂を決定論的に発生

図-6.3.2 作成した亀裂分布モデル

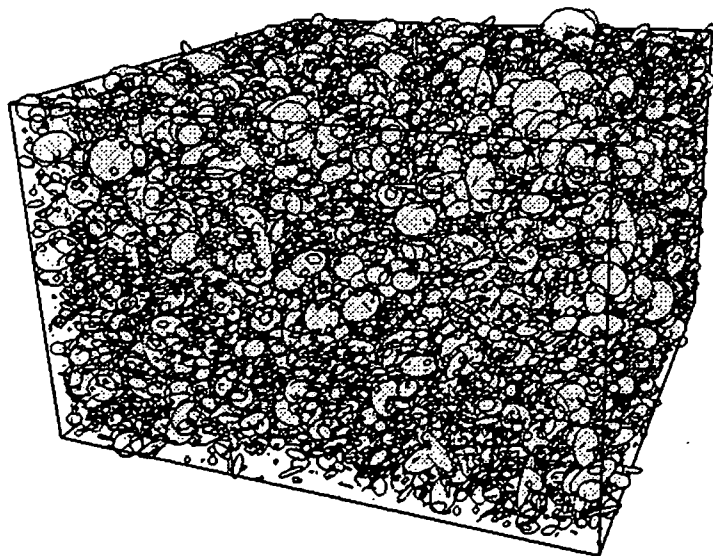


図-6.3.3 発生した亀裂分布の一例

6.3.3 コンディショニング

坑道やボーリング孔と交差する亀裂については、既知情報（位置・方向・開口幅）が得られている場合がある。コンディショニングとは、確率的に発生した亀裂群に対して、上記の既知情報を決定論的に組み込む手法である（図-6.3.4）。

手順としては、確率的に発生した亀裂のうち、坑道やボーリング孔と交差する亀裂をランダムに抜き出し、ボーリング孔・坑道と交差する各亀裂の交差位置・方向・開口幅を満足するように亀裂を移動する。ただし、亀裂中心位置は一意には決まらず、乱数により決定する（図-6.3.5）。

今回は、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-6.3.6）。

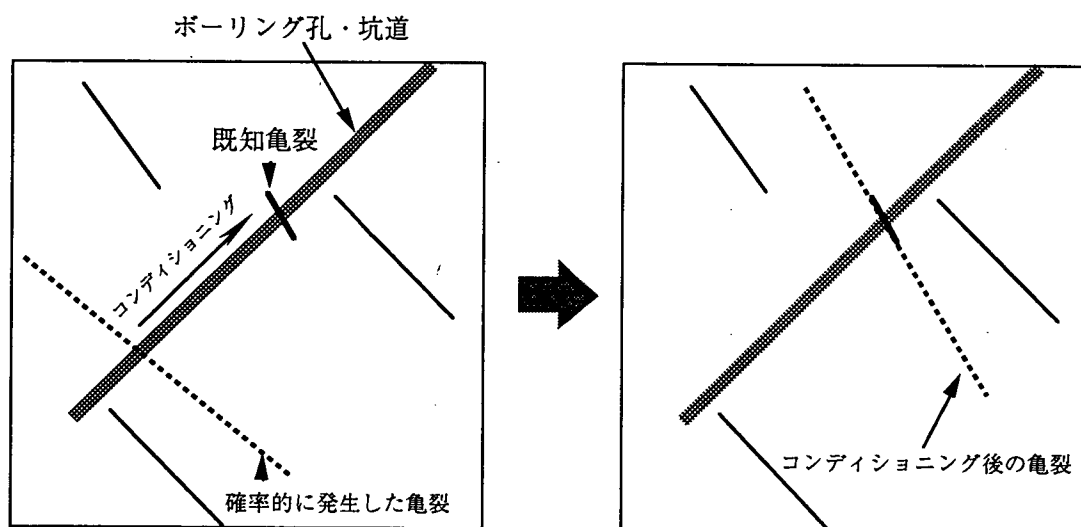


図-6.3.4 亀裂分布のコンディショニング

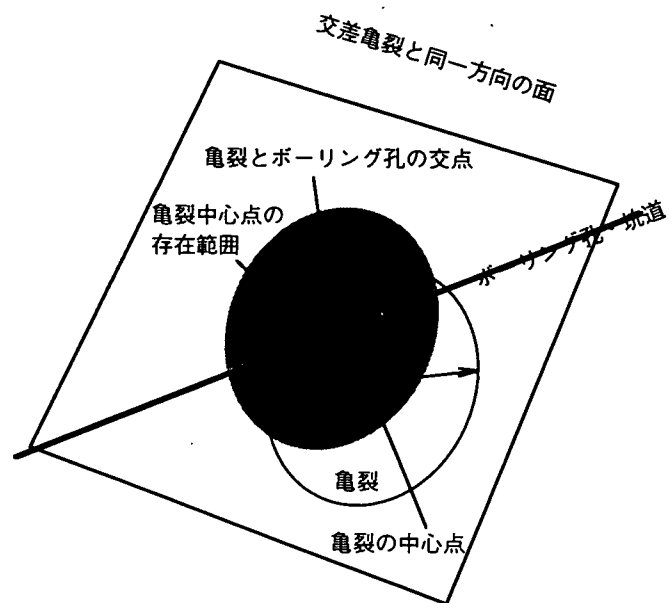


図-6.3.5 コンディショニング時の亀裂中心点の存在範囲
(中心点位置は、網掛けの範囲内で乱数により決定)

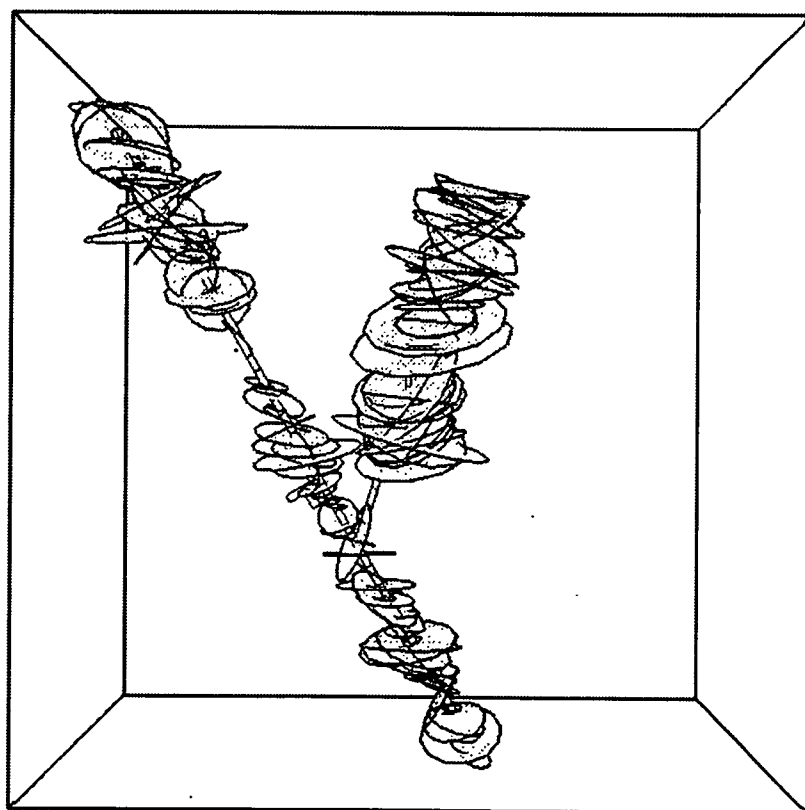


図-6.3.6 コンディショニングにより得られた亀裂分布
(コンディショニングした亀裂のみを表示)

6.3.4 モデル作成結果

等価不均質連続体モデルの作成結果を図-6.3.7に示す。

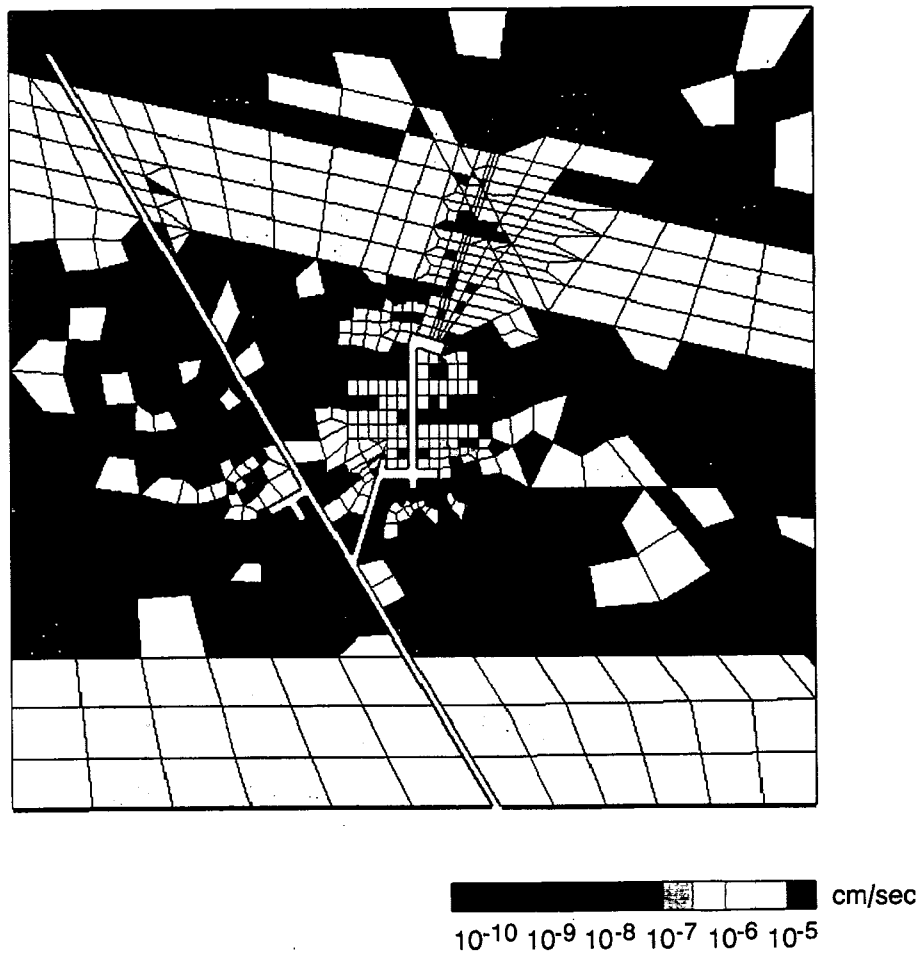


図-6.3.7 等価不均質連続体モデルの平均透水係数分布
(標高550-mレベル断面)

6.4 定常3次元浸透流解析

6.4.1 解析手法

解析は3次元飽和浸透流解析による定常解析により行った。定常3次元飽和浸透流解析の支配方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial(\psi+z)}{\partial z}\right)=0$$

ここに、 K は透水係数 (cm/s)、 ψ は圧力水頭である。

6.4.2 解析メッシュ

解析メッシュの鳥瞰図を図-6.4.2に示す。解析メッシュの総節点数は22315、総要素数は21157である。割れ目ゾーンに関しては、リニアメントで得られた割れ目ゾーンA（高間隙水圧帯）とBならびに沢部をメッシュに反映させている（図-6.4.1）。

6.4.3 解析条件

解析条件を表-6.4.1に示す。各ケースとも解析領域の境界面の境界条件は定水位とし、坑道壁面は間隙水圧0の境界とした。透水係数は、6.3節で作成した等価不均質連続体モデルの透水係数分布を用いた。ただし、本モデルでは乱数初期値の影響を受けるので、乱数初期値を変えた3ケースのリアライゼーションについて解析した。

表-6.4.1 解析条件

解析モデル	境界条件 (kgf/cm ²)		透水係数分布
	割れ目ゾーンA	その他の部分	
等価不均質連続体モデル	20	10	6.2節参照

*) 境界条件は標高550mでの水圧

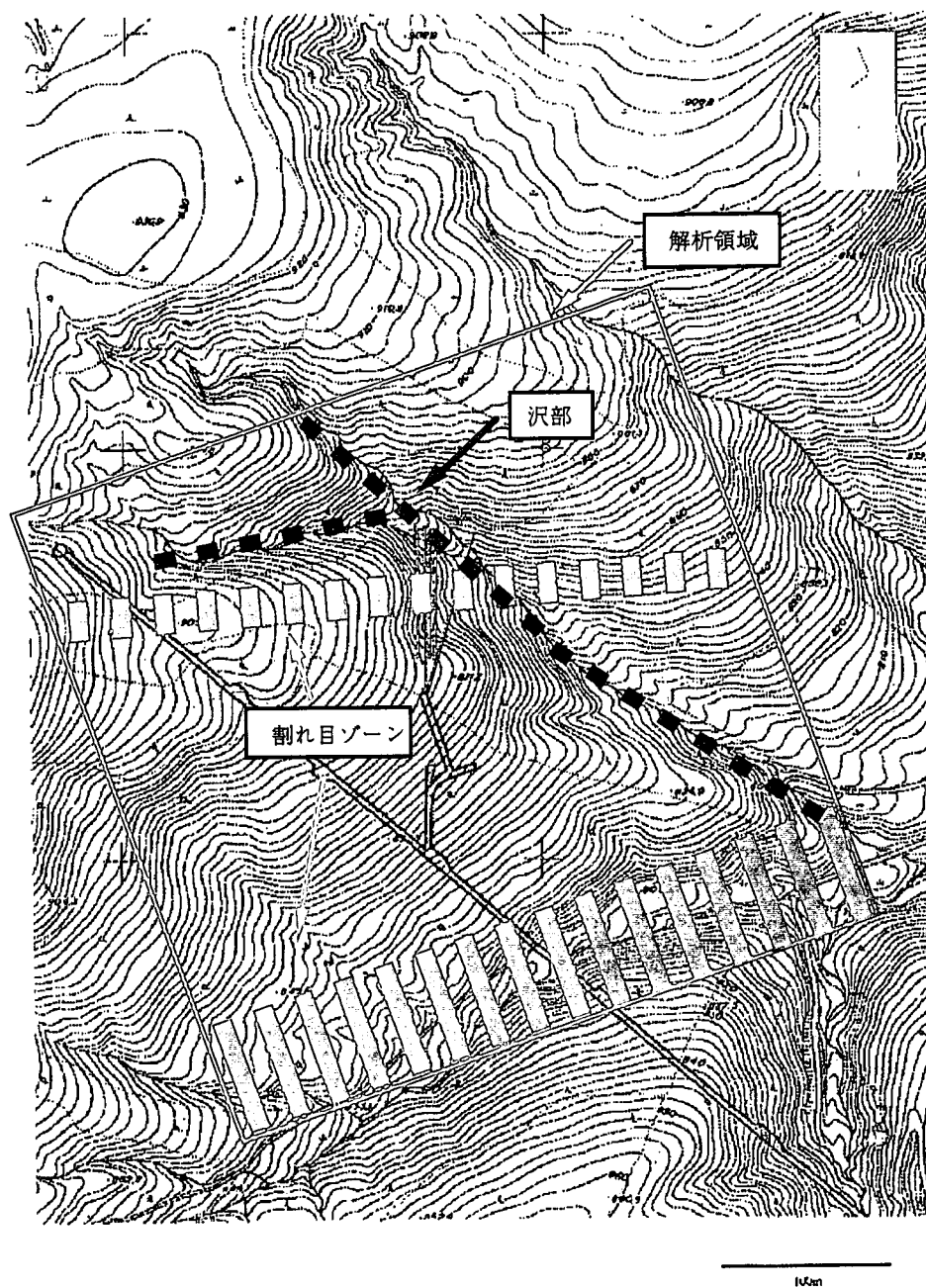


図-6.4.1 解析メッシュで考慮した地形・地質（平面図）

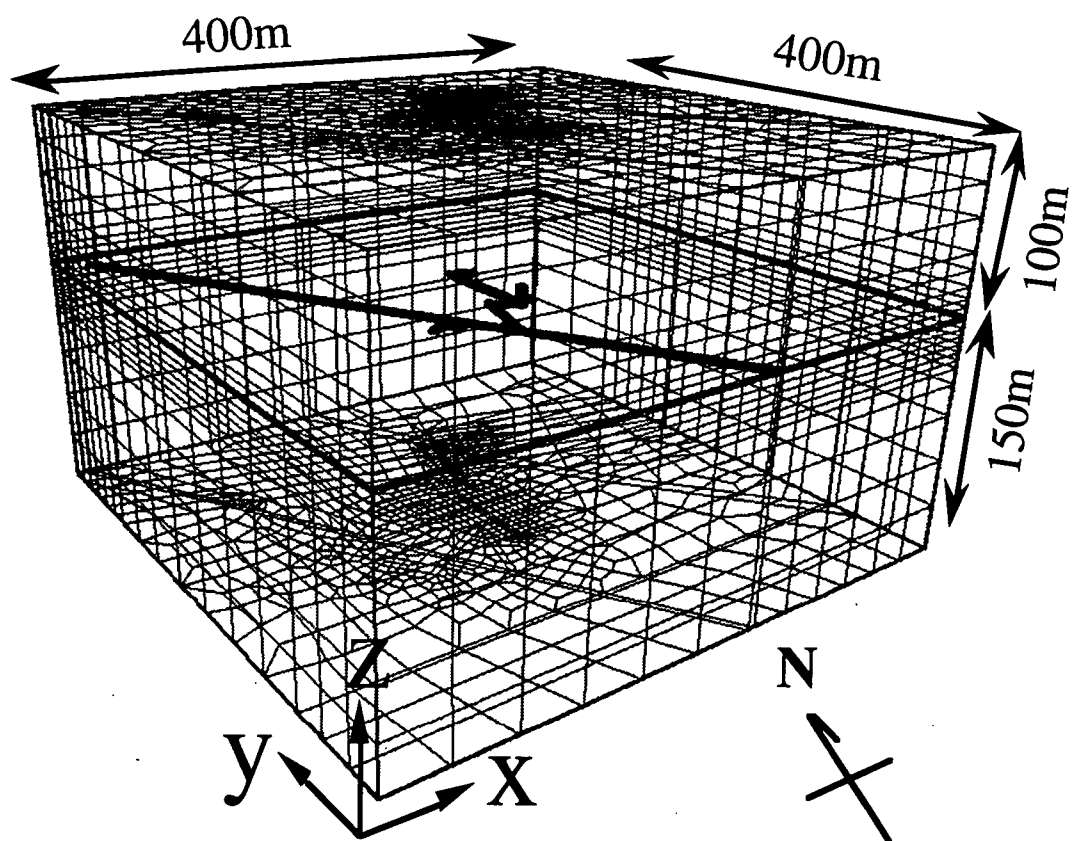


図-6.4.2 解析メッシュ鳥瞰図

6.4.4 解析結果

(1) 解析領域全般の水理状況

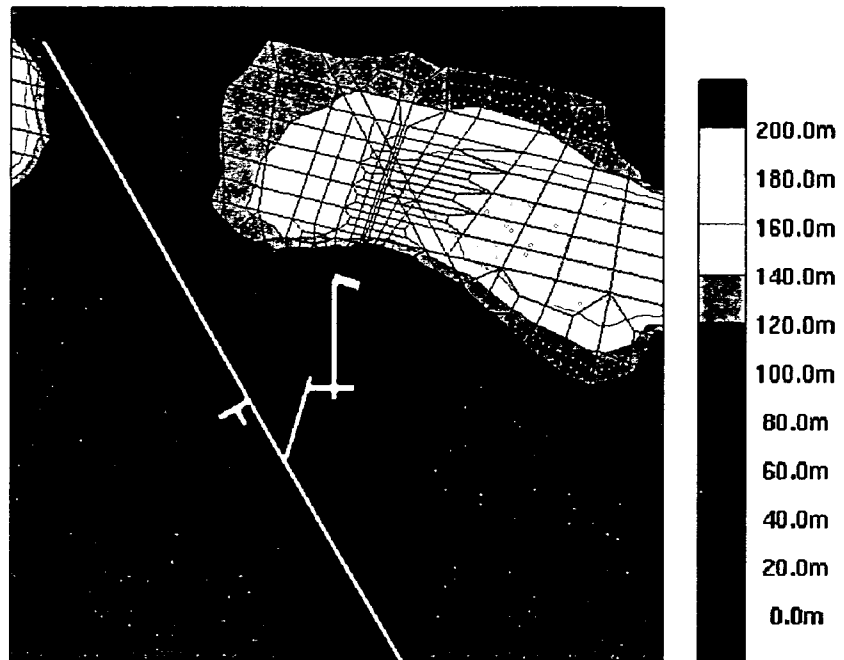
550 mレベルにおける間隙水圧分布と流速ベクトル解析結果を図-6.4.3に示す。水理状況の特徴をまとめると以下のようである。

- ・ 亀裂分布により与えた透水異方性により、東西方向の流れが卓越する。
- ・ KD-90坑道周辺には広い範囲の水圧低下域が認められる。
- ・ KD-90坑道北側で境界条件として与えた高水圧は、割れ目ゾーンに沿って東西方向へ伝達されるが、その西側では坑道の影響により低下する。
- ・ NW坑道奥（北側）の割れ目ゾーンと交差する地点では湧水が多い。

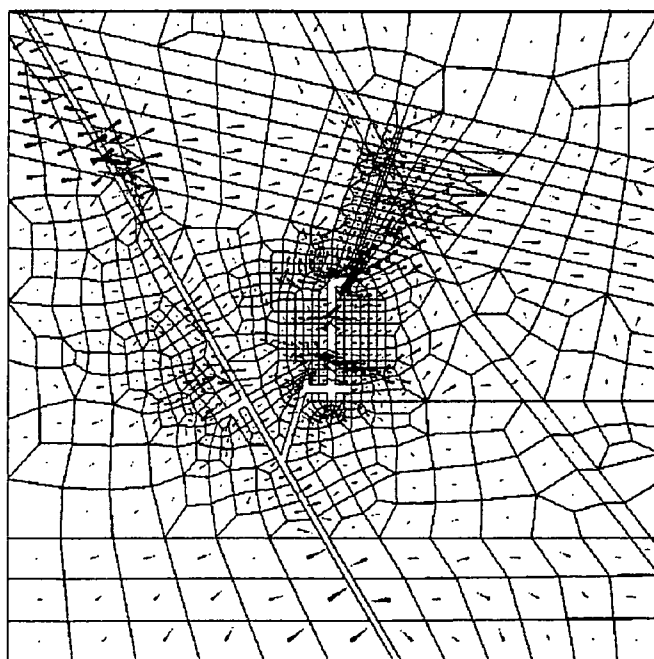
(2) 試錐孔内の間隙水圧分布

KD-90坑道周辺に位置するKH-11孔と、高間隙水圧帯内部に位置するKH-19孔における間隙水圧の計算値と実測値の比較を図-6.4.4と図-6.4.5に示す。比較のため、同図中には、前年度に実施した不均一異方性の多孔質媒体モデル（ゾーンモデル）の結果を併せて示した。

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-6.4.4(a)）、解析結果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。

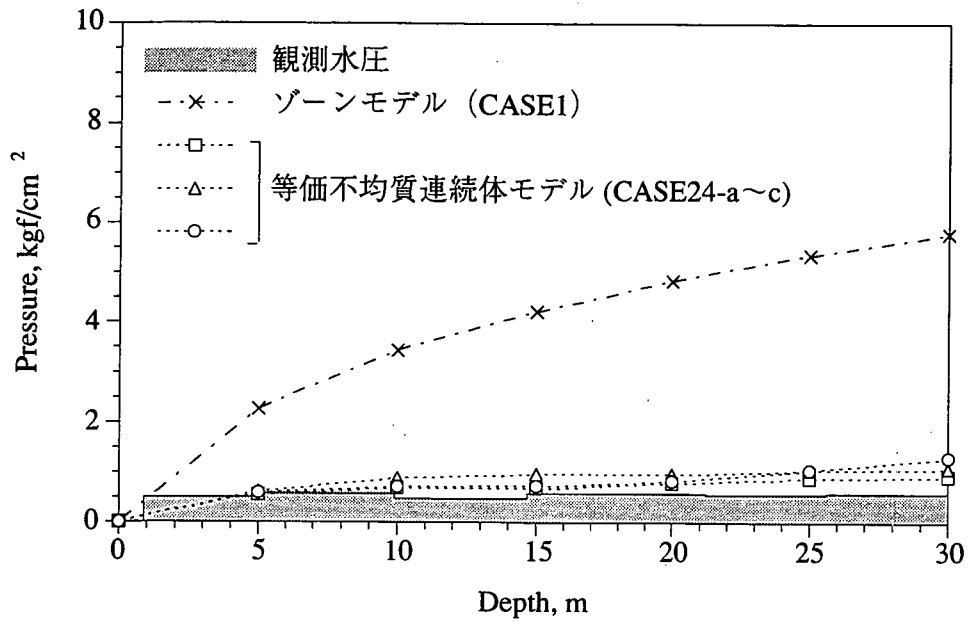


(a) 間隙水圧分布

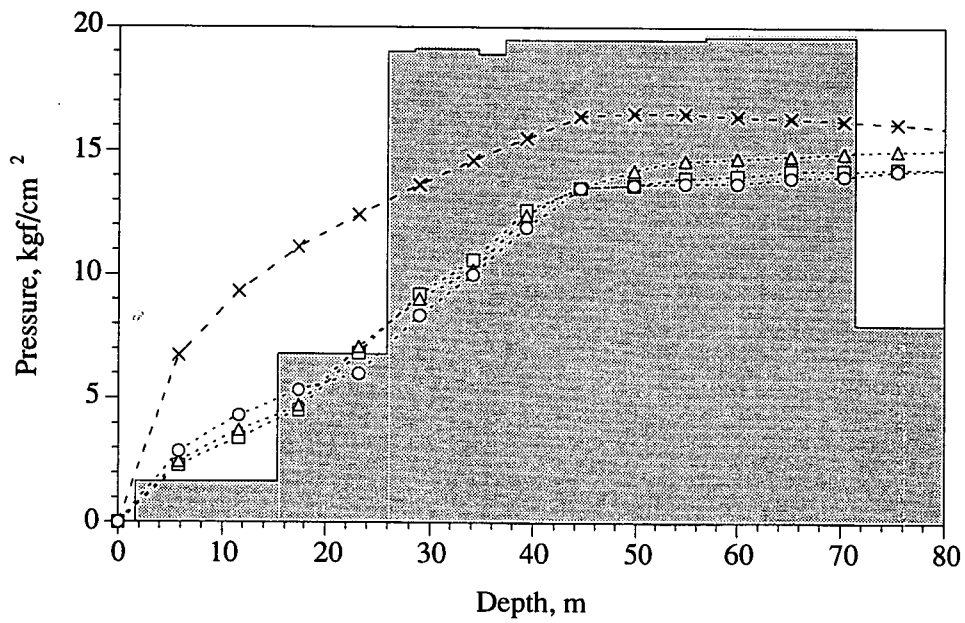


(b) 流速ベクトル分布

図-6.4.3 順解析結果（標高550mでの分布）



(a) KH-11孔 (KD-90坑道周辺)



(b) KH-19孔 (高水圧帯内部)

図-6.4.4 間隙水圧の実測値と解析結果
(割れ目ゾーンモデルと等価不均質連続体モデルの比較)

6.5 逆解析による3次元透水係数分布の推定

6.5.1 逆解析手法

逆解析のフローを図-6.5.1に示す。逆解析で最小化する目的関数としては、

$$J = \frac{1}{\sigma_\phi^2} \sum_{j=1}^{N_\phi} \|\phi_j^{\text{cal}} - \phi_j^{\text{obs}}\|^2 + \frac{1}{\sigma_q^2} \sum_{j=1}^{N_q} \|q_j^{\text{cal}} - q_j^{\text{obs}}\|^2$$

を用い、Jが小さくなるように、繰り返し計算で透水係数分布を求めた。上式の右辺は、水圧値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。

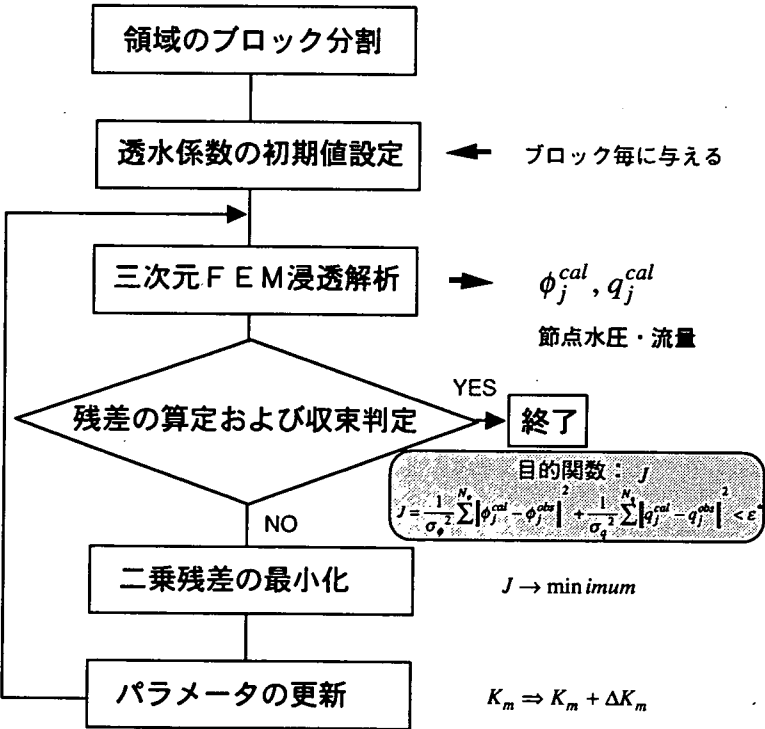


図-6.5.1 逆解析フロー

6.5.2 逆解析の初期モデル

逆解析は、亀裂発生時の乱数初期値を変えた3ケースについて各々行う。ここで、各要素の透水係数を全て未知数とすると観測データが不足するため、割れ目ゾーン部と一般部毎に、透水係数により $10^{-3} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ の間の6段階（対数）で要素をグルーピングし、各グループの透水係数を未知数とした。つまり、等価不均質連続体モデルでは、2ゾーン×6グループ=12の透水係数を未知数とした。

6.5.3 逆解析に用いた観測データ

逆解析において既知量として用いた流量・水圧データに関して以下に述べる。

(流量)

流量に関しては、NW坑道の2つの堰（No.1とNo.3）における流量データ（図-6.5.3）と亀裂からの滴水量データ（図-6.5.2）を用いた。亀裂からの滴水量の分布を見ると、明らかに割れ目ゾーン部で多量の湧水が観測されていることが分かる。一方、堰流量では、堰の設置地点が2地点と少ないため、湧水の不均一性を表せない。そこで、亀裂からの滴水量を割れ目ゾーンA、Bとその他の部分に分けて積算し、その量比で堰流量を表-6.5.1に示す区間に振り分けることにした。そのようにして設定した区間流量を図-6.5.3中の実線で示す。実際の逆解析では、坑道の区間流量を次式を満足するように各節点に振り分けた。

$$Q = \sum q_i \quad (6.5.1)$$

ここに、 Q ：坑道区間流量、 q_i ：区間に含まれる*i*番目の節点流量である。

表-6.5.1 坑道区間と湧水量の設定

	区間範囲 (m)	区間流量(m ³ /day)	節点数
区間 1	300～365	54	24
区間 2	365～505	17	96
区間 3	505～620	0.7	80
区間 4	620～710	118	56
合計	300～710	189.7	256

* 区間範囲は、NW坑道起点からの距離

(水圧)

水圧に関しては、KD-90坑道周辺とアクセス坑道周辺のボーリング孔（KH-4, 6, 8, 10孔～21, 23孔）の間隙水圧データを用いた。これらのデータは、パッカーで遮水した孔内区間の水圧である。これらの水圧のメッシュ上の対応する位置の節点に与えた。既知水圧節点数は130となった。

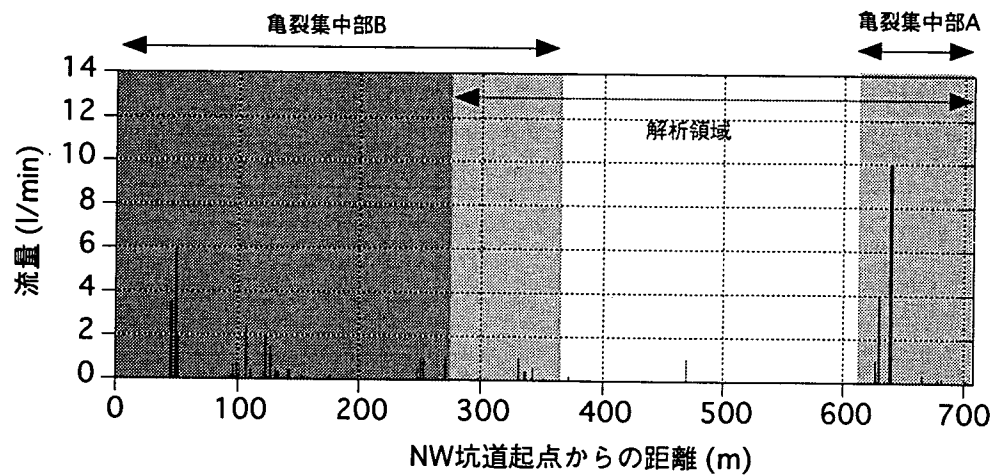


図-6.5.2 亀裂滴水量の分布 (NW坑道)

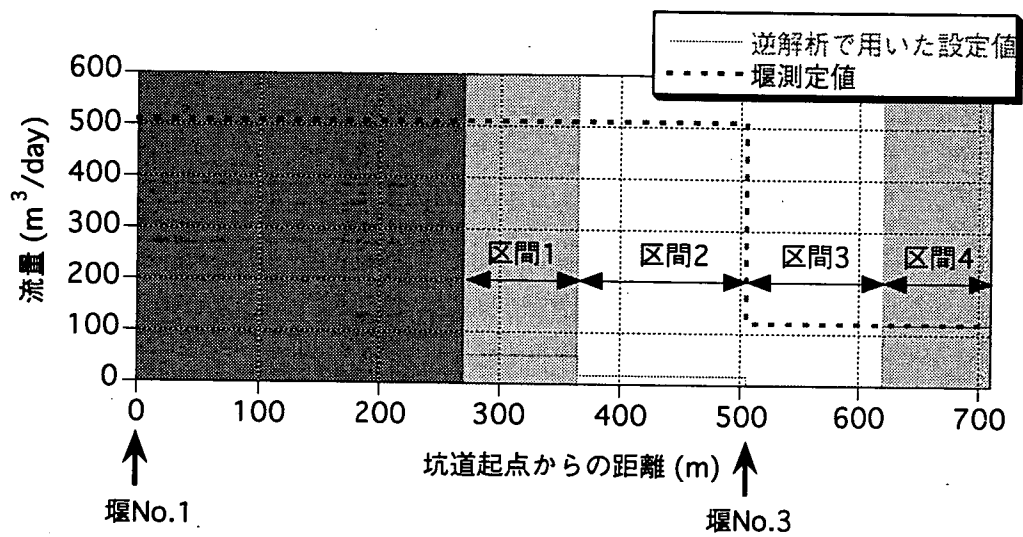


図-6.5.3 NW坑道の堰流量と逆解析の設定流量

6.5.4 逆解析結果

(1) 透水係数の変化

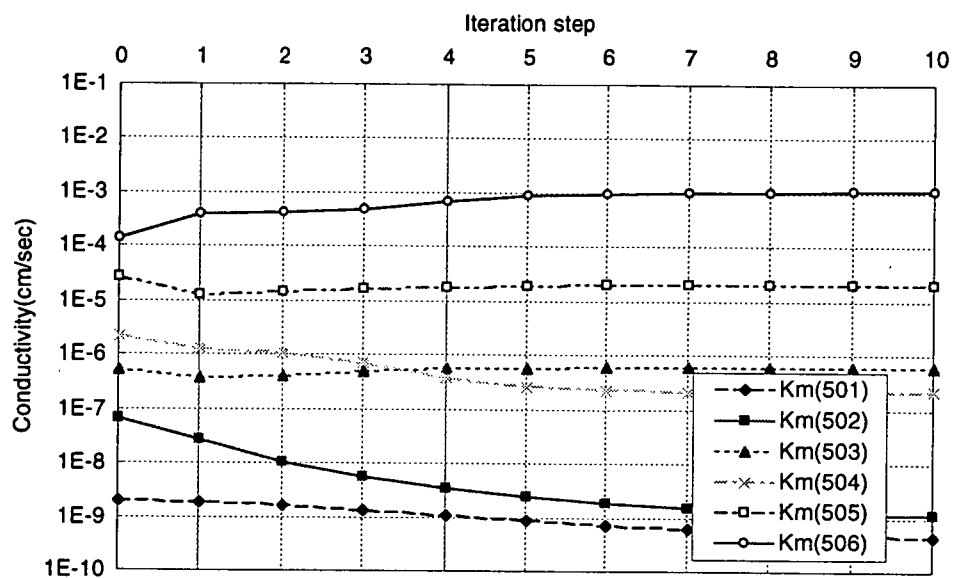
要素の体積が大きくなるに従い、透水係数のバラツキが小さくなり、体積が5000m³程度よりも大きい要素では、ほとんどの透水係数が2オーダー程度の範囲に入っている。従って、大きな体積の要素の殆どは4つの透水係数グループ（一般部の503、504および割れ目ゾーン部の510、511）に属している。

逆解析に伴う透水係数の変化を図-6.5.4に示す。この図から、透水係数の大きいあるいは小さいグループの動きが大きいことが分かる。坑道から離れるほどメッシュが粗くなっているため、坑道から離れた（情報の少ない）地点の透水係数が平均的（均一的）に評価されたことにより、坑道近傍の小さな要素の透水係数が変化する結果となったものと考えられる。

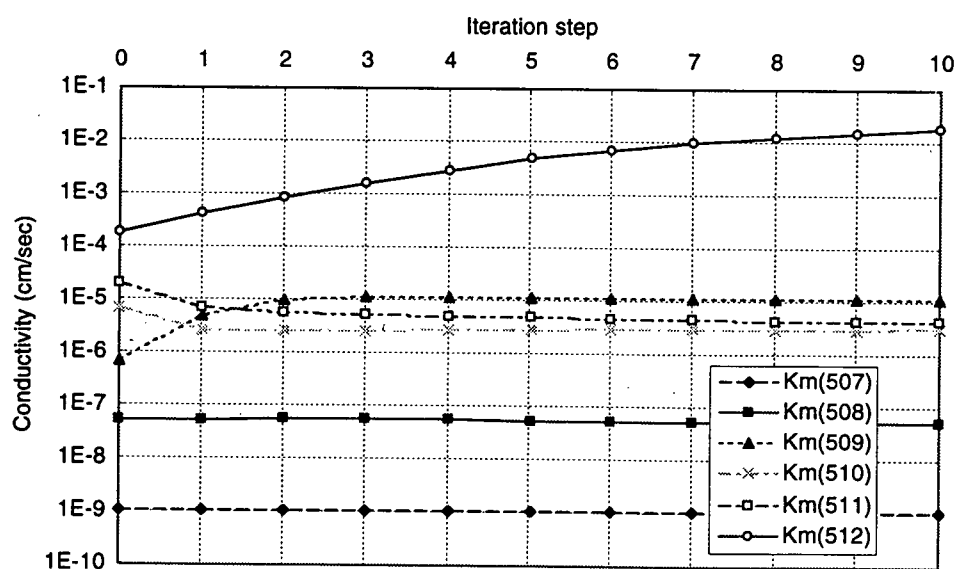
(2) 坑道区間湧水量と孔内水圧の変化

水圧値については、割れ目ゾーンモデル、等価不均質連続体モデルとも大きな改善はなかった。孔内水圧の標準誤差の変化を図-6.5.5に示すが、最初の5ステップ以降、明瞭な変化は見られない。水圧と流量の各々の自乗誤差の和を目的関数としているが、両者の重みづけを変化させても同様であった。一般に、流量は透水係数の絶対値により変化するのに対して、水圧分布は透水係数の相対的な不均質性により大きく左右される。今回の逆解析では、不均質性を固定（グルーピングにより透水係数の分布パターンを固定）しているために、水圧を合わせることは難しい。

一方、坑道内湧水量については大きな改善が見られた。図-6.5.6は、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。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おり、節点湧水量分布を見ると湧水量の不均質な分布がある程度表現されているのが分かる。

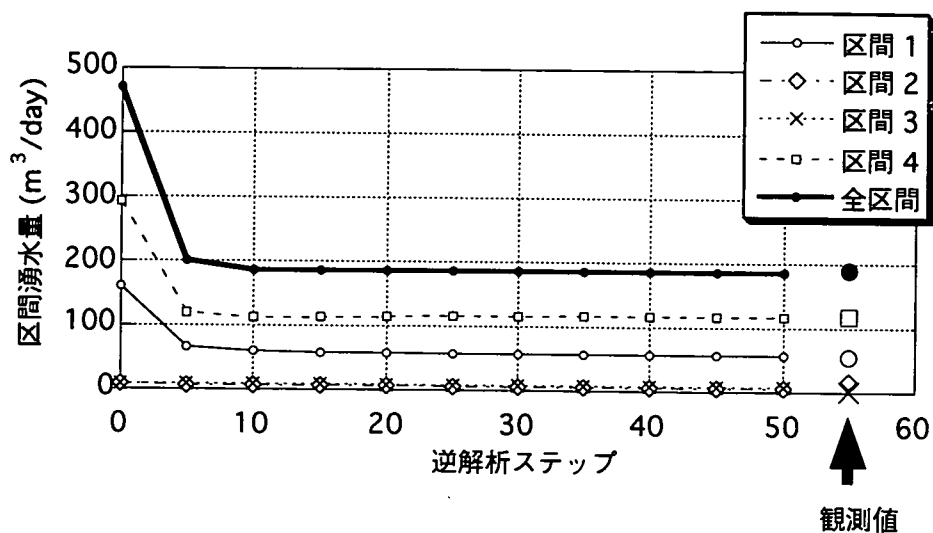


(a) 一般部

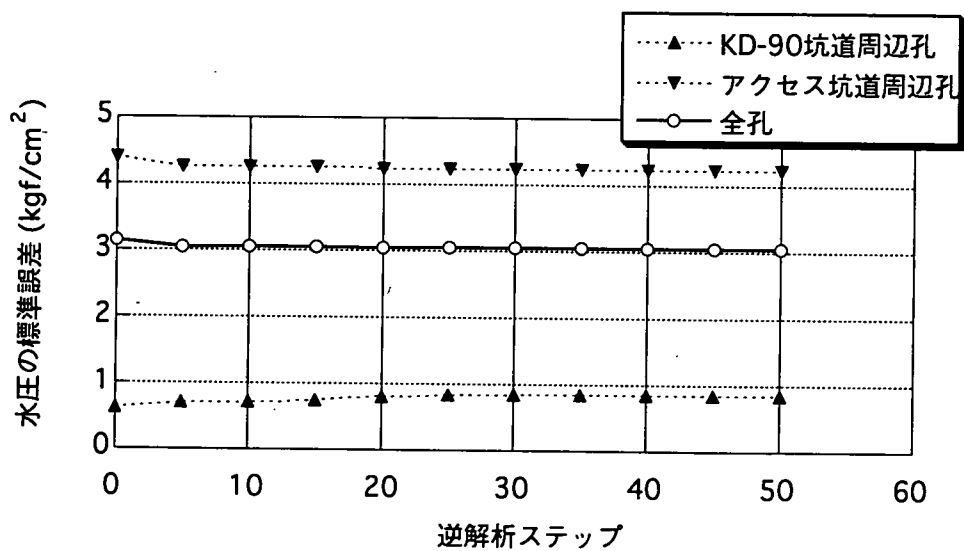


(b) 割れ目ゾーン部

図-6.5.4 逆解析ステップに伴う透水係数変化
(等価不均質連続体モデル)

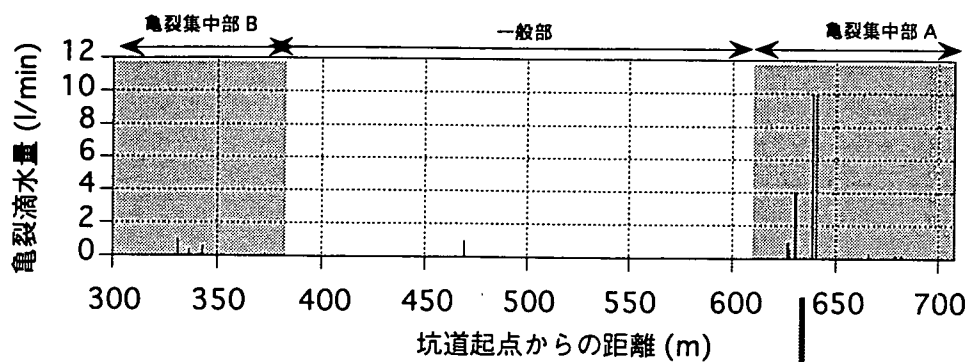


(a) 区間湧水量の変化

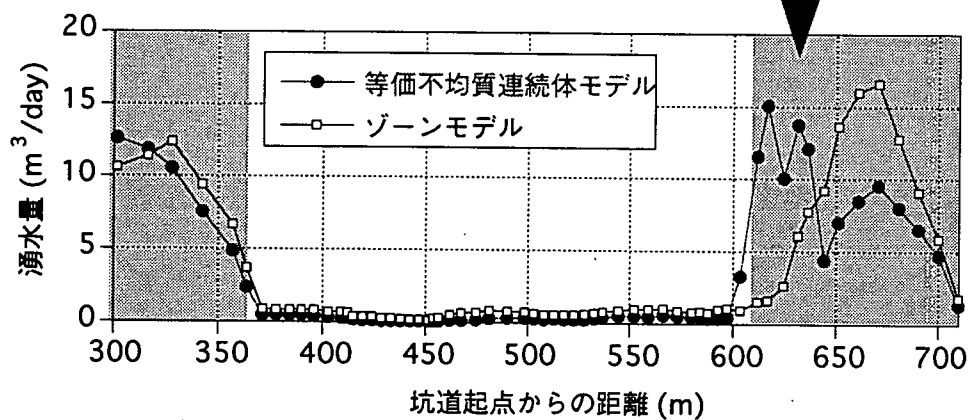


(b) 孔内水圧の標準誤差の変化

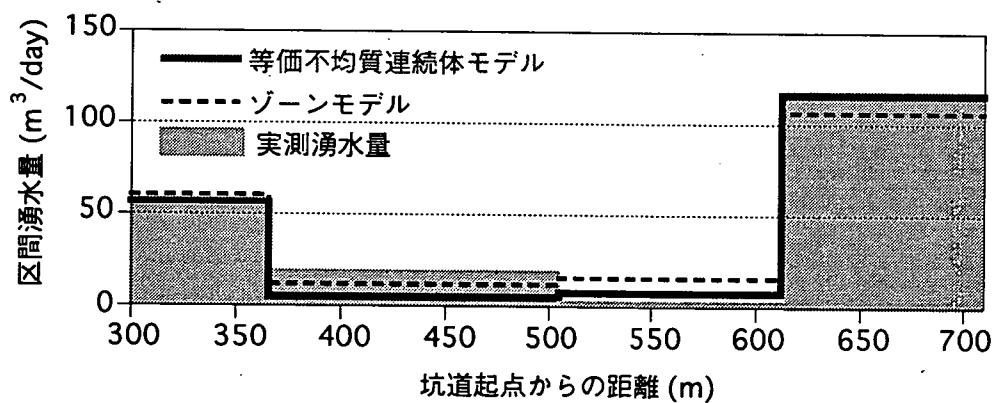
図-6.5.5 逆解析の更新過程に伴う、湧水量・水圧の変化



(a) 亀裂からの滴水の分布



(b) 逆解析後の計算流量の分布



(c) 逆解析後の区間流量の実測と計算値の比較

図-6.5.6 NW坑道湧水量 (シミュレーションと実測の比較)

7 まとめと考察

(1) 不連続体モデルと等価不均質連続体モデルにおけるスケール効果の検討

不連続体モデルと等価不均質連続体モデルによる浸透解析を、釜石鉱山内の原位置データから作成した亀裂モデルで行い、解析領域の大きさを変化させることにより透水係数のスケール効果を調べた。また、等価不均質連続体モデルについては、同モデル固有の問題となるメッシュサイズの影響も併せて検討した。

その結果、以下のことが分かった。

- ・不連続体モデルと等価不均質連続体モデルの等価透水係数は、解析領域の大きさを一辺40m程度とすると、標準偏差に関してほぼ一致した。平均値については不連続性の効果により、前者の値が2倍程度低くなった。
- ・不連続体モデルでは、解析領域の大きさによらずほぼ一定の平均透水係数が得られた。これに対し、等価不均質連続体モデルでは、メッシュサイズを2mまで小さくすると、解析領域の縮小とともに平均値が減少する傾向が見られた。
- ・等価不均質連続体モデルでは、メッシュサイズを大きくすると、不連続体モデルに比べて透水係数の標準偏差が小さくなる傾向が見られた。
- ・いずれのモデルにおいても、一辺40m程度の領域をとると透水係数の標準偏差は0.3程度にまで収束した。これは、KD-90坑道の亀裂解析、あるいは坑道規模透水試験から評価されたREVの大きさとほぼ対応する。

(2) 亀裂パラメータを変化させた感度解析

亀裂の平均開口幅、平均直径、密度を変化させた透水試験のシミュレーションを行い、透水係数分布の変化を調べた。その結果、透水係数の平均値は平均開口幅と密度により影響され、分散は平均直径と密度により変化することが明らかとなった。また、透水係数の分散の平均直径の変化に対する感度は、密度が高いほど小さくなる。

(3) KF-1、KF-2孔の透水試験のシミュレーション

平成8年度以降に得られたKF-1孔とKF-2孔の水理試験（流量検層）による透水係数分布と透水試験のシミュレーション結果を比較した。KF-1孔の透水係数は、一般部に位置するKF-2孔に比べて平均値、標準偏差ともに大きく、前者の亀裂直径と平均開口幅とともに2倍程度大きくすると、シミュレーション結果が実測結果とよく一致す

る。なお、KF-1孔とKF-2孔は、各々、割れ目ゾーンと一般部の内部に位置していることから、本解析においては各々の代表値として用いた。

(4) 解析モデルの改良

平成7年度に作成した解析モデルを以下の点で見直し、モデルの信頼度の向上をはかった。

(a) 亀裂統計量の見直し

- ・ 亀裂の方位分布については、方位分布のバラツキを等方性とした前回のFisherモデルから、異方性を考慮したBinghamモデルに変更した。
- ・ 亀裂の直径分布について、前回は、坑道のトレース長さから決定する方法と直径と開口幅の相関性を仮定する方法を用いていた。今回は、さらにモデルの精度を向上させるため、実測の透水係数分布をよく再現する平均直径を数値シミュレーションにより決定した。シミュレーション結果は、実測の透水係数分布をかなりよく再現している。今回の方法は、水理学的な連続性を実測データから確認しているため、水理モデル化に有効であると考えられる。

(b) 割れ目ゾーン部の厚さ、位置、透水性の見直し

前回の解析ではアクセス坑道北側の割れ目ゾーンの北限が若干南側にずれていたため、割れ目ゾーンの北限を北側へ5 m程度移動した。また、透水性に関しては、(3)に述べたKF-1孔、KF-2孔の透水試験データを反映した。

(5) 改良した解析モデルによる浸透解析結果

改良した解析モデルによる浸透解析結果から得られた水理状況の特徴をまとめると以下のようである。

- ・ 亀裂分布により与えた透水異方性により、東西方向の流れが卓越する傾向が見られる。
- ・ KD-90坑道北側で境界条件として与えた高水圧は、割れ目ゾーンに沿って東西方向へ伝達されるが、その西側では坑道の影響により低下する。KD-90坑道北側の高水圧は18kgf/cm²程度となり、前回よりも実測値に近い値が得られた。
- ・ NW坑道奥（北側）の割れ目ゾーンと交差する地点では湧水が多く、実際の湧水量分布をよく再現することができた。特に逆解析を用いることにより、坑道湧水

量に関しては定量的にかなり良い一致が見られた。

- ・ KD-90坑道周辺には広い範囲の水圧低下域が認められる。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従来の連続体モデルを用いて表現することは困難である。

8 おわりに

本報告書では、平成6、7年度の研究において得られた知見・課題並びに平成8年度以降に新たに得られた調査結果をふまえ、平成7年度の解析において使用した水理地質構造モデルの改良並びに不連続性岩盤に対する等価不均質連続体モデル化手法の適用性についての詳細な検討を行った。

一連の解析の結果、等価不均質連続体モデル化手法を原位置岩盤へ適用する上での一連の手順がほぼ確立され、モデル化手法の適用範囲についての知見が得られた。解析結果によれば、本手法を用いることにより、連続体モデルによっても実際の不均質な水理場（湧水量、水圧など）をかなり定量的なレベルで表しうることが示された。

今後は、本研究で得られた知見を、動力炉・核燃料開発事業団が今後実施される研究に反映していきたい。

参考文献

- Dershowitz, W. et al.: Fracture Code Cross-Verification Plan, Stripa Project, TR, 89-02, P.64, 1989.
- Kulatilake, P.H.S. and T.H. Wu : Estimation of Mean Trace Length of Discontinuities, Rock Mech. and Rock Eng. 17, 215-232, 1984.
- Long, J.C.S. et al.: Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resources Res., Vol.18, pp 645-658, 1982.
- Oda, M.: An Equivalent Continuum Model for Coupled Stress and Fluid Flow Analysis in Jointed Rock Masses, Water Resources Res., Vol.22(13), pp.1845-1856, 1986.
- Snow, D.T.: A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media, Ph. D. Thesis of Univ. Berkeley, 1965.
- Uchida, M. et al : Simulation of fracture flow to the Kamaishi validation drift, Highlevel radioactive waste management, pp.437-442, 1990.
- 下茂他：等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法, 大成建設技術研究所報, 第29号, pp.257-262, 1996.
- 内田他：釜石原位置試験場KH-7、KH-8孔間におけるトレーサー試験, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.181-186, 1994.
- 大西他：岩盤節理の幾何学的分布性状の推定に関する研究, 土木学会論文集, No. 499/III-28, pp. 59-68, 1994.
- 菊池他：節理分布の確率統計学的評価に基づく節理性岩盤のモデル化
- 白旗他：調査結果に基づく亀裂群の定量化と亀裂分布予測手法, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 283-288
- 長久他：釜石鉱山における深部地質環境特性調査（平成5年度）, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書, 日鉄鉱業株式会社, 1994.
- 動燃環境技術開発推進本部：3.釜石における原位置試験, 動燃技報、No.85, 1993.
- 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, 1991.