

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

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*

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

Groundwater Flow Analysis at Kamaishi Underground Test Site (H9)

Michito Shimo*, Hajime Yamamoto*

Abstract

The current study was performed in connection with the second phase of Kamaishi underground test project. Main goals of the study are (1) quantitative understanding of geohydrological environment around 550 m level test site and (2) evaluation of applicability of continuum modelling approaches for the semi-regional groundwater simulation in fractured rock masses. In H6 study, data on fracture geometry, hydraulic properties and pressure observation obtained in Kamaishi 1st. phase project were integrated for the use of the modelling. Groundwater flow simulation using a homogeneous continuum model was performed as a first step of the study. In H7 study, an Equivalent Heterogeneous Continuum (EHC) model, which was proposed by Shimo *et. al.* (1996), was employed for the simulation of the groundwater flow with in a 400m × 400m × 250m region containing major drifts and boreholes. Heterogeneous as well as an anisotropic conductivity profile was evaluated based on the fracture survey and injection test results. 3-D inverse analysis was also conducted for more quantitative parameter evaluation. It was demonstrated that (1) the EHC model is suitable for regional flow simulation in fractured rock masses because of its capability for taking fracture geometry information into account regardless of the number of fractures and also that (2) the EHC model can successfully reproduces the flow rate and pressure distribution observed at the Kamaishi test site. In H9 study, which is described in this report, the previous model was further updated using the information obtained in phase 2 project, such as fracture density in fractured zone. Sensitivity analysis, on fracture geometry (hydraulic aperture, fracture radius, and fracture density) vs. equivalent hydraulic conductivity, were performed and the scale effect on equivalent hydraulic conductivity was studied using both EHC and DFN (Discrete Fracture Network) models. It was shown that the size of REV, which is a size with unique average hydraulic conductivity, at Kamaishi 550m level site was evaluated as approximately 40 m from both models. Standard deviation of "equivalent conductivity", for a scale smaller than REV, may be evaluated with better accuracy using EHC approach by employing a smaller mesh size.

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

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) 亀裂方位の分布	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) 亀裂半径の分布	26
	(3) 水理学的開口幅	27
4.3	亀裂統計量のまとめ	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	亀裂パラメータの感度解析	34
5.2.1	平均半径の影響	34
5.2.2	平均開口幅の影響	36
5.2.3	一次元密度の影響	36
5.2.4	まとめ	39

6	等価不均質連続体モデルによる岩盤浸透流解析	
6.1	解析の概要	40
6.1.1	解析の全体フロー	40
6.1.2	平成7年度解析モデルの修正点	41
6.2	解析領域および境界条件の設定	42
6.2.1	解析領域の設定	42
6.2.2	解析領域のゾーニング	45
6.2.3	境界条件の設定	48
6.3	等価不均質連続体モデルの作成	49
6.3.1	モデル作成手順	49
6.3.2	亀裂分布の発生	49
6.3.3	コンディショニング	51
6.3.4	モデル作成結果	53
6.4	定常3次元浸透流解析	54
6.4.1	解析手法	54
6.4.2	解析メッシュ	54
6.4.3	解析条件	54
6.4.4	解析結果	58
6.5	逆解析による3次元透水係数分布の推定	63
6.5.1	逆解析手法	63
6.5.2	逆解析の初期モデル	63
6.5.3	逆解析に用いた観測データ	65
6.5.4	逆解析結果	67
7	まとめと考察	76
7.1	等価不均質連続体モデルがもつ特性に関する検討	76
7.2	解析モデルの改良	77
7.3	改良した解析モデルによる三次元岩盤浸透流解析	78
8	おわりに	80
	参考文献	81

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。

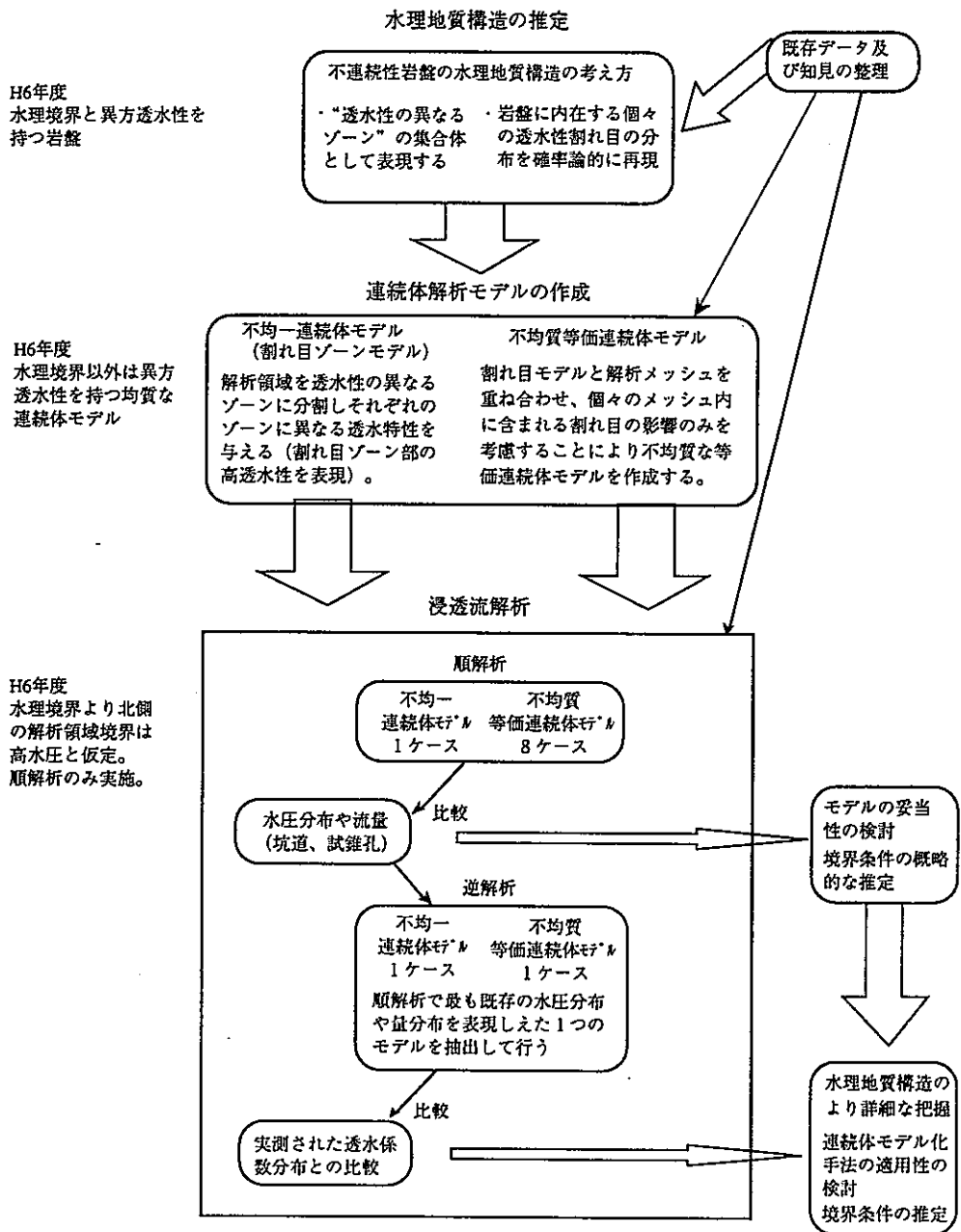


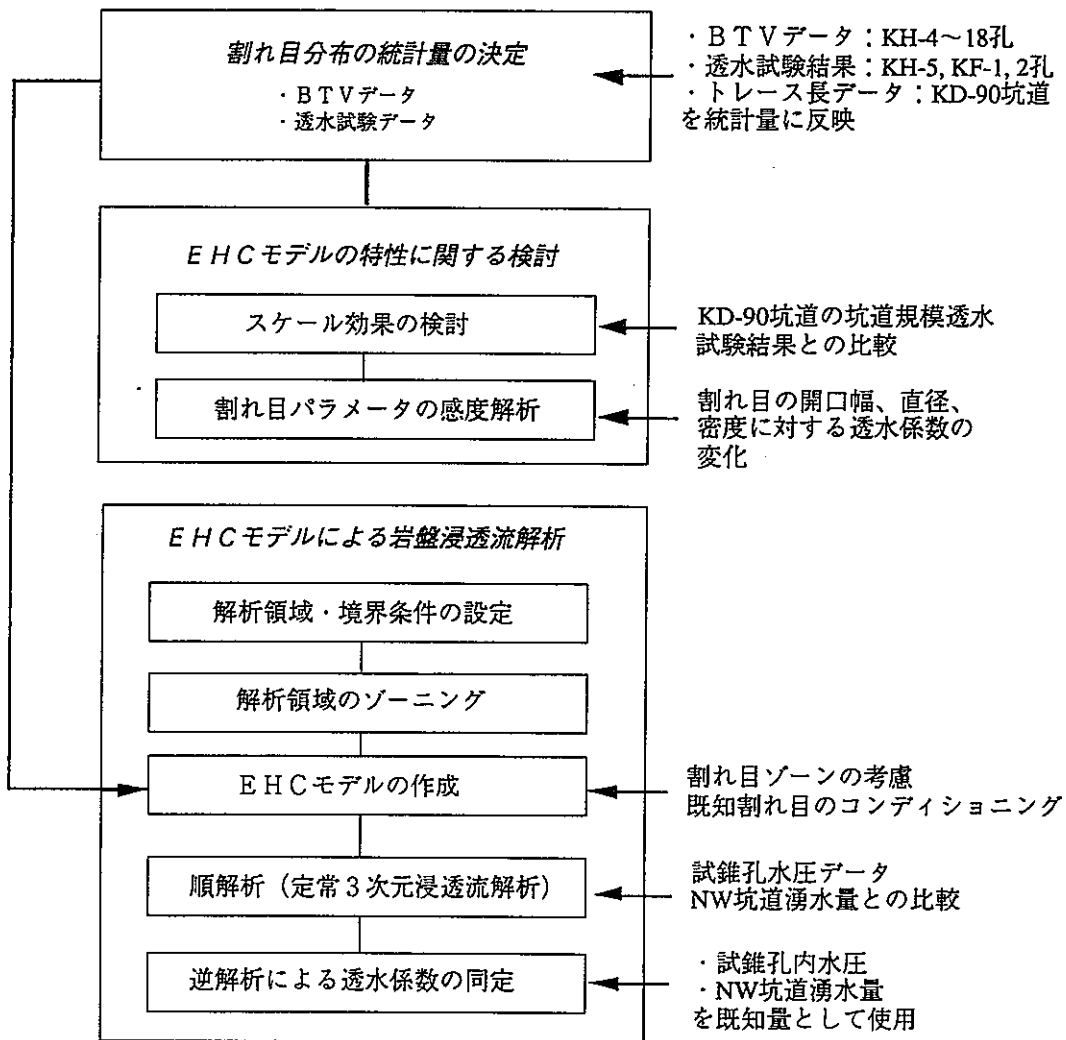
図-1.1.1 平成6年度、平成7年度の研究のフロー

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孔の流量検層データを追加し、特に割れ目ゾーン部の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。

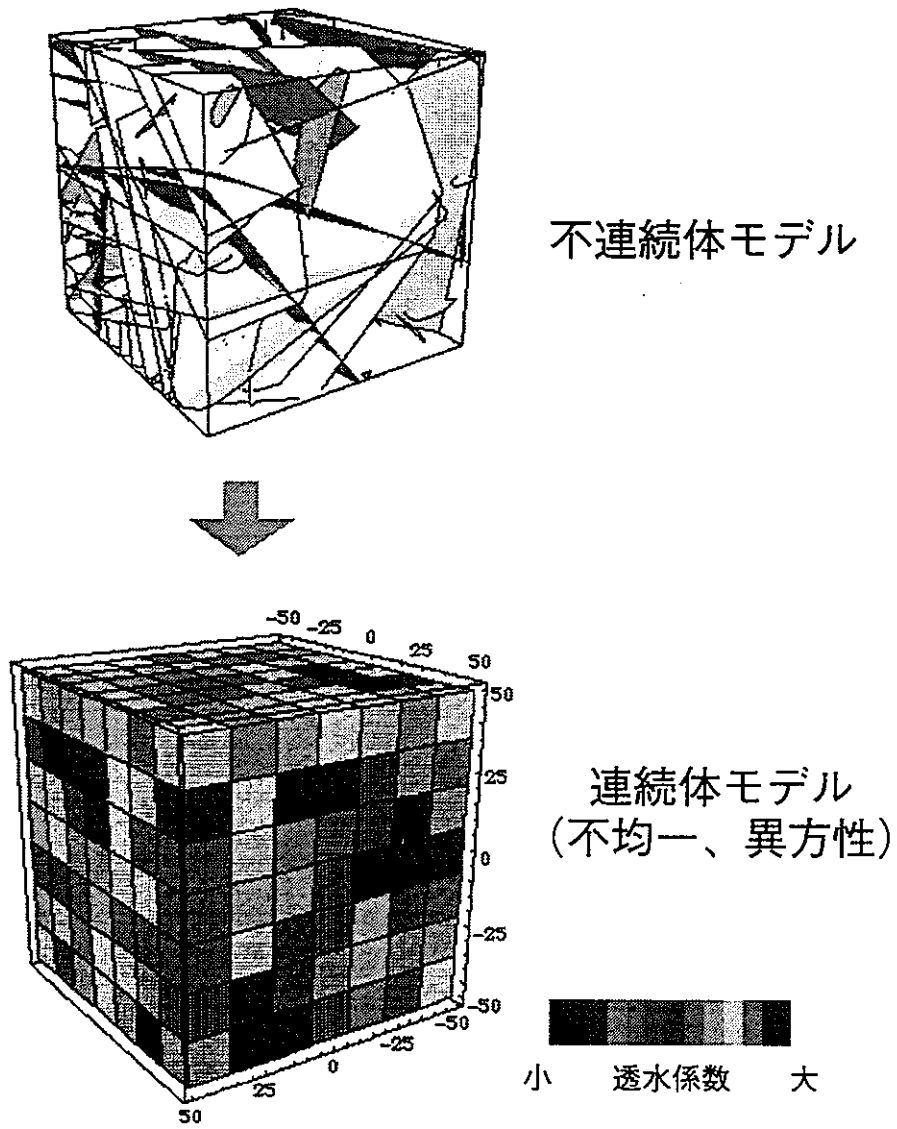


図-2.1.1 等価不均質不連続体モデル

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575m、地表面下約260m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、1993⁹⁾）。

鉱山内には多くの探鉱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）。既存の探鉱坑道（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。

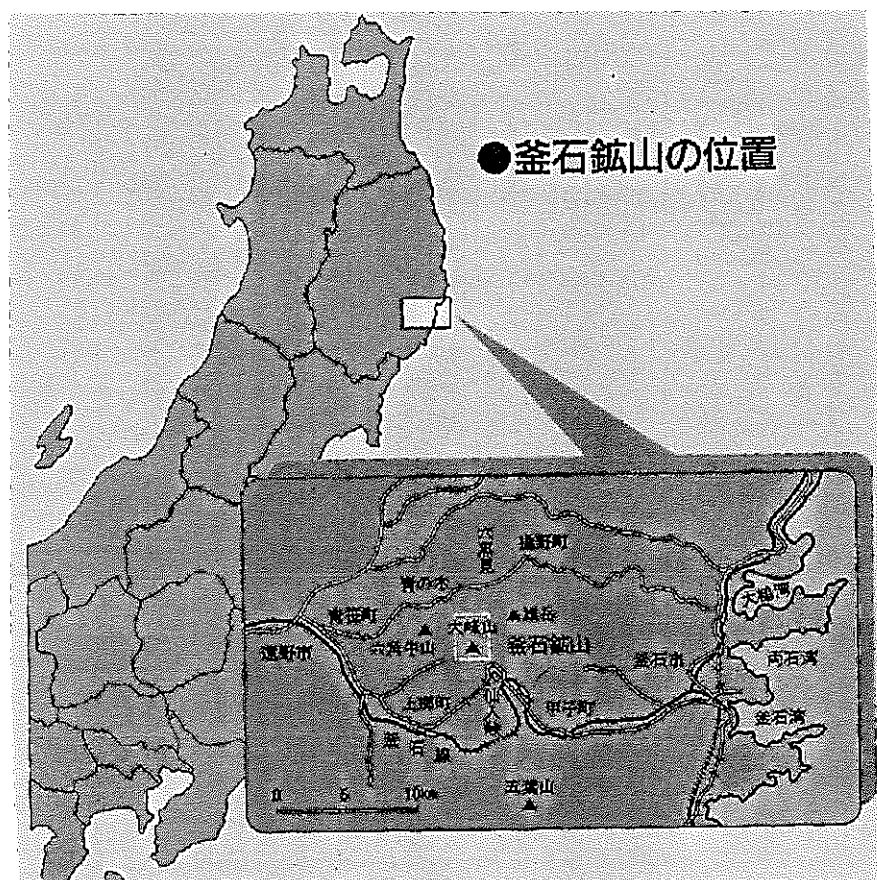
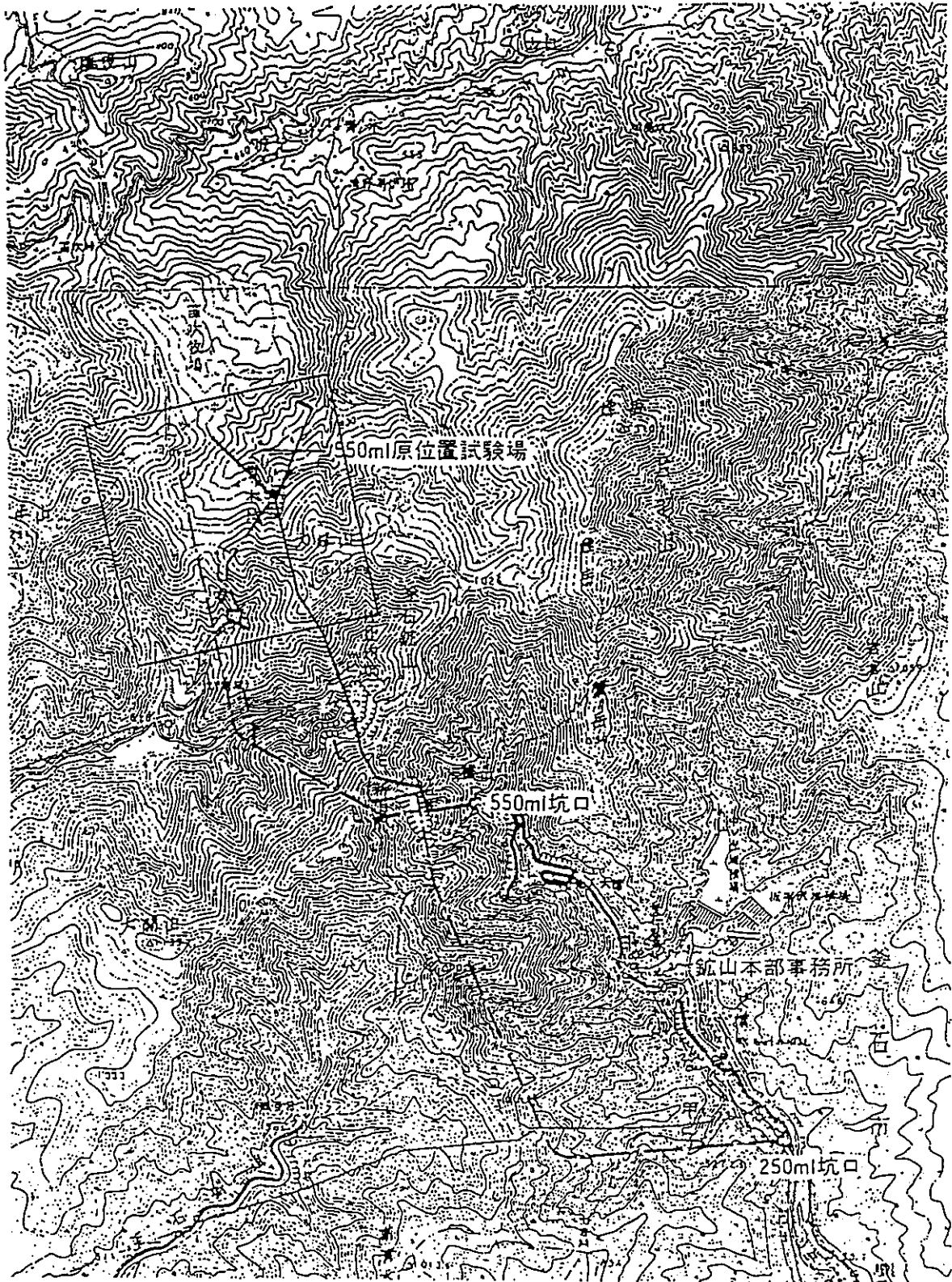


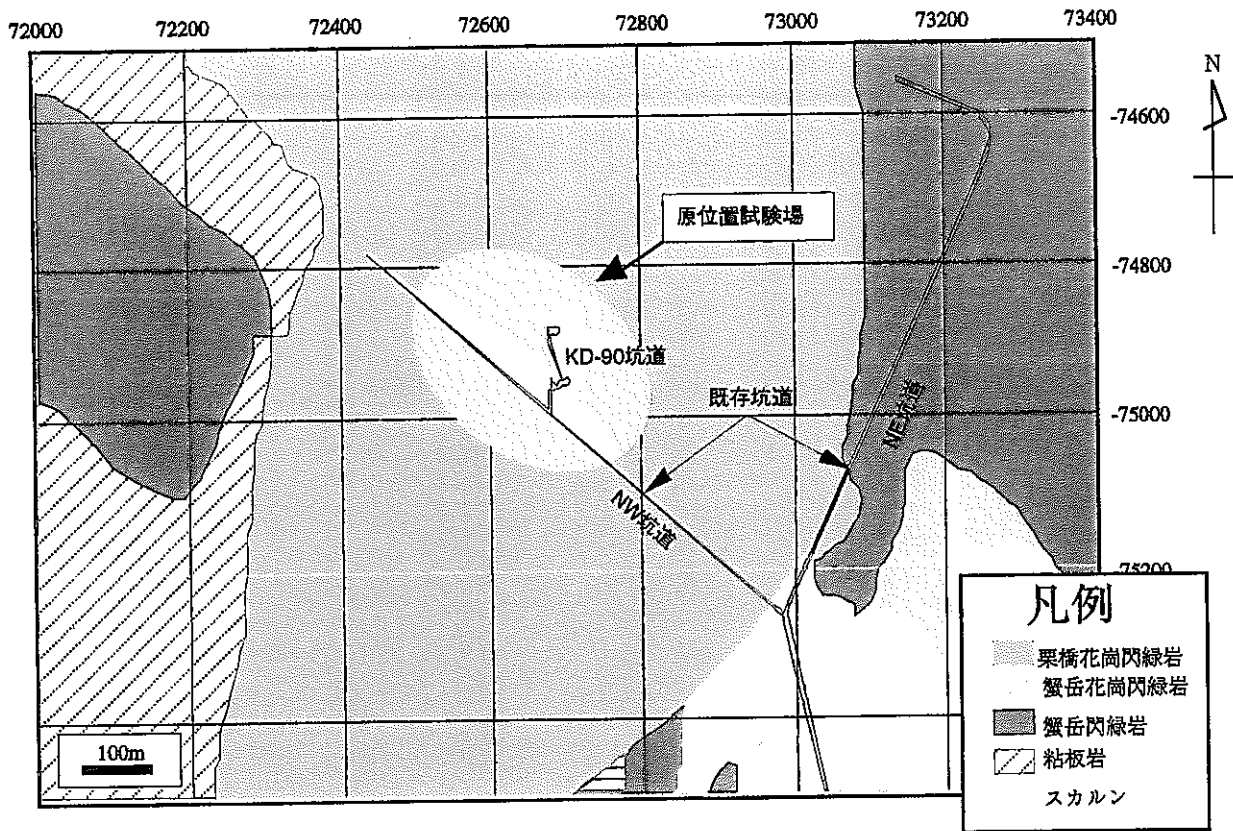
図-2.2.1 釜石鉱山の位置図



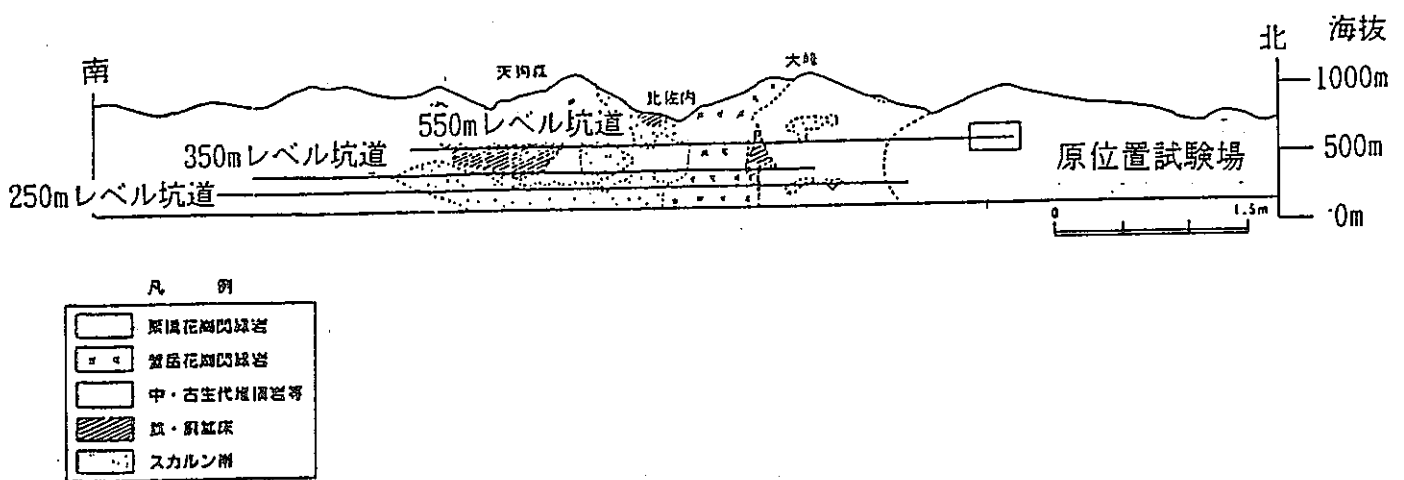
—— 550ml坑道
 - - - 250ml坑道

1 : 50,000
 0 1 2km

图-2.2.2 釜石鉞山地形图



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2.2.3 釜石鉱山地質図

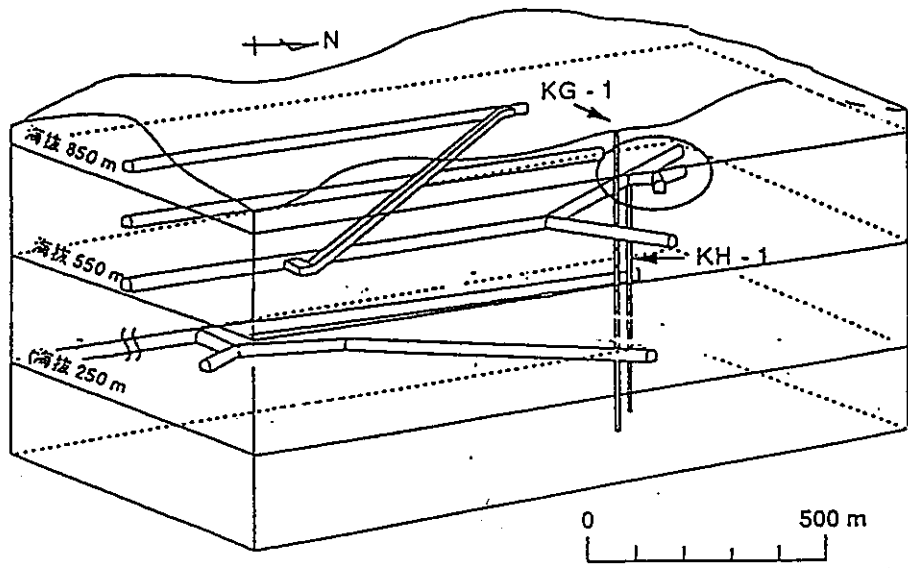


图-2.2.4 釜石鉾山坑道鳥瞰圖

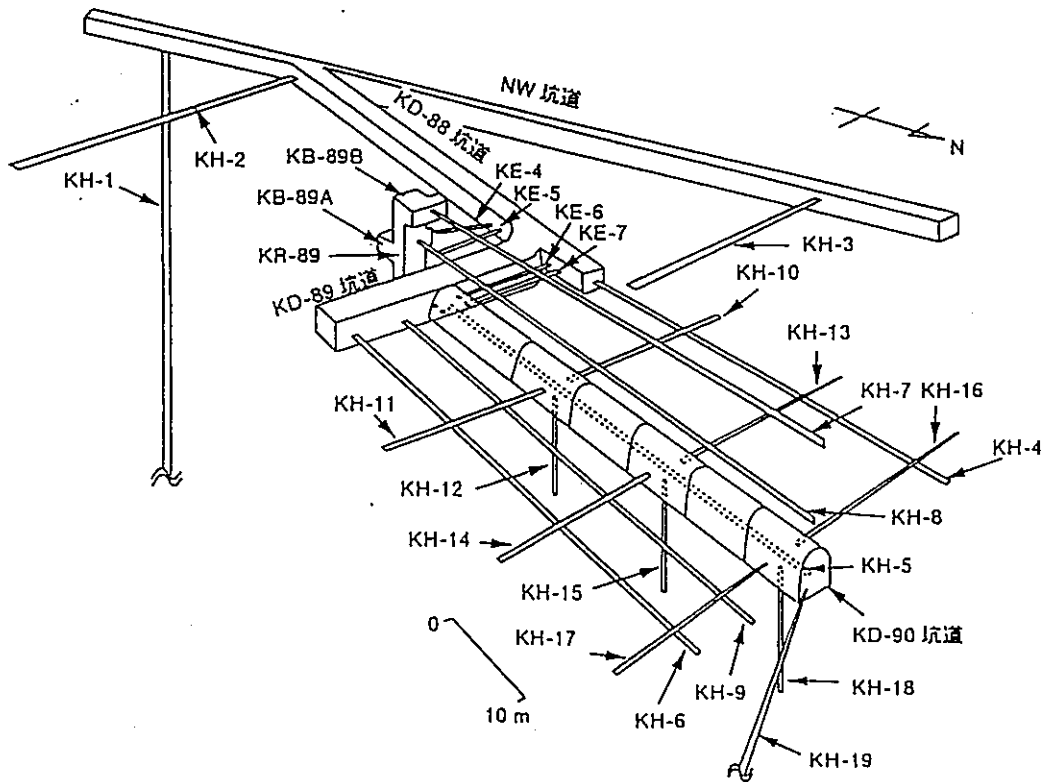


图-2.2.5 原位置試驗場周边詳細圖

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、下茂他（1996）は、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、下茂他（1996）に基づき、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。

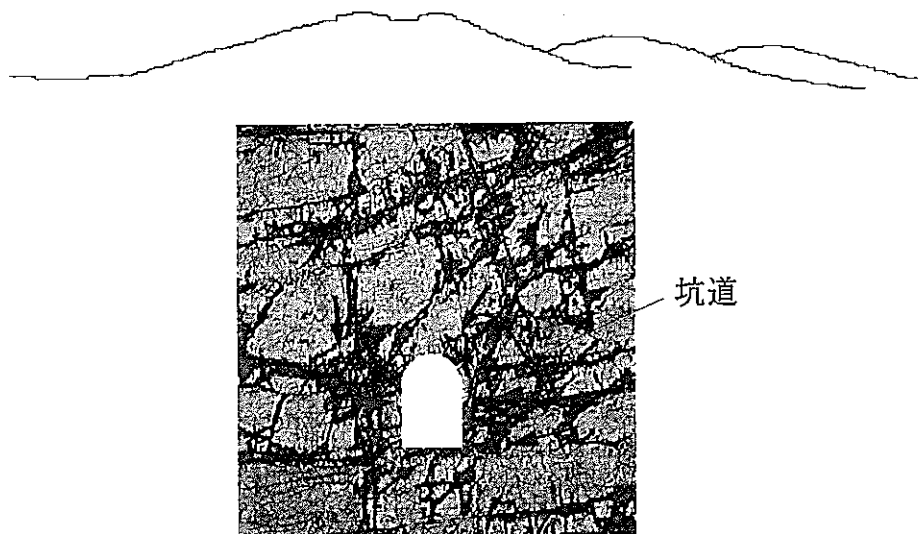


図-3.1.1 岩盤中の地下水の流れ（模式図）



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

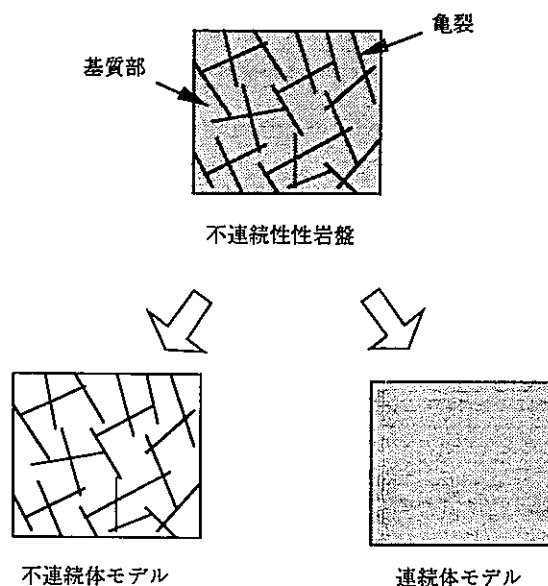


図-3.2.1 亀裂性岩盤のモデル化

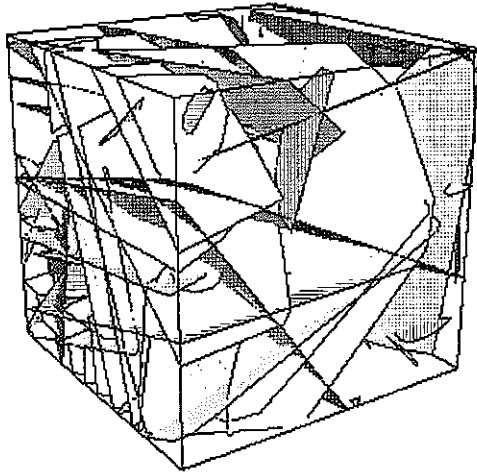
ついて別々に定義する。

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。

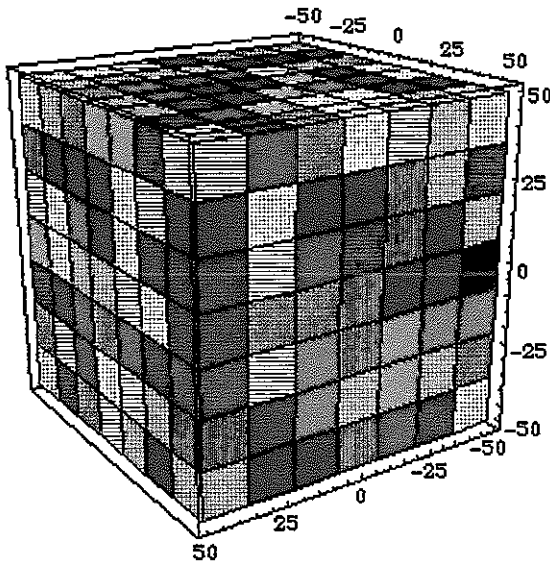
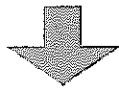
上記の各モデルのうち、不連続体モデル（亀裂ネットワークモデル）は、ボーリング調査や露頭調査から得られる亀裂分布特性に関する情報（亀裂密度、方向、長さ、開口幅等、およびこれらの空間的、統計的分布）をそのままモデルに反映できる点で、連続体モデルに比べて優れている。しかし、広域的な地下水の流れを解析する場合には、個々の亀裂をすべてモデル化するのは現実的でない。

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)

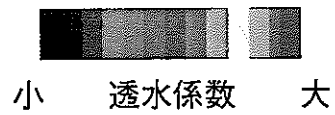


図-3.2.2 等価不均質連続体モデルの概念 (下茂他, 1996)

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。

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

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

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、

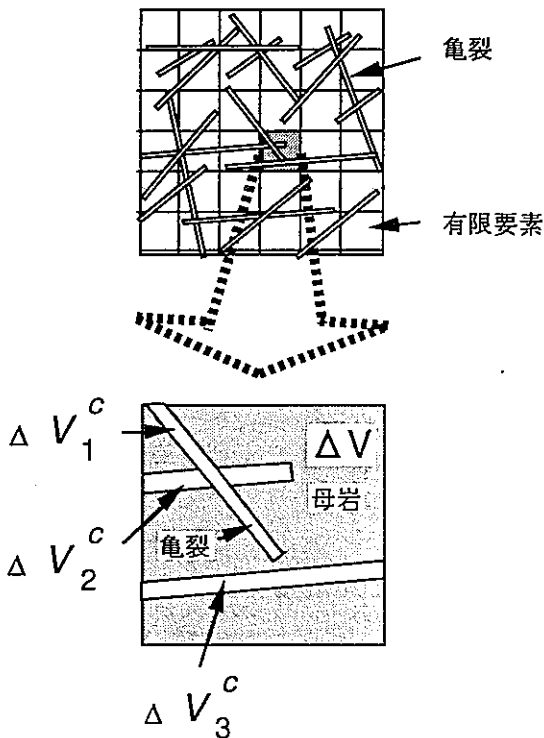


図-3.3.1 モデル化の概念

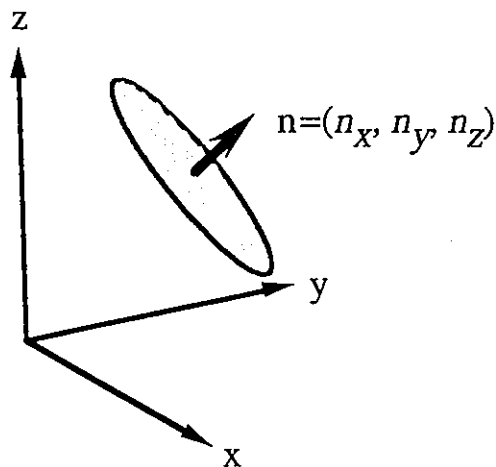


図-3.3.2 亀裂の法線ベクトル

$\Delta V^c / \Delta V \ll 1$ 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。

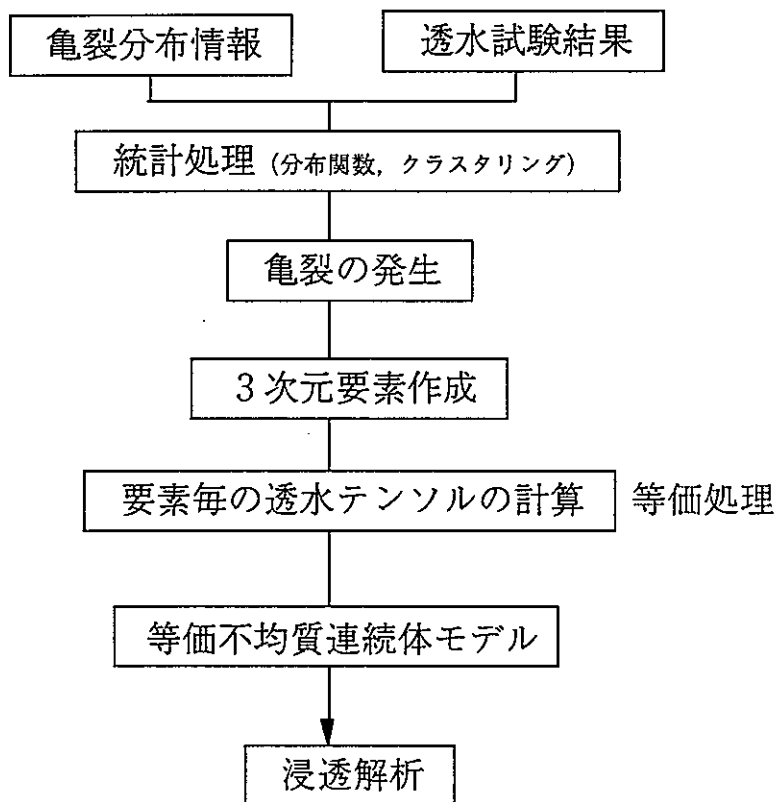


図-3.4.1 等価不均質連続体モデルの作成フロー

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には、亀裂の幾何学的な方位、開口幅、半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。ここでは、上記のパラメータを原位置のデータを用いて決定する。

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_1 ）、亀裂面の方向（ \mathbf{n} ）、幾何学的開口幅（ 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、透水係数分布の実測値と計算値との比較から、亀裂の半径（ r ）と水理的開口幅（ t_h ）の平均値を推定した。体積密度（ ρ_v ）は、亀裂分布の幾何学的関係式を用いて r の平均値と ρ_1 の値により算定した。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。

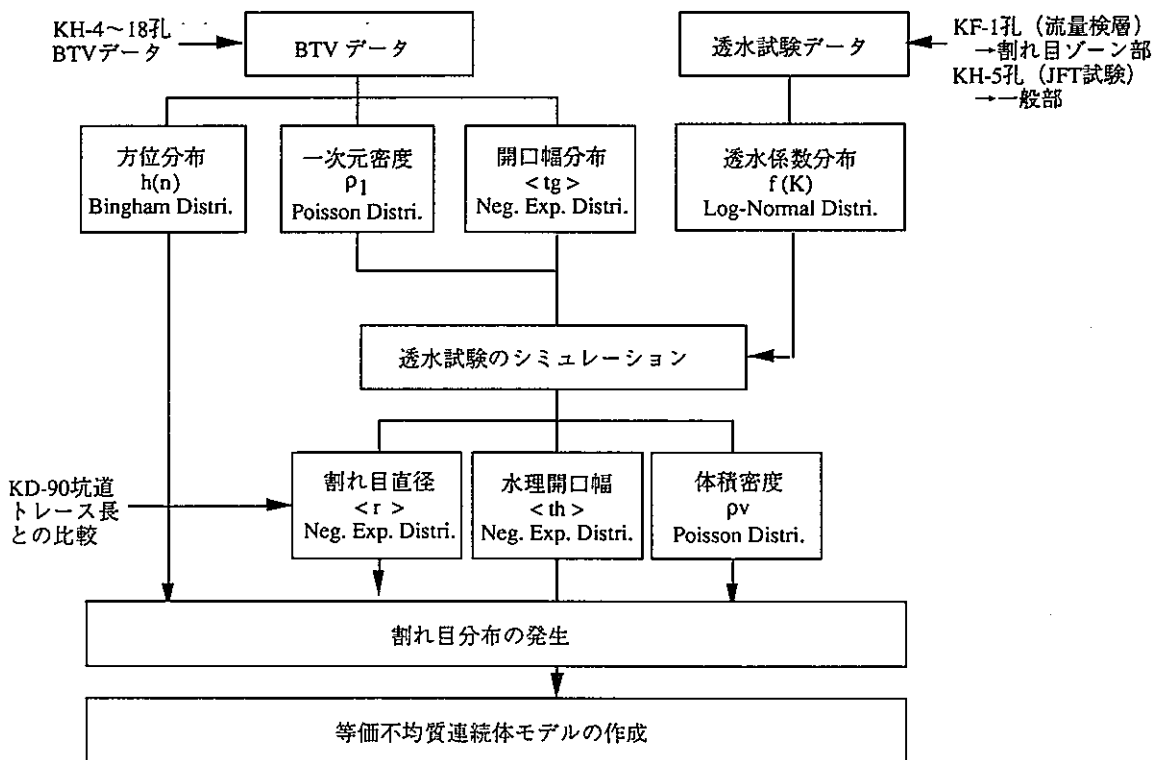


図-4.1.1 亀裂統計量の決定手順

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BTVデータから亀裂面の方位分布を決定する。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。これら図から分かるように、ボーリング孔の方位によるサンプリングの偏りから、異なる方位分布が得られている。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)。

$$E(\mathbf{n}) = E_b(\mathbf{n}) / n_e \quad n_e = |\mathbf{e} \cdot \mathbf{n}| \quad (4.1)$$

ここに、 \mathbf{e} ：ボーリング孔の単位方位ベクトル、 \mathbf{n} ：亀裂面の単位法線ベクトル、 $E_b(\mathbf{n})$ ：ボーリング孔内で観察される亀裂方向分布、 $E(\mathbf{n})$ ：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))。

$$f(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi d} \exp\left\{(\kappa_1 \cos^2 \phi + \kappa_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \theta\right\} \quad (4.2)$$

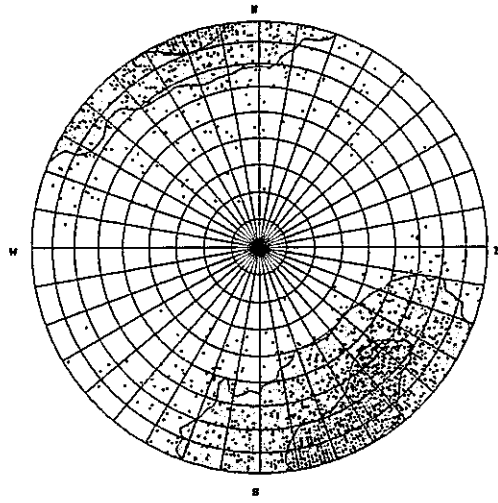
ここに、 θ ：平均方位からの角度、 ϕ ：平均方向周りの回転角、 κ_1 、 κ_2 ：分散パラメータ、 d ：正規化のための定数、である。得られた各セットの平均方位と分散パラメータを表-4.2.1に示す。

表-4.2.1 方位分布パラメータ (Bingham分布)

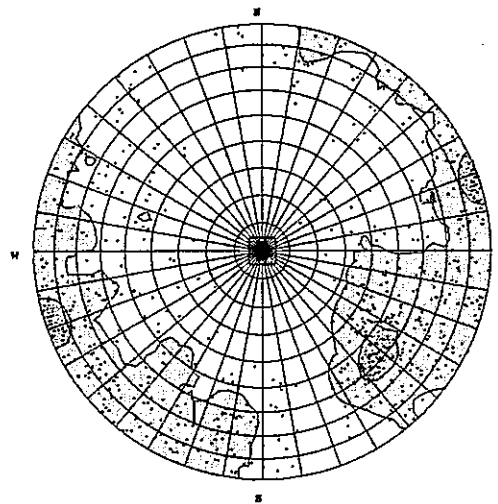
Plunge (°)	234.6
Dip (°)	66.4
κ_1	-5.7
κ_2	-2.4

亀裂面の法線ベクトルの方向をplunge/dipにより表現

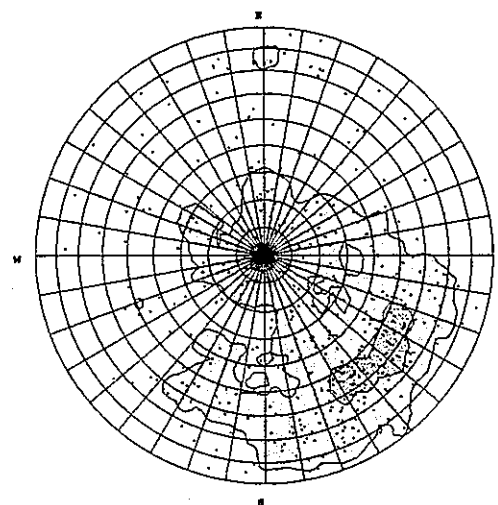
plunge：北方向を0度とし時計周りを正,dip：水平を0度



(a) KH-4~9孔
(方位：N19W水平)

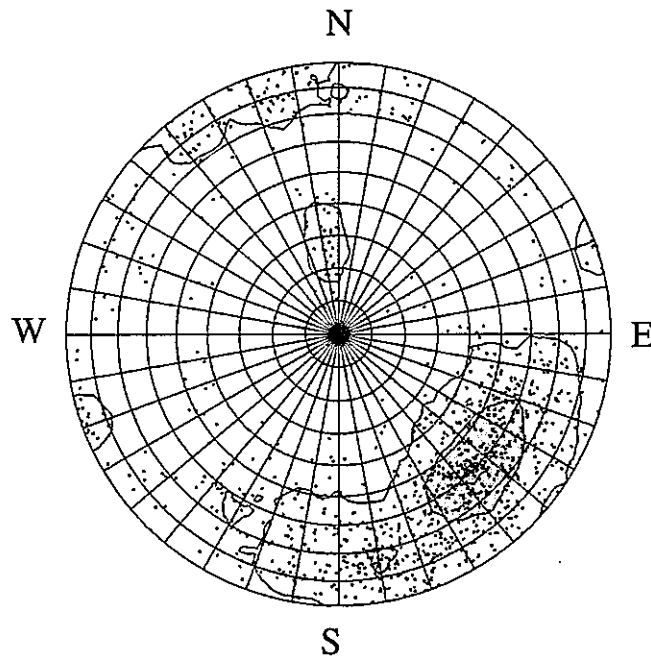


(b) KH-10, 11, 13, 14, 16, 17孔
(方位：N71E水平)

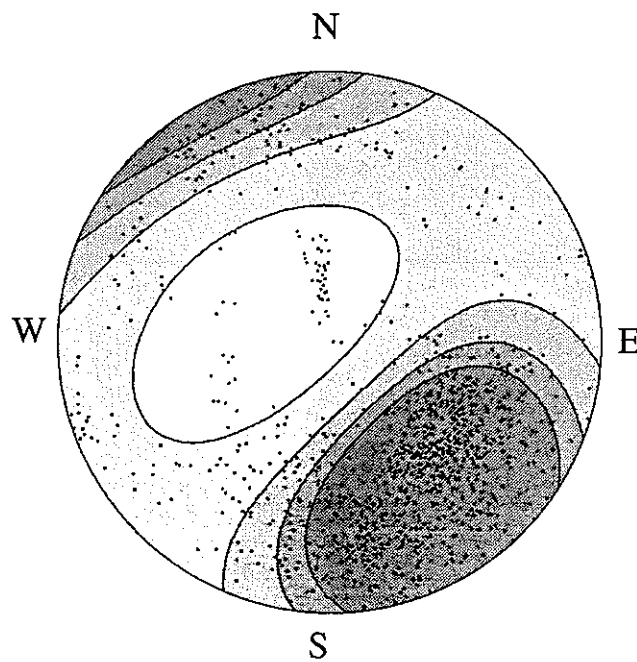


(c) KH-12, 15, 18孔
(方位：鉛直)

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する。負の指数分布の確率密度関数 $f(t)$ は次式で与えられる。

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad (4.3)$$

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である。また、超過確率 $F(t)$ は次式で与えられる。

$$F(t) = \exp(-\lambda t) \quad (4.4)$$

単位長さの計測線と交差する幅 t 以上の開口亀裂数である一次元亀裂密度 $\rho_1(t)$ は次式で表される。

$$\rho_1(t) = \rho_1(0) \exp(-\lambda t) \quad (4.5)$$

ボーリング孔と交差する幅 t 以上の開口亀裂の頻度 $N(t)$ をB T Vデータから求めることができれば、 $\rho_1(t)$ は次式により評価できる。

$$\rho_1(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N(t)} \frac{1}{n_i} \quad (4.6)$$

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B T Vデータに(4.6)式を適用して求めた $\rho_1(t)$ を図-4.2.3に示す。この $\rho_1(t)$ を(4.5)式に当てはめた結果を同図中に実線で示す。この関係から、一次元亀裂密度および平均幾何開口幅は次のように求められる。

一次元亀裂密度	: $\rho_1(0)=0.47$ [1/m]
平均幾何開口幅	: $\langle t_g \rangle = 3.1$ [mm]

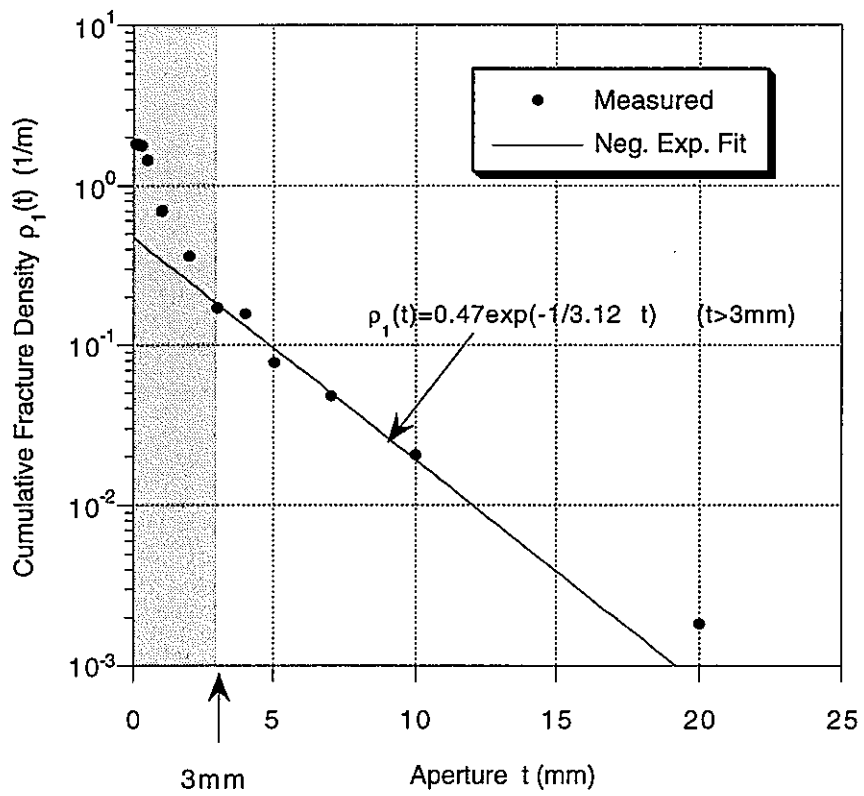


図-4.2.3 亀裂開口幅と一次元密度の関係 (KH-4孔~KH-18孔)

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

亀裂の平均半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の計算値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。

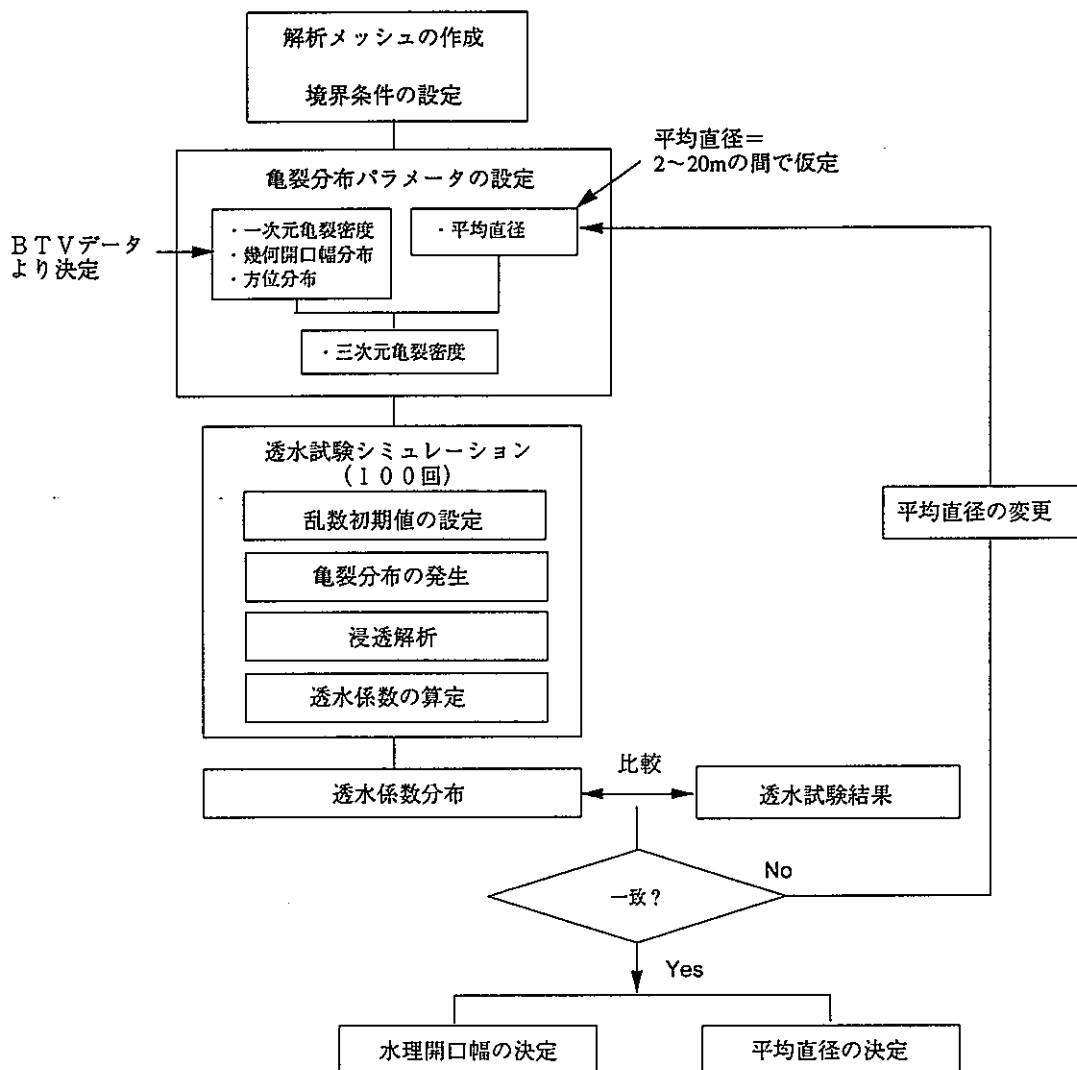


図-4.2.4 透水試験シミュレーションの手順

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した。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した。この解析を亀裂発生の際の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た。

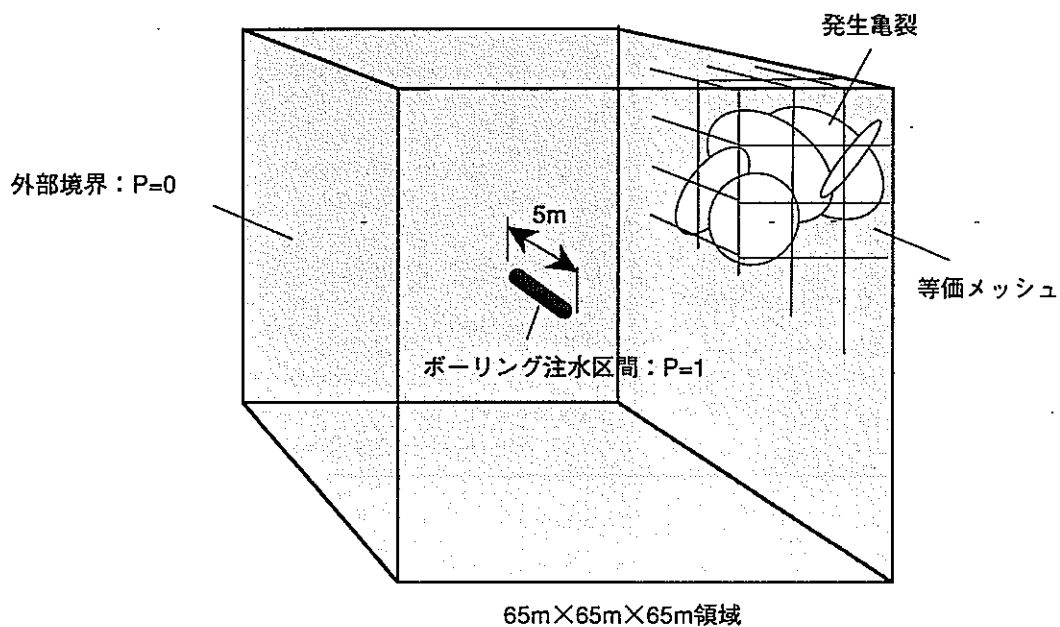


図-4.2.5 透水試験シミュレーションの解析条件

(2) 亀裂半径の分布

亀裂の半径分布は、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2m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半径では、実際よりも過少評価していることが懸念される。

そこで今年度は、亀裂の半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、半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半径の平均値のみとなる。

その概念を図-4.2.6に示す。BTVデータから決定した一次元亀裂密度 ρ_l を既知量として固定した場合、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）は次式のように、亀裂半径の2乗平均に反比例する（Oda, 1983）。

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

ここに、 ρ_l ：一次元亀裂密度、 $\langle r^2 \rangle$ ：亀裂の半径の2乗平均である。特に、亀裂の半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。

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るため、透水係数の分散（あるいは標準偏差）が増大する（図-4.2.6）。

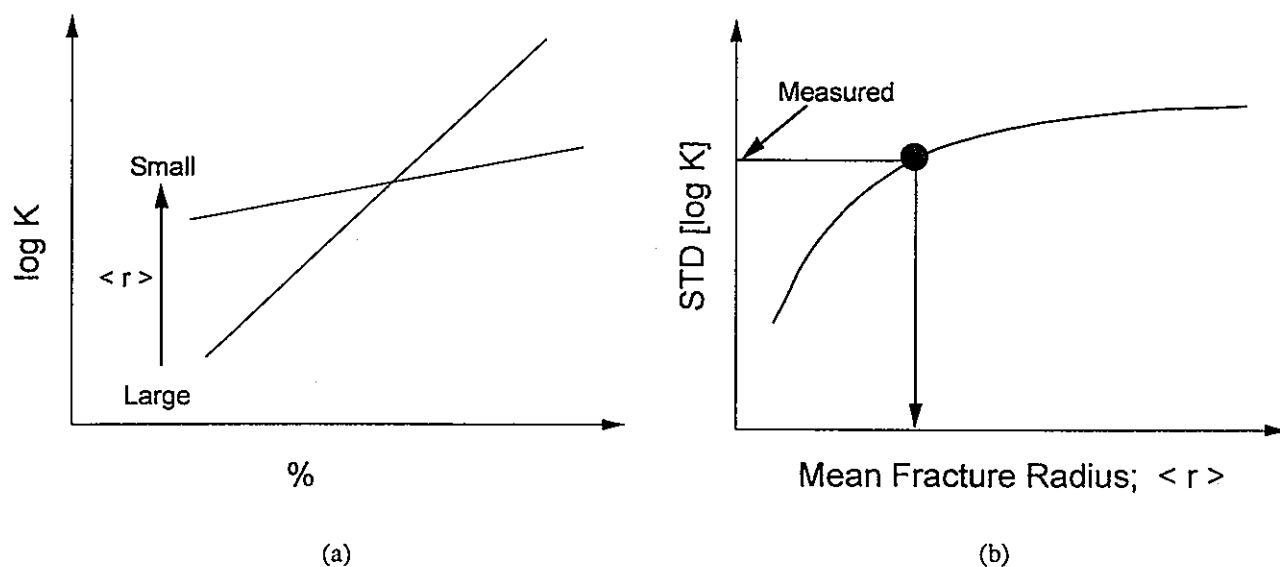


図-4.2.6 透水試験のシミュレーションによる平均半径の推定

今回は、平均半径をいくつか変えた場合の透水係数の分布をシミュレーションから数値的に求め、実測の透水係数の分布と比較することにより、最適な平均半径を推定することとした。

今回の解析では、対象領域を割れ目ゾーン部と一般部の2つのゾーンに分けているため、一般部ではKH-5孔のJFT試験、割れ目ゾーン部ではKF-1孔の水理試験（流量検層）の結果を代表値とし、各々について平均半径を求めることを試みた。両孔の透水係数分布を図-4.2.7に示し、透水係数の対数平均と標準偏差を表-4.2.1に示す。

次に、平均半径を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、平均半径を大きくするに従い、透水係数分布のバラツキ（傾き）が大きくなっている。この傾きに注目して、図-4.2.7の実測データとフィットする最適な平均半径を求めた結果、両ボーリング孔ともに、平均半径8mが最適値として求められた。図-4.2.9に実測値と計算値の比較を示す。

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)	試験方法
KF-1孔	7.96×10^6	0.84	流量検層結果
KH-5孔	7.74×10^7	0.97	JFT試験結果

(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。

ここでも一般部と割れ目ゾーン部の透水特性をKH-5孔、KF-1孔の試験結果で代表させる。(2)で求めた平均直径（8m）を用い、上記の方法により α を求めた結果、KF-1孔とKH-5孔の場合について各々 $\alpha = 41$ 、 97 が得られた。すなわち、水理開口幅は幾何開口幅の数10～100分の1程度であり、割れ目ゾーン内部に存在するKF-1孔の平均的な水理開口幅が、一般部に位置するKH-5孔の約2倍となる。上記の α を用いた場合の透水係数分布の計算値を実測値とともに図-4.2.9に示すが、非常に良好な一致が見られる。

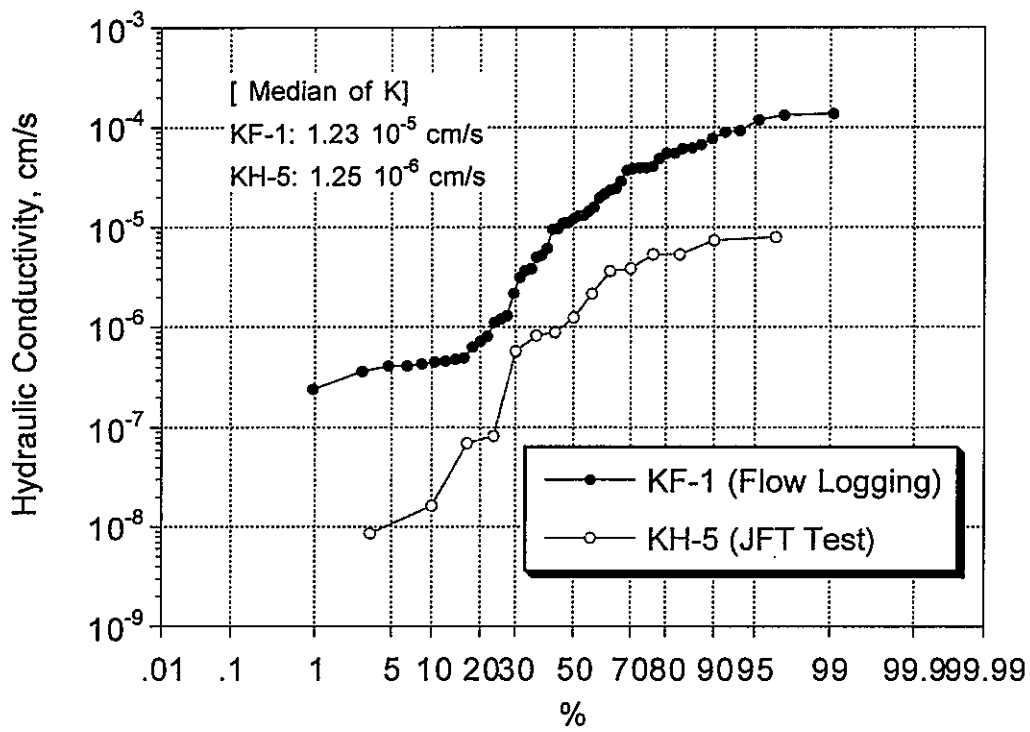


図-4.2.7 透水係数分布の実測値 (KF-1,KH-5孔)

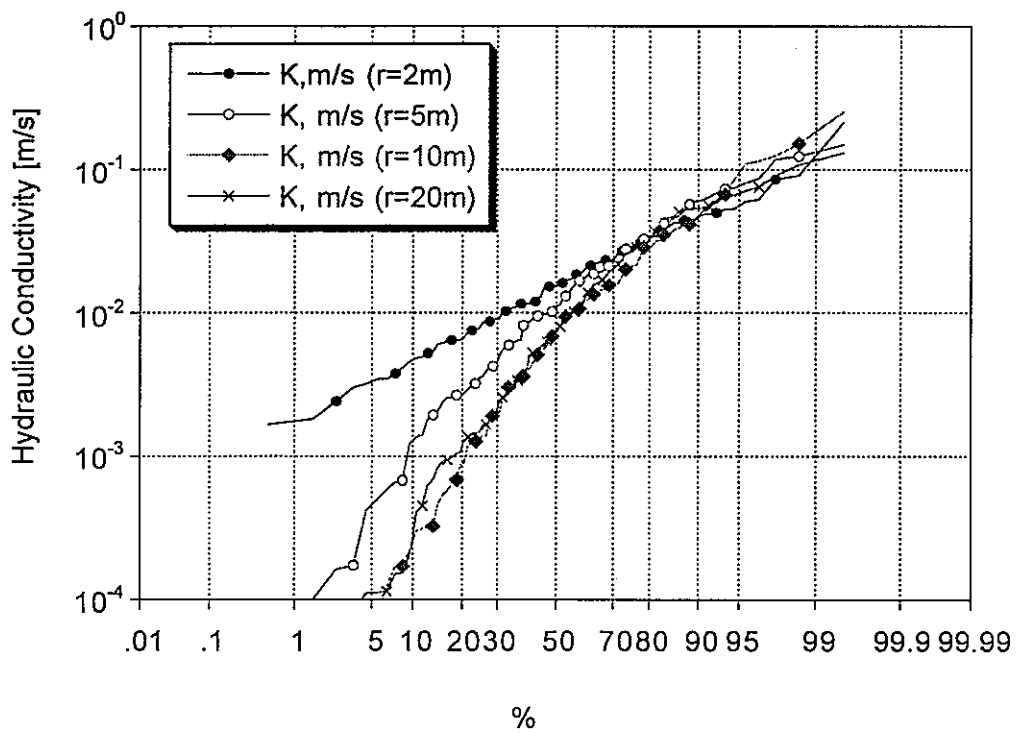


図-4.2.8 平均半径による透水係数分布の変化 (シミュレーション)

Simulated vs Measured Hydraulic Conductivity Distribution

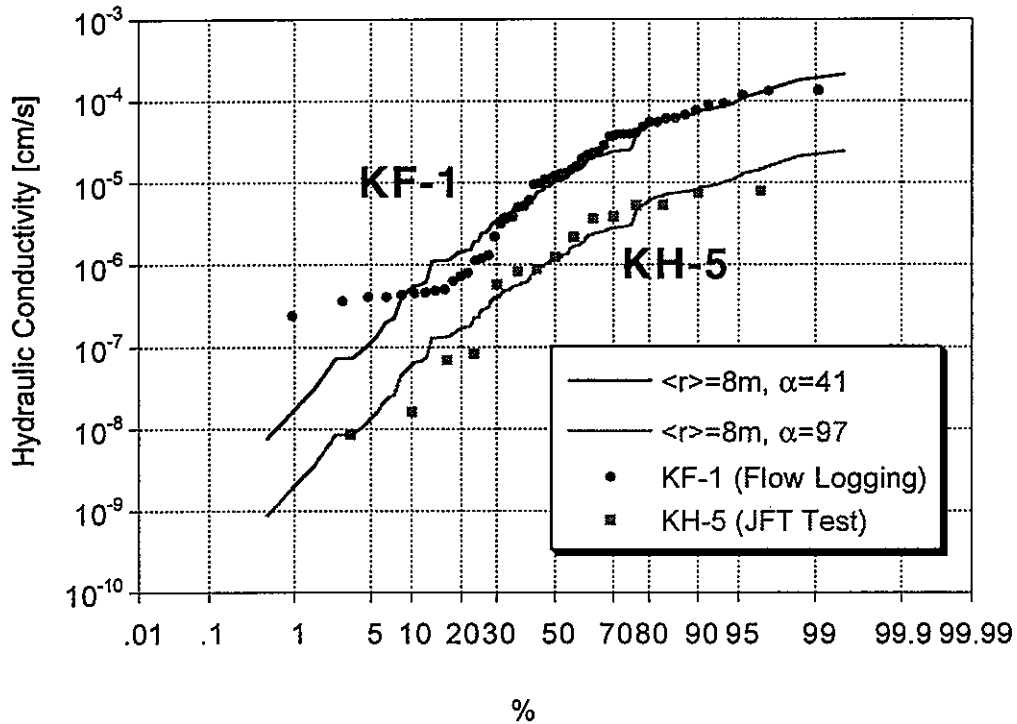


図-4.29 透水係数分布（シミュレーションと実測のフィッティング）

4.3 亀裂統計量のまとめ

以上から決定した亀裂統計量を表-6.3.5にまとめて示す。

表-6.3.5 亀裂の統計分布パラメータ

分布パラメータ	割れ目 ゾーン部	一般部	分布関数	決定方法・使用データ
(1) 一次元亀裂密度 [1/m]	0.47		ポアソン分布	BTVデータ (KH-4~18孔) に対する統計解析
(2) 平均幾何開口幅 [mm]	3.1		負の指数分布	BTVデータ (KH-4~18孔) に対する統計解析
(3) 平均水理開口幅 [μm]	76	32	負の指数分布	KH-5孔JFT (一般部) KF-1孔流量検層 (割れ目ゾーン部) データを用いた透水試験シミュレーション
(4) 平均亀裂半径 [m]		8	負の指数分布	KH-5孔JFT (一般部) KF-1孔流量検層 (割れ目ゾーン部) データを用いた透水試験シミュレーション
(5) 三次元亀裂密度 [1/m ³]	1.17×10^{-3}		ポアソン分布	円板亀裂、ランダム分布を仮定 し、(1), (4)の値より算定

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。以上の検討は、前節で求めた釜石鉾山の割れ目パラメータを基本パラメータとして行う。

(1) 解析内容

解析では、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

表-5.1.1 解析ケース（スケール効果）

モデル	メッシュサイズ $\Delta x(m)$	スケール（立方体の一辺の長さ） [m]				
		10	20	30	50	100
不連続体モデル						
等価不均質 連続体モデル	2	○	○	○	○	
	5		○	○	○	○
	10			○	○	○

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。

$$K=Q/\Delta H L \quad (5.1)$$

ここに、 Q ：流量[m³/s]、 ΔH ：水圧差[mH₂O]、 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。

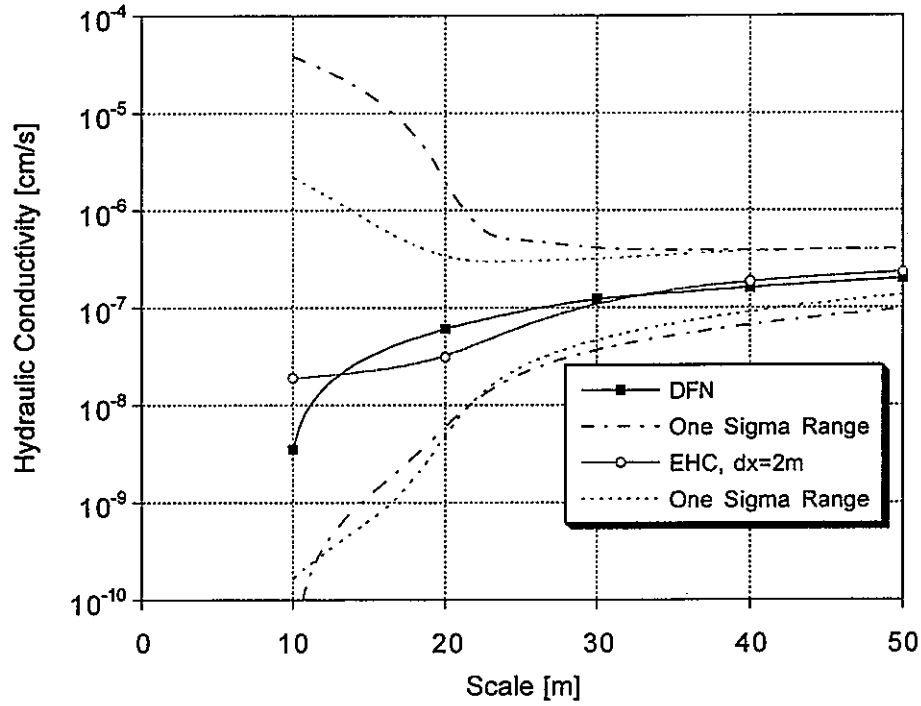
(2) 解析結果

解析結果を図-5.1.1に示す。同図(a)は、メッシュサイズを2mとした場合、(b)は5mと10mにした場合のEHCモデルをDFNモデルと比較したものである。図中の実線および破線は、各々、各モデルから得られた等価透水係数の平均値および平均値±1標準偏差の範囲を示したものである。これらの図から、平均化する体積（スケール）が大きくなると、等価透水係数のバラツキが小さくなる傾向にあるのが分かる。

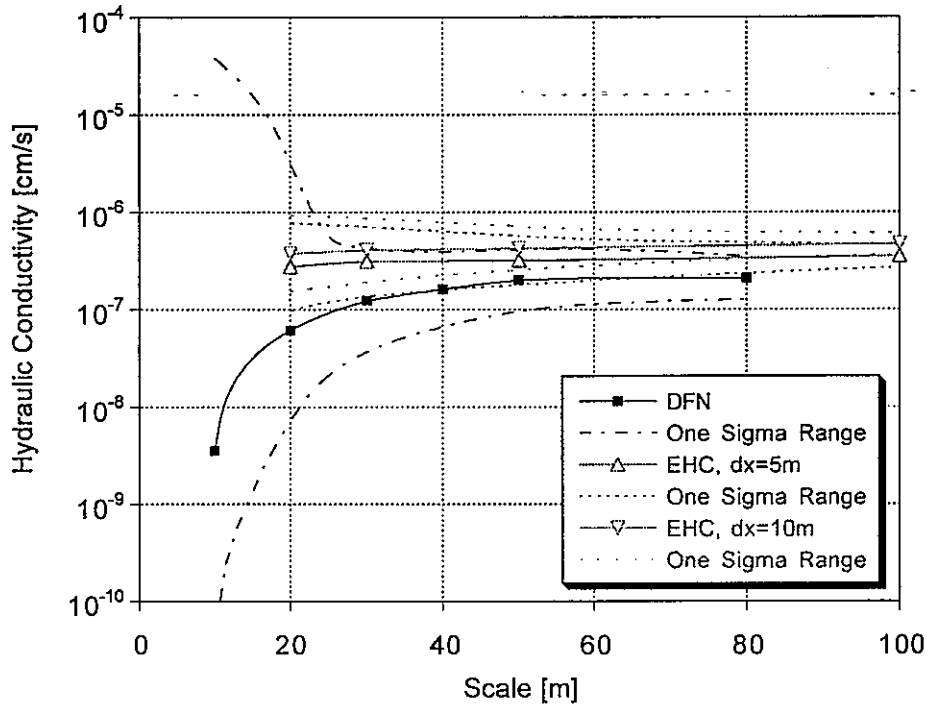
ただし、DFNモデルにおいて領域（スケール）が小さい場合、乱数初期値によって完全な不透水となる（ $K=0$ ）ことがある。その場合には、対数値の平均値と標準偏差の算定に際して、 $K=0$ の場合を除外せざるを得ないため、DFNモデルの平均値、標準偏差を各々過大、過小に評価している。スケールの小さな範囲において、図(a)中のDFNモデルの平均透水係数がEHCモデルより大きくなっており、図-5.1.2において標準偏差が小さくなっているのはそのためである。

図-5.1.2に、等価透水係数の対数値の標準偏差とスケール（立方体の一辺の長さ）との関係を示す。この結果をまとめると、以下のようなものである。

- ・ 解析領域20～40m程度で標準偏差の減少傾向がゆっくりになり、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サイズ（30m弱）ほぼに対応する。
- ・ スケール40m以上であれば、EHCモデルとDFNモデルの標準偏差はほぼ一致するので、EHCモデルによりDFNモデルと同程度の不均質性を表現できることが示される。スケール40m以下ではEHCモデル（ $dx=5m$ と $10m$ ）の標準偏差がDFNモデルよりも小さいが、メッシュを細かく切ることにより（ $dx=2m$ ）、ある程度までDFNモデルに近づけることが可能である。



(a) DFNモデルとEHCモデル ($\Delta x=2m$) の比較



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

図-5.1.1 等価透水係数のスケール効果

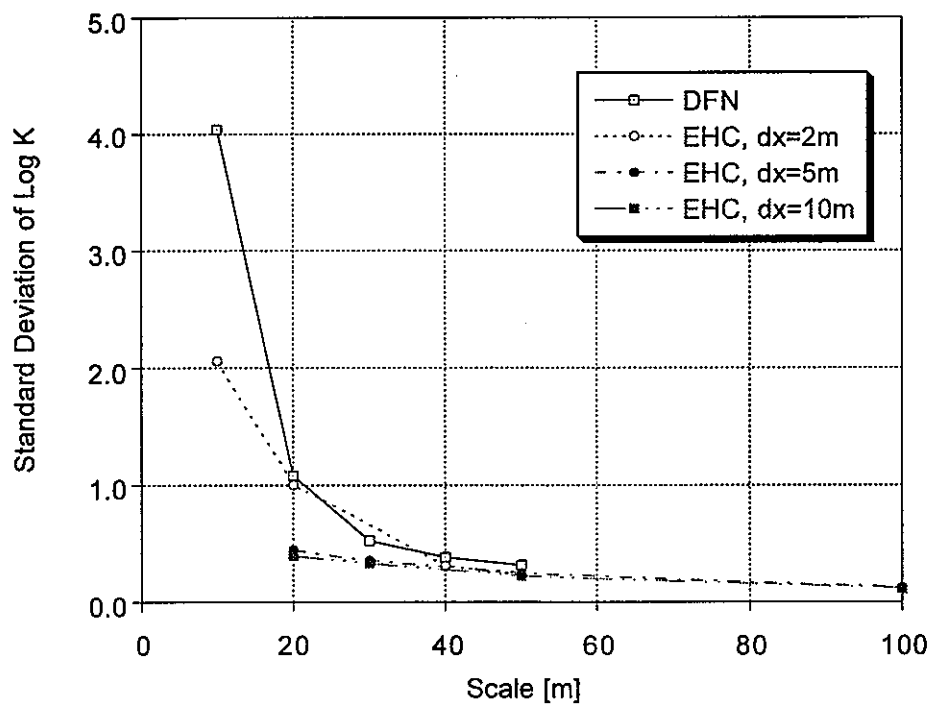


図-5.1.2 等価透水係数の標準偏差のスケール効果

5.2 亀裂パラメータの感度解析

等価不均質連続体モデルは、原位置で得られた亀裂パラメータ（平均開口幅、平均半径、1次元密度）に基づいて作成される。ここでは、それらのパラメータの差異が透水係数の分布に及ぼす影響を検討した。

検討では、釜石鉱山の一般部の亀裂パラメータを基本とし、平均開口幅、平均半径、1次元密度のうちの一つのパラメータを基本値の上下に1/4～4倍まで変動させ、5.1節と同様の透水シミュレーションにより、等価透水係数分布の変化を調べた。分布の指標として、等価透水係数の対数値の平均値と標準偏差を用いることとした。解析領域の大きさは、5.1の検討結果から釜石鉱山でのREVと考えられる一辺40mの立方体領域とした。等価モデルのメッシュ幅は2mと5mについて検討した。

以下に、各パラメータ毎の結果について示す。

5.2.1 平均亀裂半径の影響

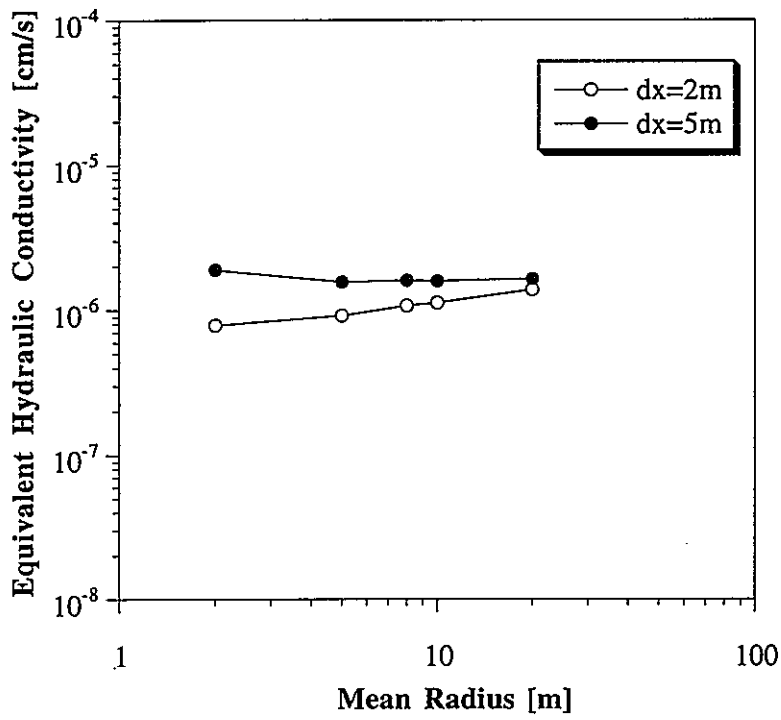
平均亀裂半径の違いによる等価透水係数の対数値の平均値と標準偏差への影響を図-5.2.1に示す。まず、平均透水係数についてみると、平均亀裂半径の影響は小さい。ここでの検討では、平均半径を変えているが、1次元密度を固定しているため、次式から分かるように領域内に占める亀裂面積は平均半径にかかわらず一定となっている。

$$\frac{A_r}{V} = \frac{\sum_{i=1}^n \pi r^2}{V} = \rho_v \pi \langle r^2 \rangle = \rho_1 = \text{const.} \quad (5.2)$$

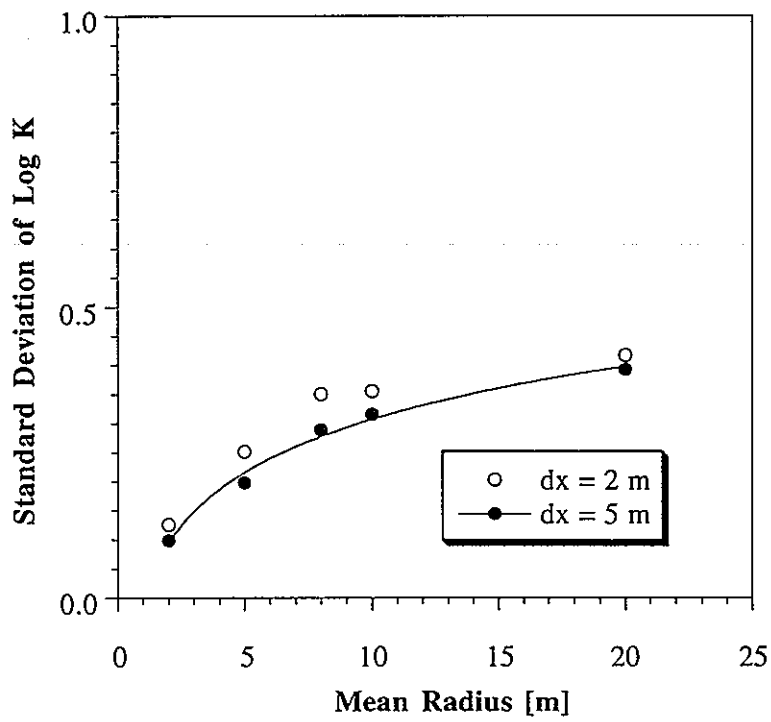
ここに、 A_r ：亀裂面の総面積、 V ：体積、 n ：亀裂の総数、である。

従って、連結性が十分である場合に限れば、透水係数は亀裂面積に比例するため、平均半径は平均透水係数へ影響しない。

一方、標準偏差については平均亀裂半径の増大につれて標準偏差が大きくなる傾向が現れている。これは、平均半径が大きいと亀裂の体積密度 ρ_v （個数）が減少し、より不連続な亀裂系となるために、透水係数の標準偏差が大きくなるものと考えられる。ただし、その影響は平均亀裂半径が大きくなるにつれて収束する傾向にある。



(a) 平均値



(b) 標準偏差

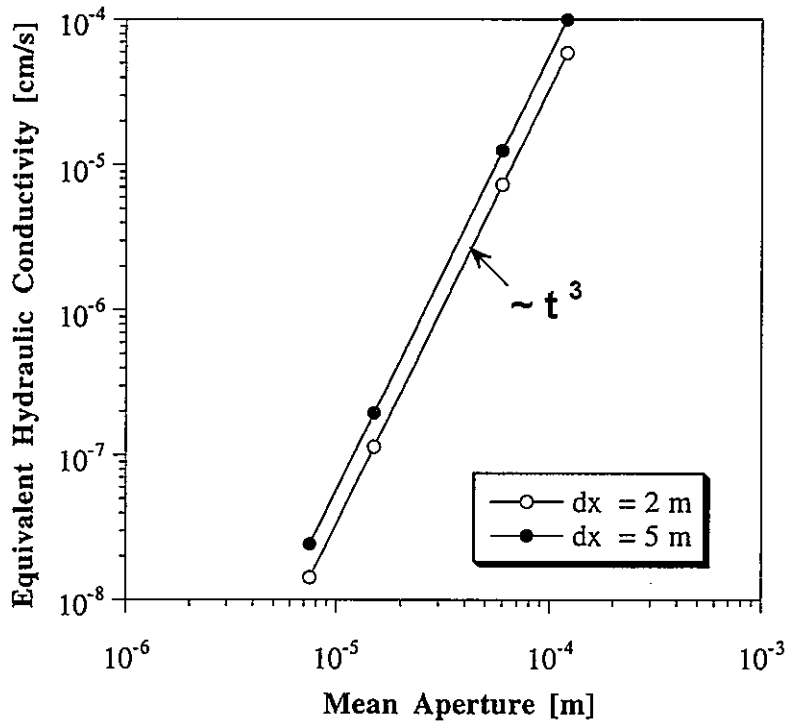
図-5.2.1 等価透水係数に対する平均亀裂半径の影響

5.2.2 平均開口幅の影響

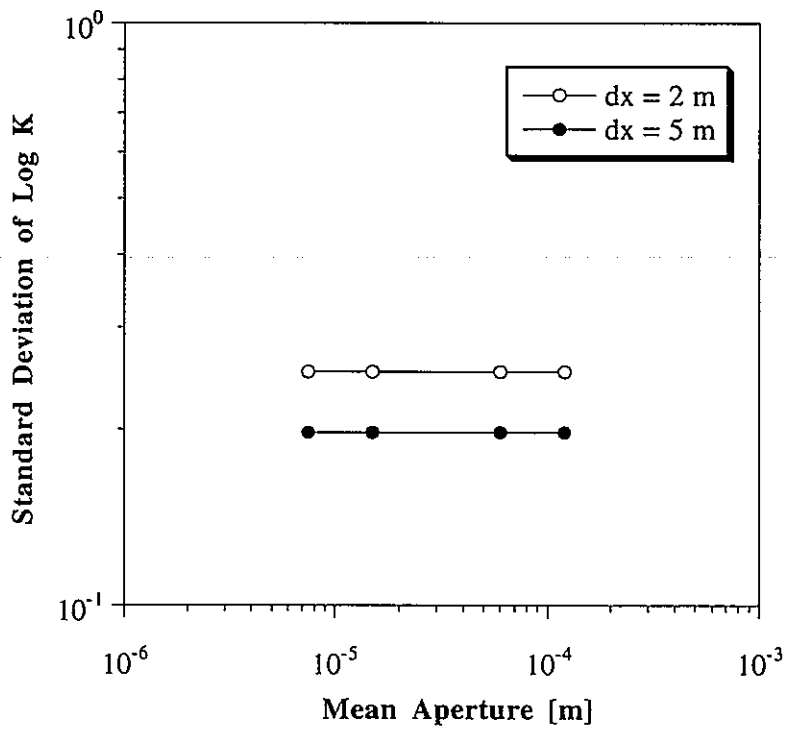
平均開口幅に対する等価透水係数の対数値の平均値と標準偏差の関係を図-5.2.2に示す。今回のモデル化の仮定として三乗則（亀裂の透水量係数が開口幅の三乗に比例する）を採用しているため、当然の結果として、平均透水係数は開口幅の3乗に比例して増大している。一方、標準偏差に対しては全く影響していない。つまり、平均開口幅の変化は亀裂系の形状（不均質性）に影響しないために標準偏差は変化しないものと理解される。

5.2.3 一次元亀裂密度の影響

一次元亀裂密度に対する等価透水係数の対数値の平均値と標準偏差の関係を図-5.2.3に示す。3章で述べたように、等価不均質連続体モデルの透水係数の算定式によれば、透水係数は一次元亀裂密度に比例する。従って、図中に見られるように、平均透水係数は、亀裂密度の高い範囲で密度に比例して増加している。一方、亀裂密度の低い範囲では、亀裂の連結性を増加させる効果がさらに加わっており、透水係数の増加度合いが大きくなっている。次に、標準偏差について見ると、亀裂密度が小さく、不連続性の効果が大きい範囲では影響が大きい。しかし、ある密度以上（REV以上）になると透水係数の標準偏差が収束するため、標準偏差に対する密度の影響は比較的小さくなる。

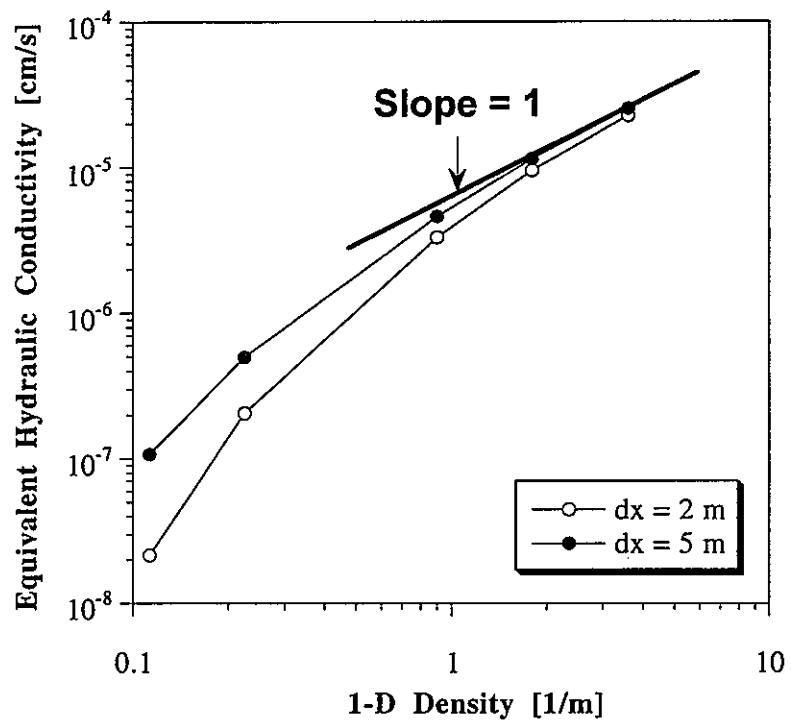


(a) 平均値

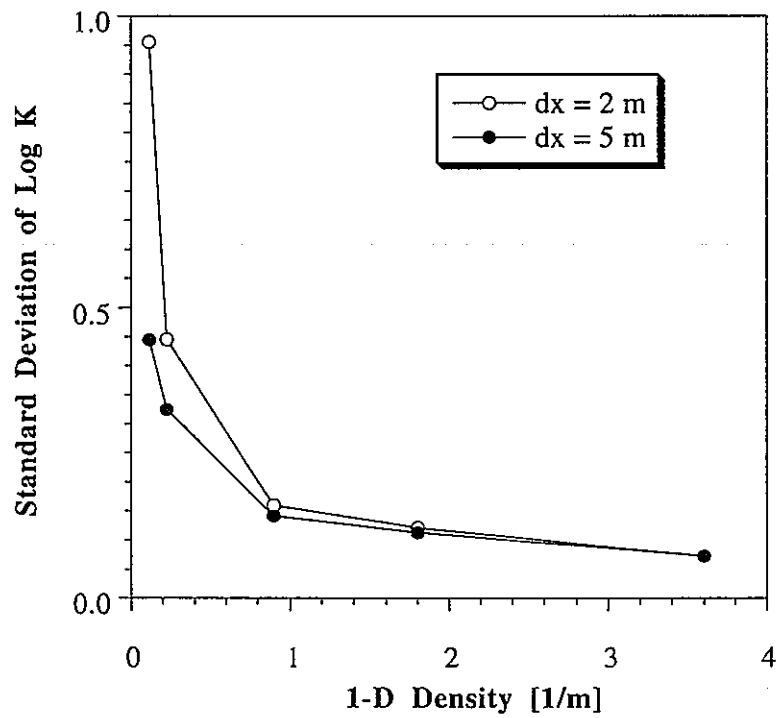


(b) 標準偏差

図-5.2.2 等価透水係数に対する平均開口幅の影響



(a) 平均值



(b) 標準偏差

図-5.2.3 等価透水係数に対する一次元亀裂密度の影響

5.2.3 まとめ

以上、亀裂の平均半径、平均開口幅および一次元亀裂密度の亀裂パラメータの等価透水係数の分布へ影響について、特に透水係数の平均値と標準偏差に注目して検討した。各パラメータが及ぼす浸透流解析結果への影響を考えると、全体の流量は平均透水係数に大きく影響される。また、水圧分布は透水係数の標準偏差（相対的な不均質性）により左右される。そのように両者を対応させると、各亀裂パラメータの浸透流解析への影響は表-5.2.1のようにまとめられる。

以上の検討結果により、いずれのパラメータも、透水係数とその分布、ひいては浸透流解析の結果に大きく影響することが示され、従って、本解析で採用しているように、透水試験のシミュレーションによる実測透水係数とのマッチングによるモデルのキャリブレーションが必要不可欠であると考えられる。

表-5.2.1 各亀裂パラメータの透水係数ならびに浸透流解析結果への影響

パラメータ	平均透水係数	標準偏差	解析結果への影響	
			流量	水圧分布
平均半径	1 オーダー以下	0.1~0.4まで変化	△	○
平均開口幅	4 オーダー 三乗則で増大	影響無し	◎	×
一次元密度	3 オーダー 比例して増大	0.2~1.0まで変化 密度が小さい範囲 での影響が大	○	○

6. 等価不均質連続体モデルによる岩盤浸透流解析

6.1 解析の概要

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行う。本年度の解析は、基本的に平成7年度の解析と同様であるが、平成7年度以降に得られたデータの反映や割れ目ゾーン的位置などに関してモデルを修正している。

6.1.1 解析の全体フロー

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。

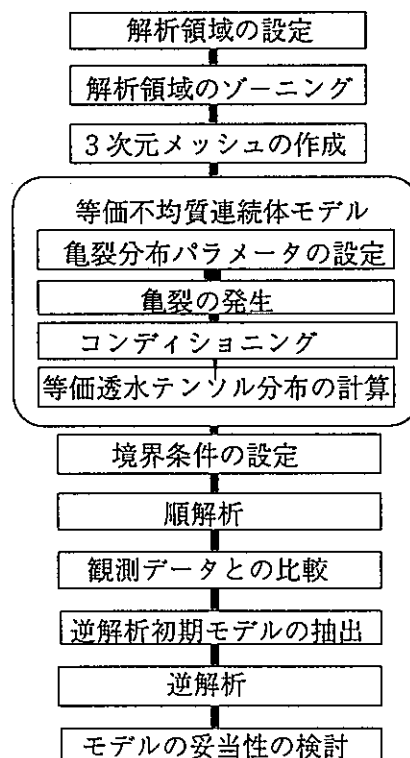


図-6.1.1 解析の全体フロー

6.1.2 平成7年度解析モデルの修正点

本年度は、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、今回は、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(4.2節参照)。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

- ・割れ目ゾーン部の位置に関し、H7年度の解析ではアクセス坑道北側の割れ目ゾーンの北限が、NW坑道内との交差部において実際に観察される割れ目ゾーンの位置と比べて、若干北側にずれていたため、割れ目ゾーンの北限を15m程度南側へ移動し、割れ目ゾーンの幅を拡げた。
- ・透水性に関し、H7年度の解析では一般部のKH-5孔の透水試験結果から全体の透水係数を推定し、割れ目ゾーン部の透水係数についてはデータの不足から、一般部の2倍を仮定して与えていた。本年度は、割れ目ゾーン内部に位置するKF-1孔の流量検層データ(平成8年度取得)を反映して、割れ目ゾーンの透水係数を決定した(4.2節参照)。

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。

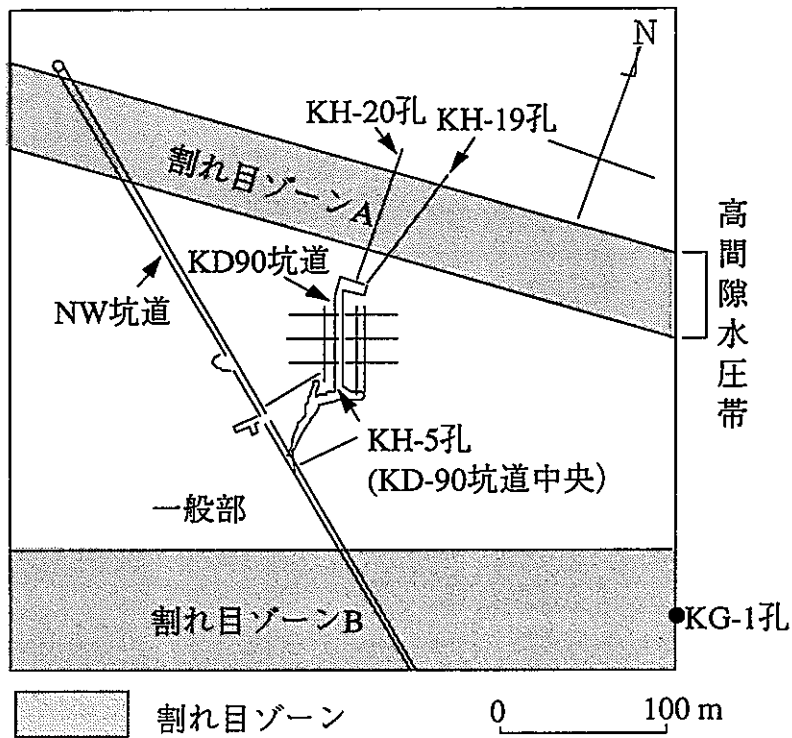


図-6.2.1 解析領域平面図 (標高550mレベル)

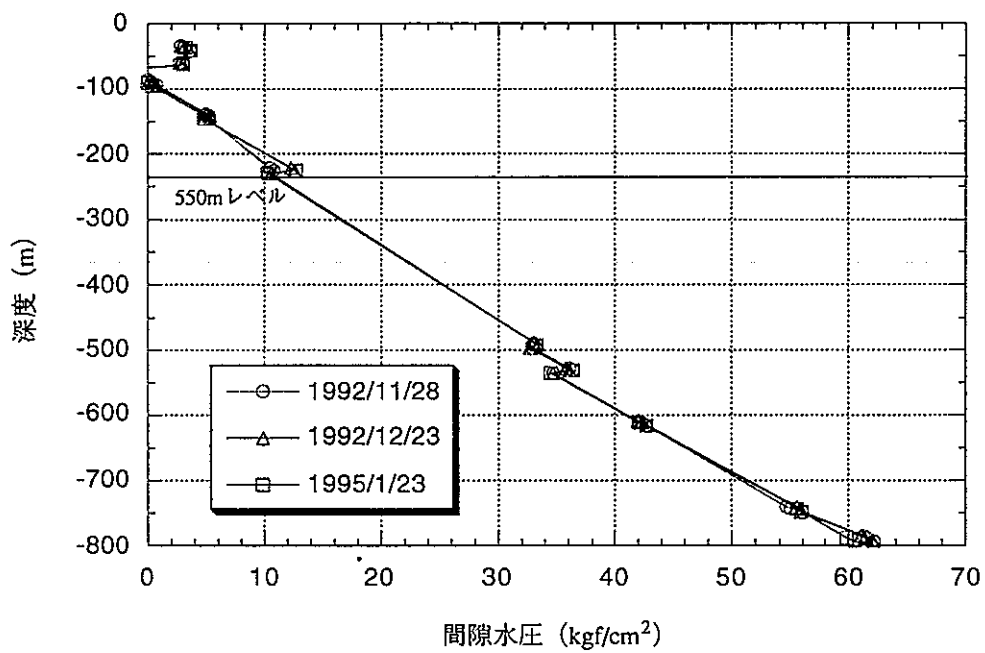


図-6.2.2 KG-1孔における間隙水圧経時変化

(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。

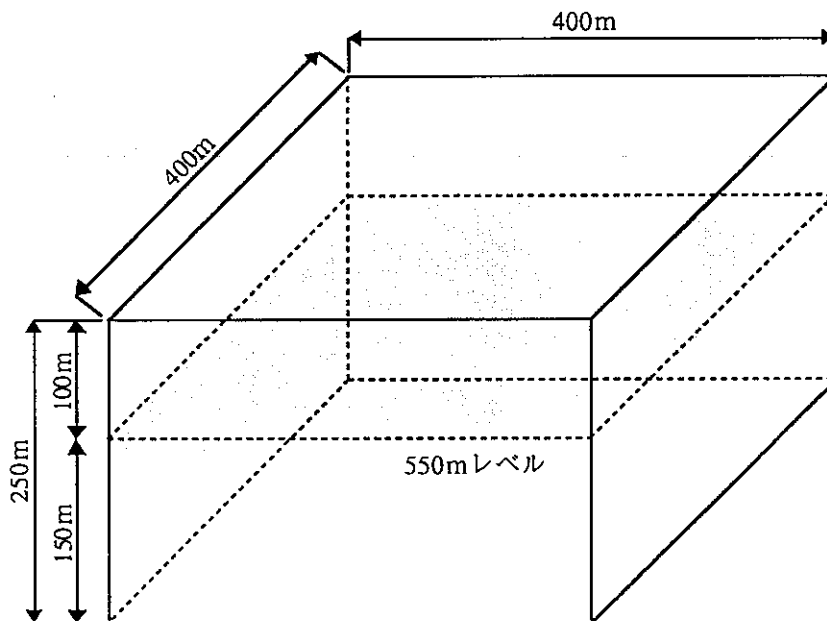


図-6.2.3 解析領域鳥瞰図

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-6.2.4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-6.2.6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-6.2.5参照）は、図-6.2.4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。

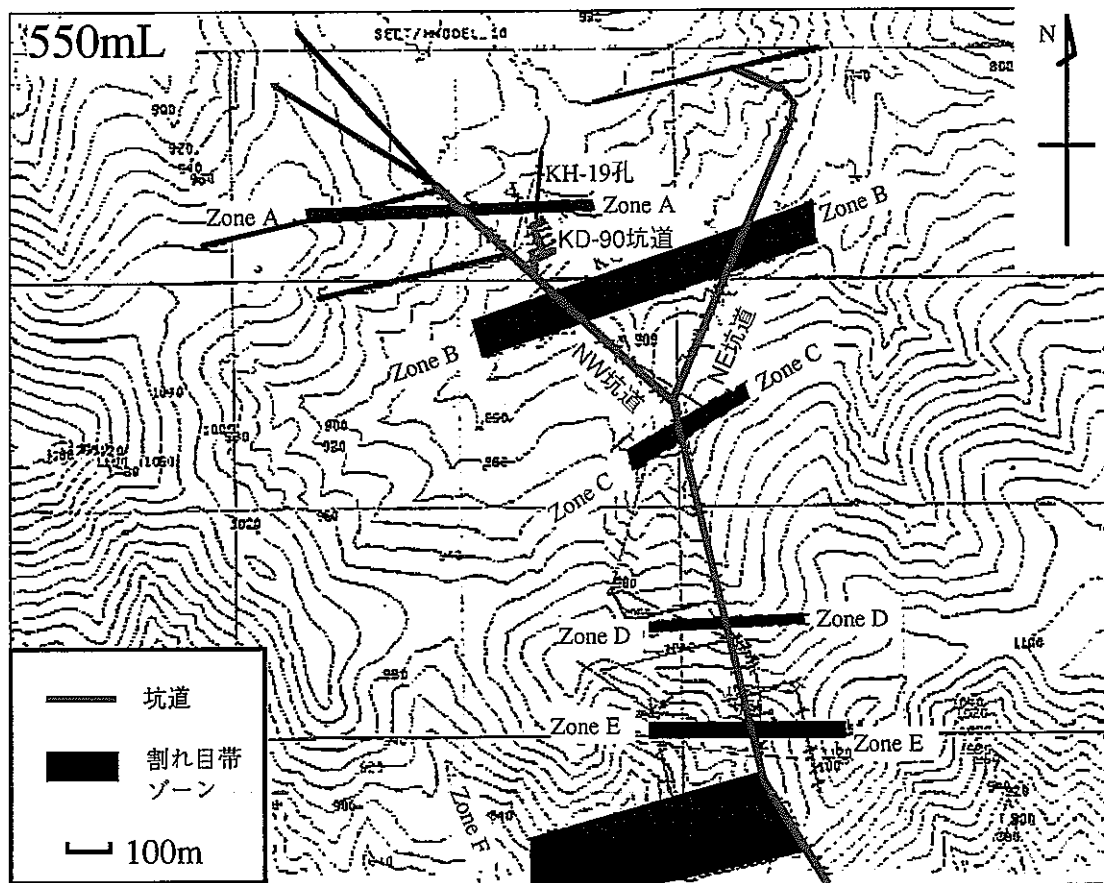


図-6.2.4 リニアメント解析により得られた割れ目ゾーン位置図 (長他、1994)

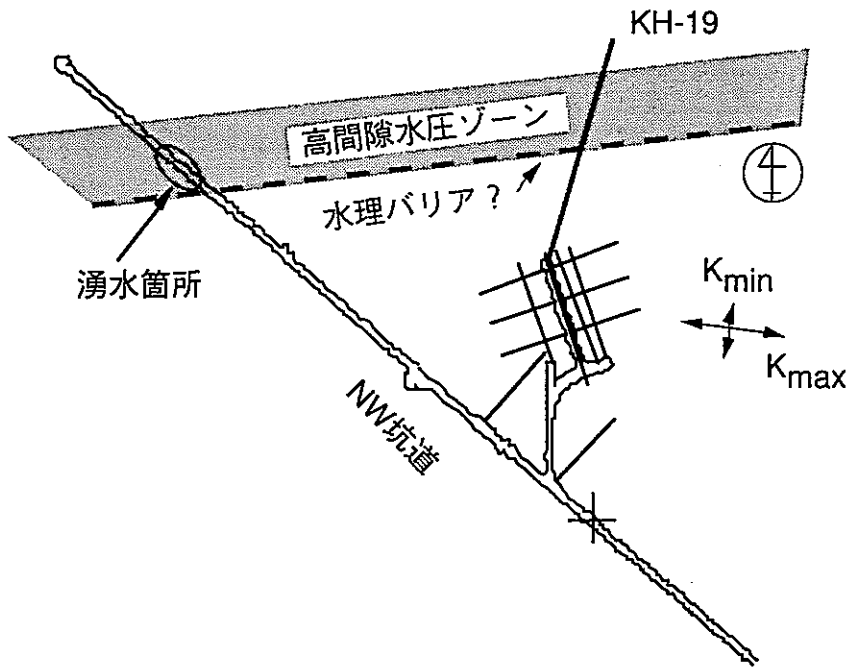


図-6.2.5 高間隙水圧帯の推定位置

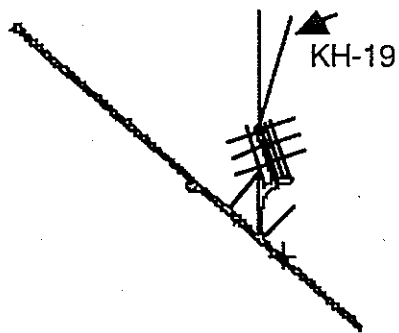
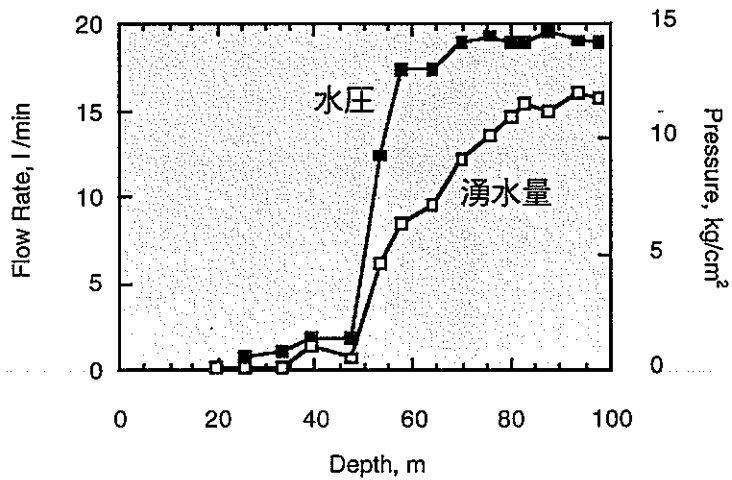


図-6.2.6 KH-19削孔時の間隙水圧と湧水量 (口元)

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、550mレベルから100m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 20kgf/cm^2 の高い水圧が観測されている。そこで、境界条件としては、550m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/cm^2 、その他の境界では 10kgf/cm^2 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-6.2.7）。

- [一般部] 定水位境界： 10kgf/cm^2 (550mレベル)
- [割れ目ゾーン] 定水位境界： 20kgf/cm^2 (550mレベル)

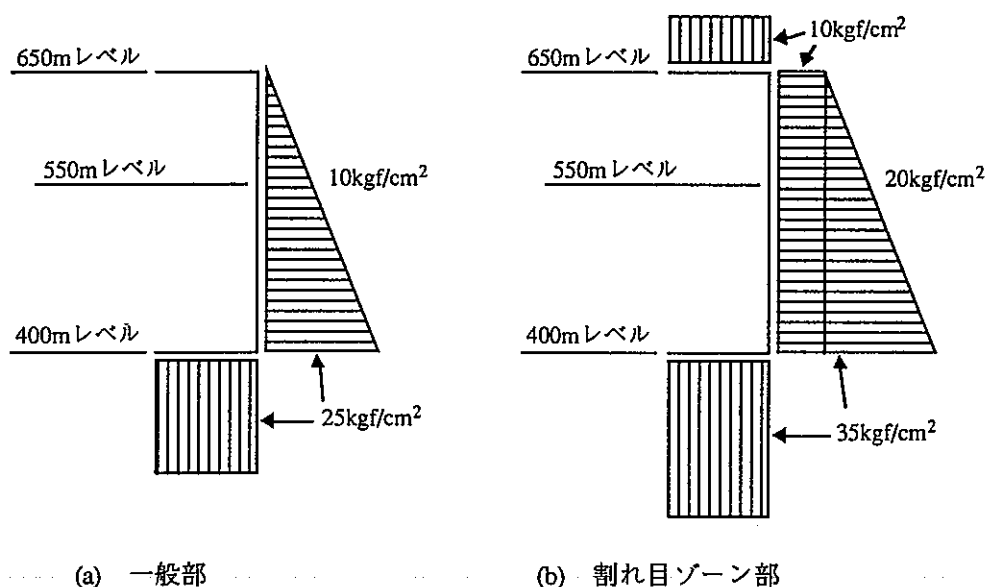


図-6.2.7 定水位境界模式図

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。

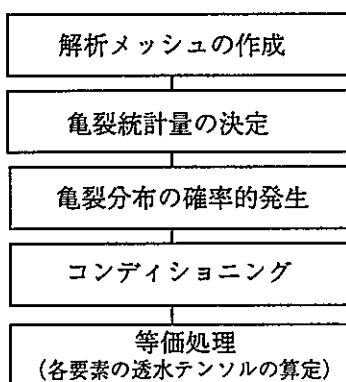


図-6.3.1 等価不均質連続体モデルの作成手順

6.3.2 亀裂分布の発生

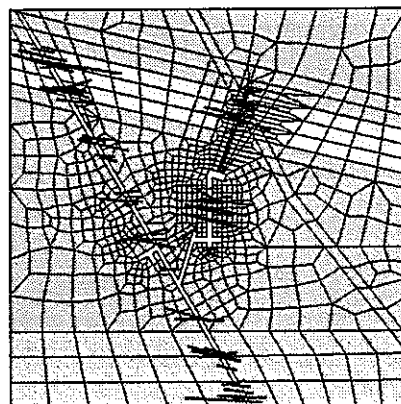
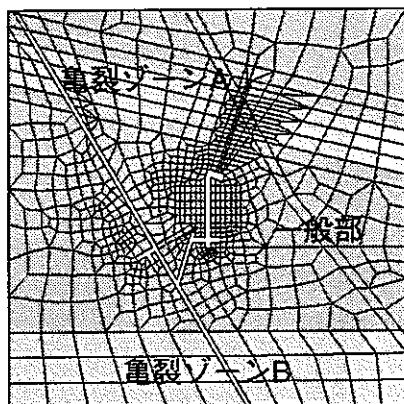
モデルの作成に用いた亀裂の統計分布パラメータを表-6.3.1にまとめた。亀裂分布の発生では、図-6.3.2に示したように、割れ目ゾーン部とその外部（一般部）での亀裂分布特性の違い（水理開口幅）を反映した不均一モデルを作成し、さらに、ボーリング孔や坑道で観察された亀裂を決定論的に加えた（コンディショニング）。作成した亀裂分布モデルの一例を図-6.3.3に示す。

表-6.3.1 モデル作成に用いた亀裂の統計分布とパラメータ

	割れ目ゾーン部	一般部	分布関数
方位分布	平均方位：N55E66N $\kappa_1=-5.7, \kappa_2=-2.7$		Bingham分布
水理開口幅分布	平均：76 [μm]	平均：32 [μm]	負の指数分布
半径分布	平均：8 [m]		負の指数分布
三次元亀裂密度	1.17 × 10 ³ [1/m 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

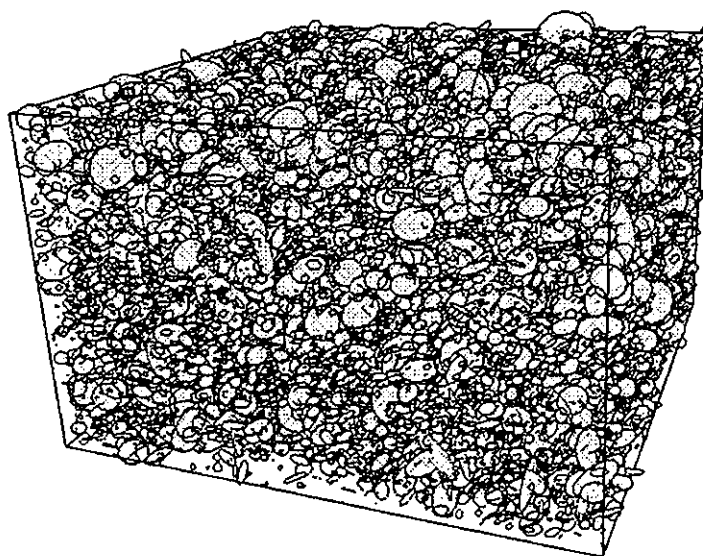


図-6.3.3 発生した亀裂分布の一例

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）。

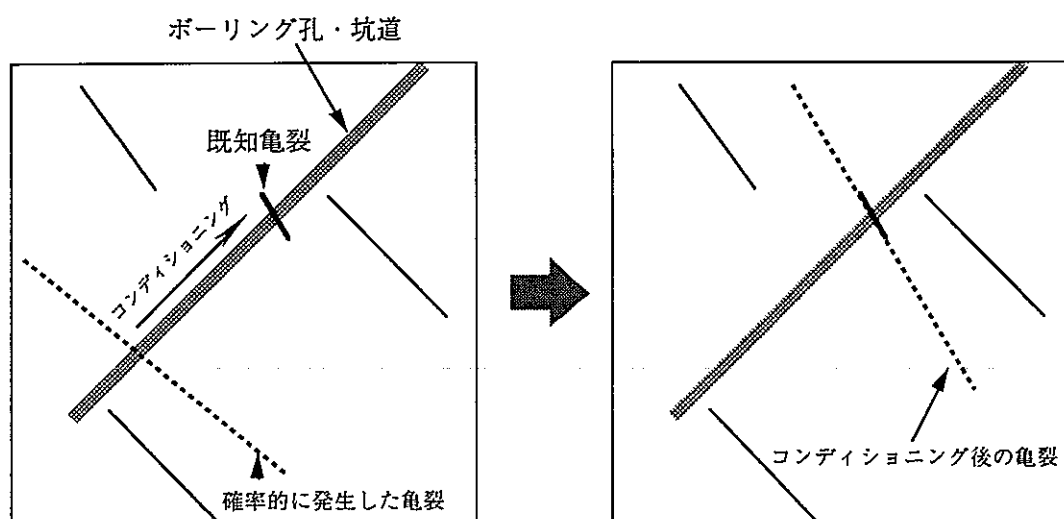


図-6.3.4 亀裂分布のコンディショニング

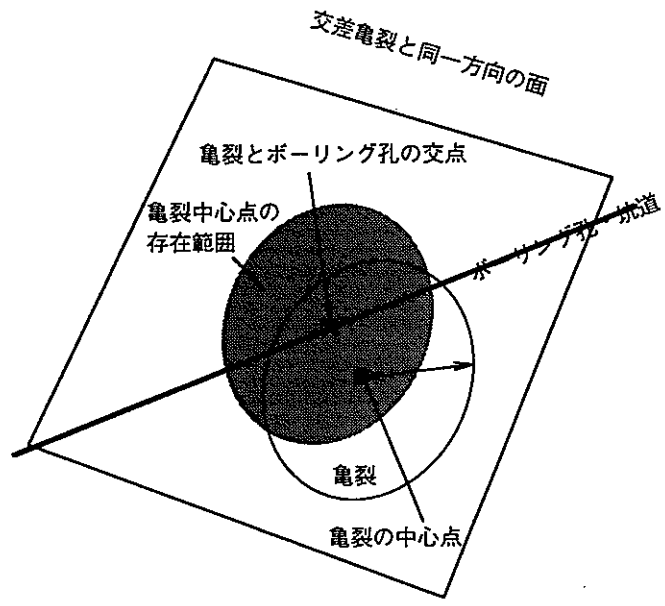


図-6.3.5 コンディショニング時の亀裂中心点の存在範囲
 (中心点位置は、網掛けの範囲内で乱数により決定)

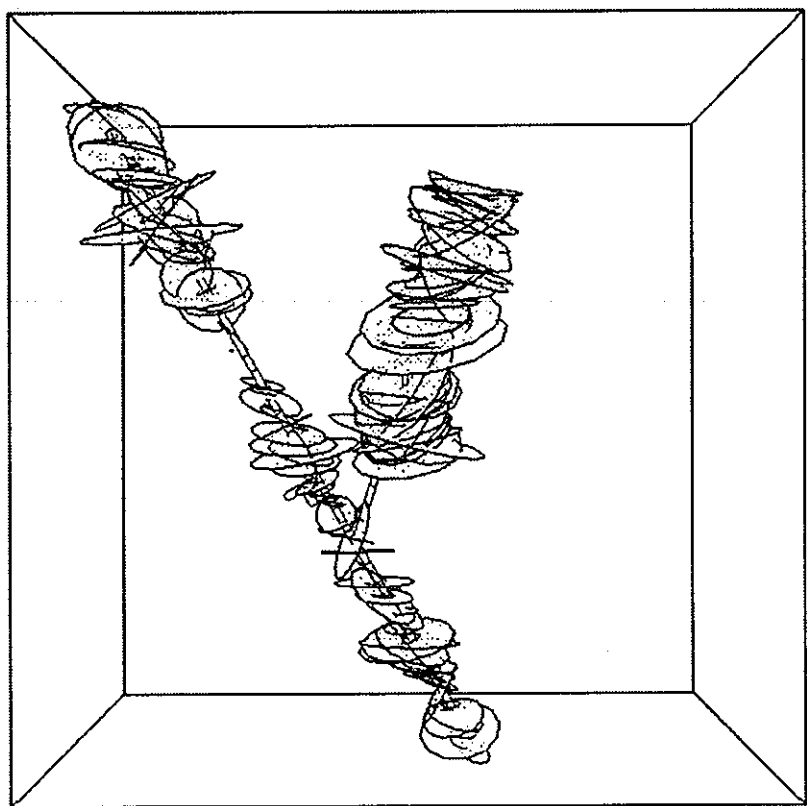


図-6.3.6 コンディショニングにより得られた亀裂分布
 (コンディショニングした亀裂のみを表示)

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として、550 mレベル平面における各要素の平均透水係数 $(= (K_{xx} + K_{yy} + K_{zz})/3)$ の分布を図-6.3.7に示す。

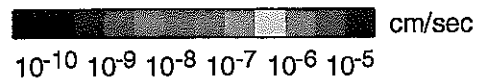
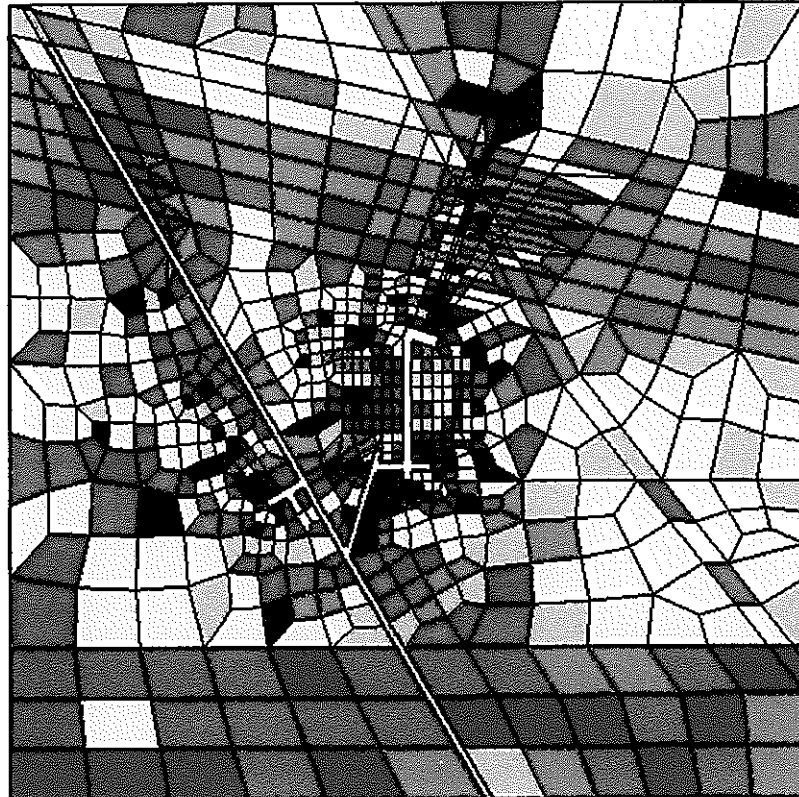


図-6.3.7 等価不均質連続体モデルの平均透水係数分布
(標高550-mレベル平面)

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。

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	6.3節参照

*) 境界条件は標高550mでの水圧

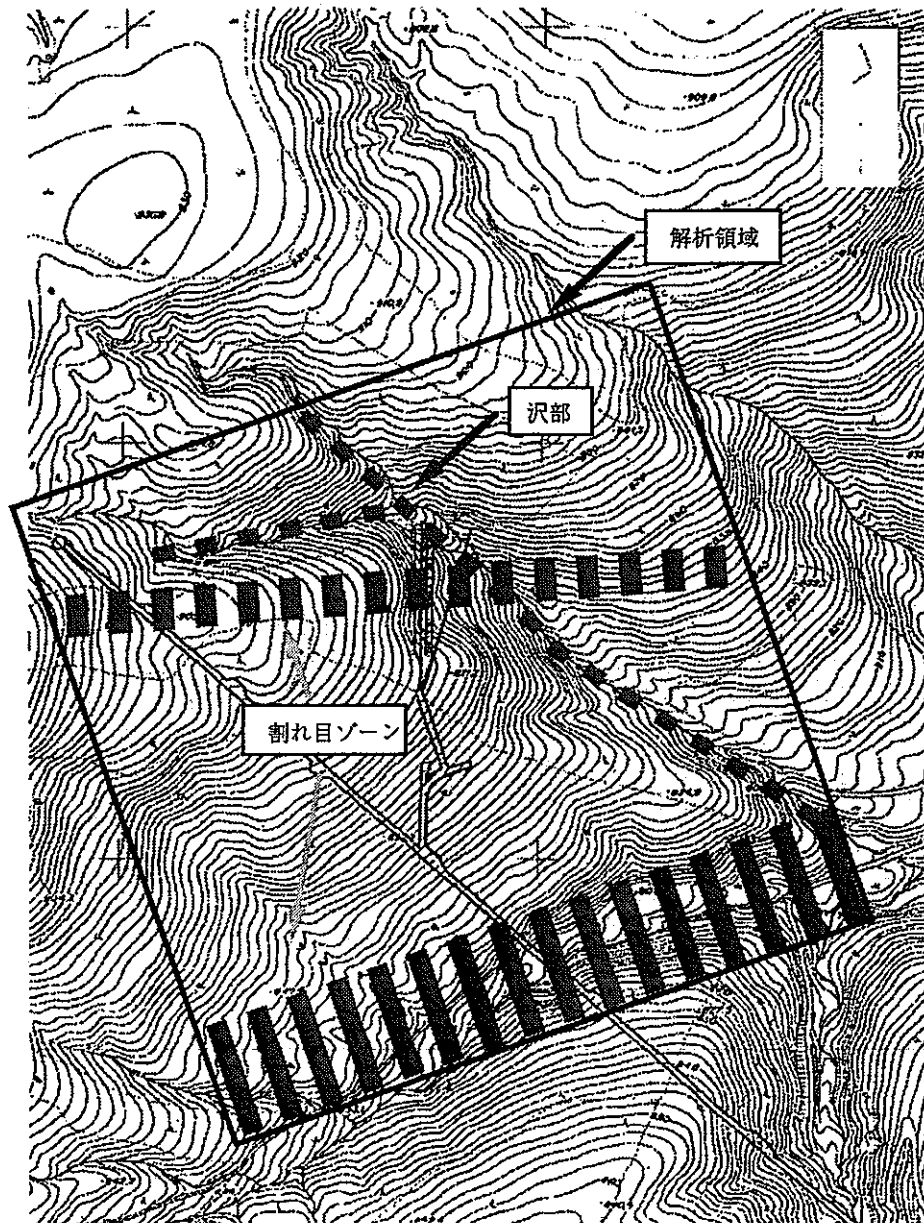


図-6.4.1 解析メッシュで考慮した地形・地質（平面図）

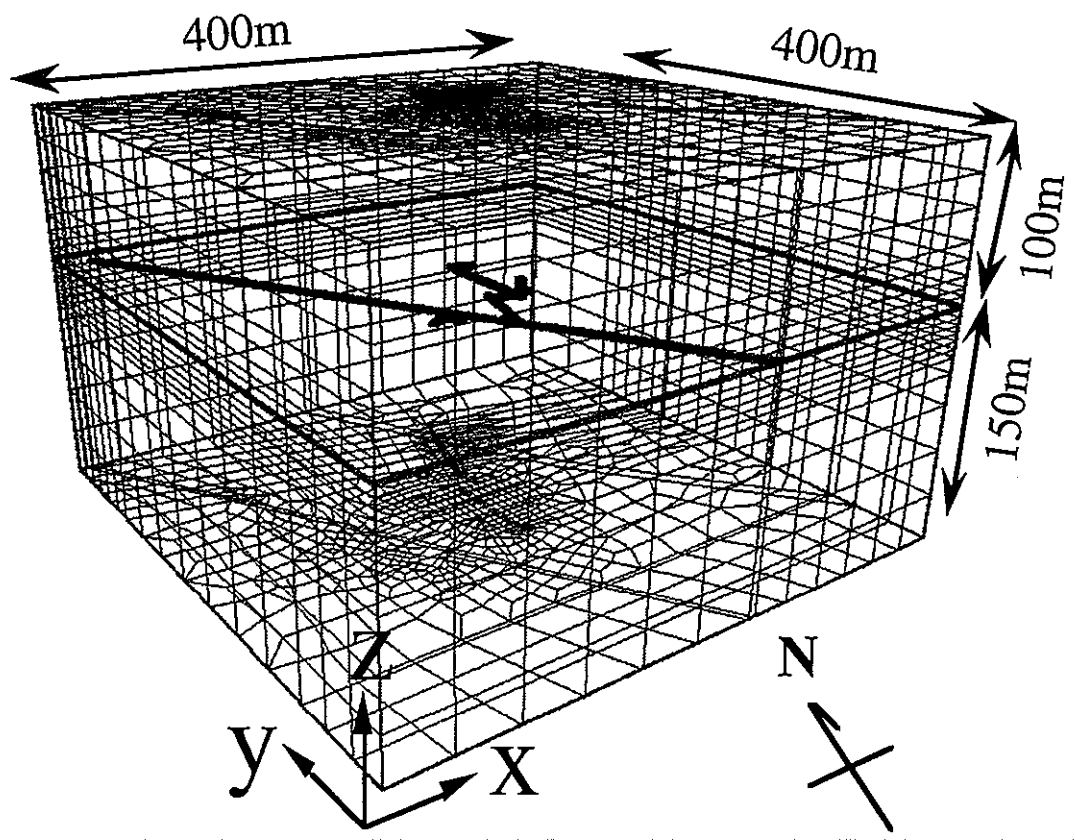


図-6.4.2 解析メッシュ鳥瞰図

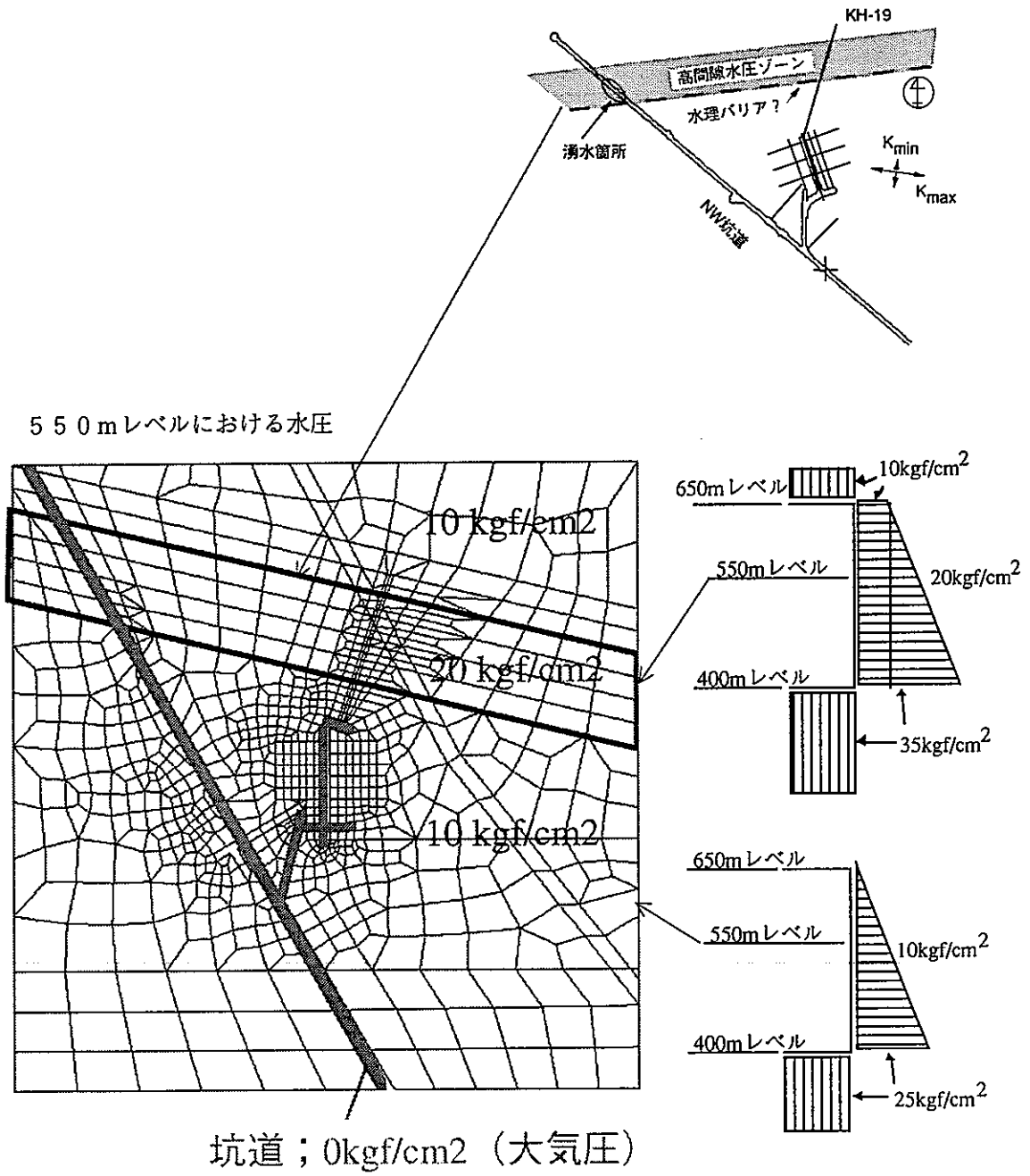


図-6.4.3 境界条件

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-6.4.5および図-6.4.6に示す。両図ともに平成7年度の解析結果と併せて示した。

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。
- ・ 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。

特に本年度の解析結果では、割れ目ゾーンの北端を5 m程度、南へ拡幅したこと、および、割れ目ゾーン内部の亀裂パラメータの見直し（KF-1孔の流量検層結果の反映）により東西方向の水圧伝達が良くなり、その結果、平成7年度と比べて、割れ目ゾーン内における高い間隙水圧が得られている。

(2) 試錐孔内の間隙水圧分布

KD-90坑道周辺のボーリング配置を図-6.4.4に示す。図-6.4.7にKD-90坑道周辺（a～c）、および、高間隙水圧帯内部に位置するボーリング孔（d）における間隙水圧の計算値と実測値の比較を図-6.4.6に示す。KD-90坑道周辺のボーリング孔については、(a) 南北水平方向、(b) 東西水平方向、(c) 鉛直方向毎に各2孔ずつ示した。

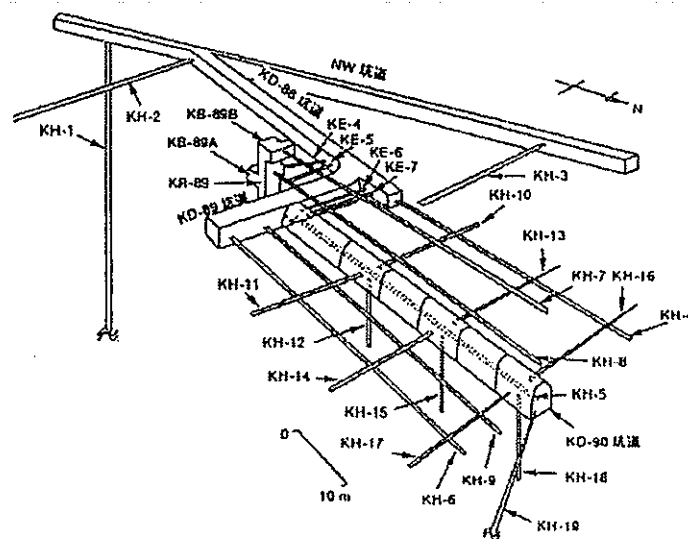
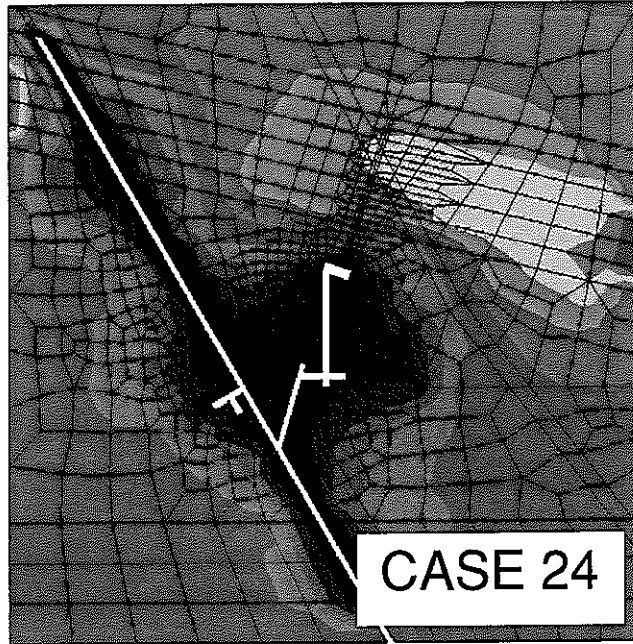
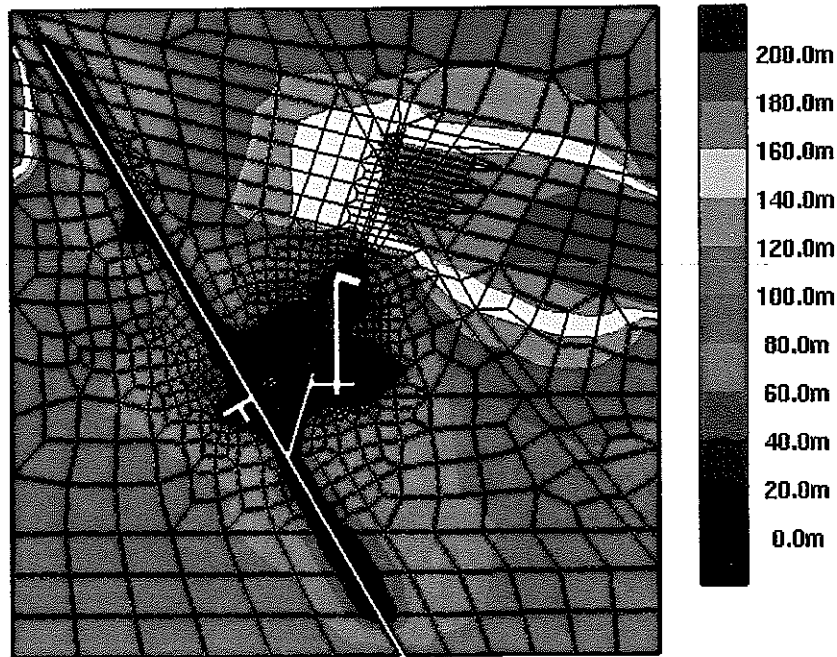


図-6.4.4 KD-90坑道周辺のボーリング孔配置

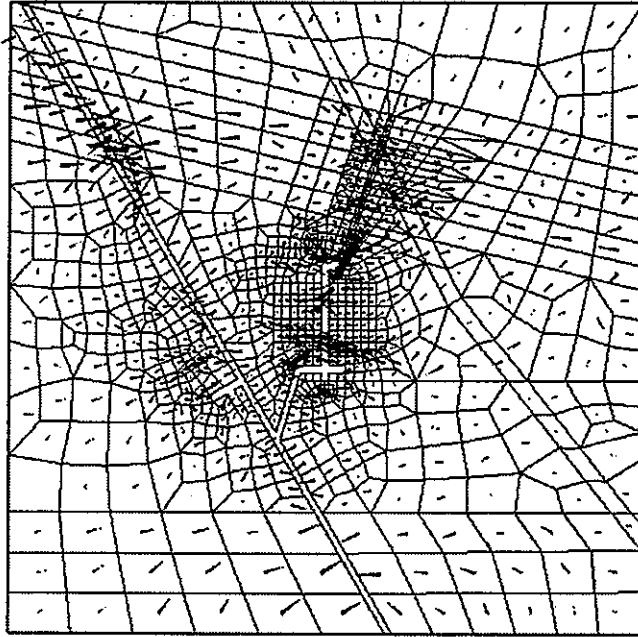


(a) 平成7年度解析結果

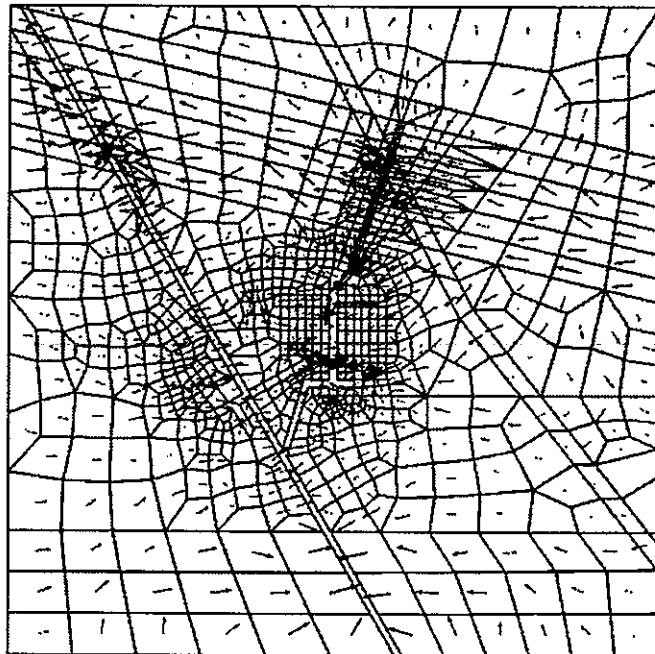


(b) 本年度解析結果

図-6.4.5 順解析結果（標高550mでの間隙水圧分布）



(a) 平成7年度解析結果



(b) 本年度解析結果

図-6.4.6 順解析結果（標高550mでの流速ベクトル分布）

KD-90坑道の壁面から削孔されたボーリング孔内の観測水圧分布（図中a～c）について実測値と比較すると、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。

一方、高間隙水圧帯を貫くように削孔されたボーリング孔内の観測水圧分布（図中d）について実測値と比較すると、実測に近い高間隙水圧が計算結果において得られており、高水圧の出現深度もほぼ一致している。しかしながら、より細かく見ると、KH-20孔の観測水圧において数m程度の水圧観測区間の間で現れる不連続な水圧分布を表現できておらず、メッシュの大きさに規制されたモデルの不均質性の解像度の限界を表しているものと考えられる。

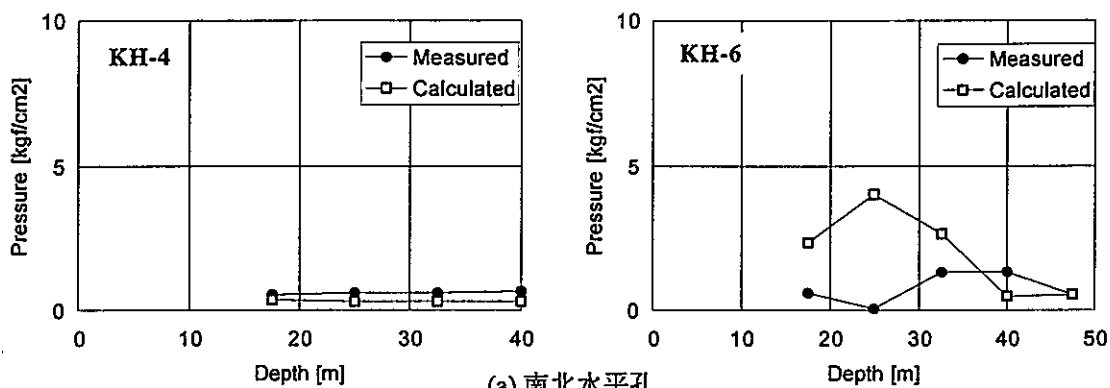
(3) 坑道湧水量

NW坑道において得られている湧水量データを用い、同坑道湧水量の実測値と計算値を比較する。ここでの観測湧水量は、NW坑道中に設けられた2地点での堰流量の観測データ（1990年12月～1994年3月）と亀裂からの滴水量の分布から設定したものであり、その設定の方法については6.5.3節で述べる。坑道湧水量の観測値と計算値の比較を表-6.4.2に示す。

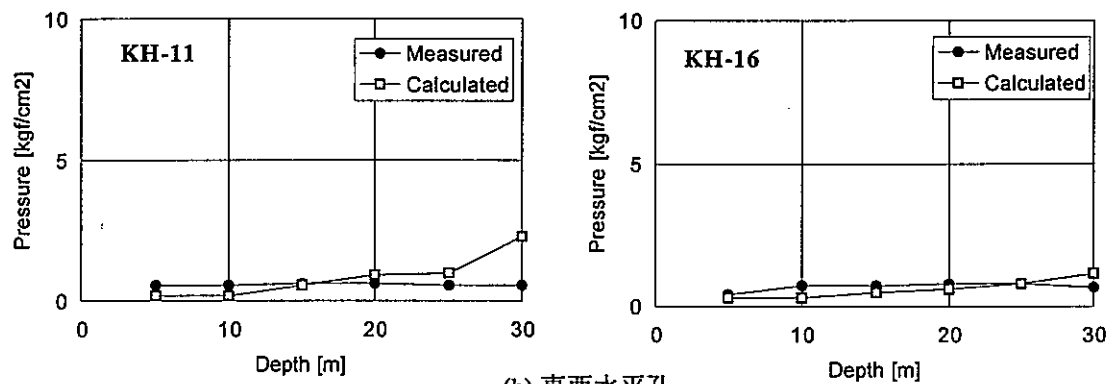
表-6.4.2 NW坑道内湧水量の観測値と計算値

	観測流量	計算流量	
区間 1	54.7	138.2	
区間 2	16.3	4.9	
区間 3	0.7	3.0	
区間 4	118.0	527.8	
合計	189.7	673.9	単位：m ³ /day

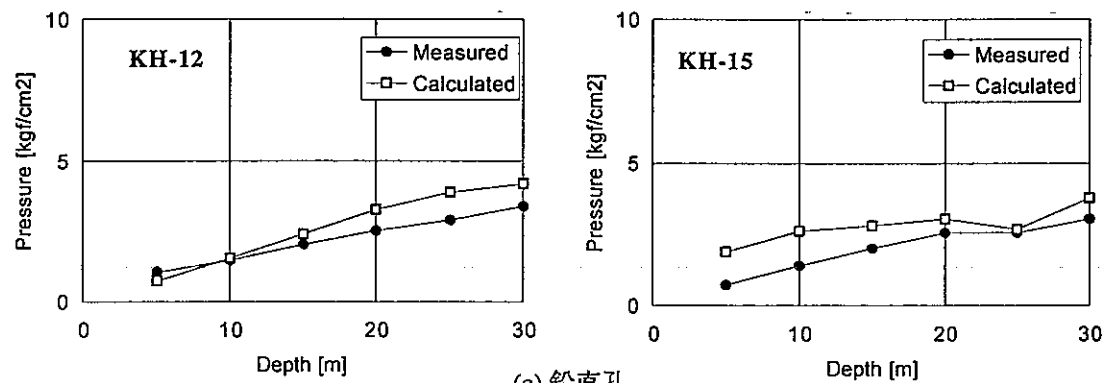
この表より、解析結果の方が観測結果よりも大きくなっていることが分かる。ただし、観測流量は、堰で測定されているため全て湧水量が含まれているとは限らないことから、測定値の信頼性に問題がある可能性がある。なお、次節で述べる逆解析では上記の観測流量を真値として用い、計算値とほぼ一致させた場合のモデルについて検討している。



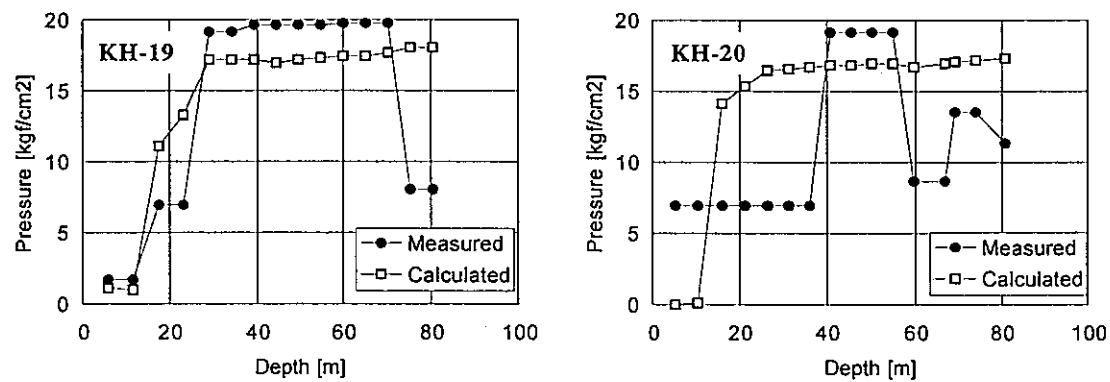
(a) 南北水平孔



(b) 東西水平孔



(c) 鉛直孔



(d) 高水圧帯内部孔

図-6.4.7 間隙水圧の実測値と解析結果

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、

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

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。

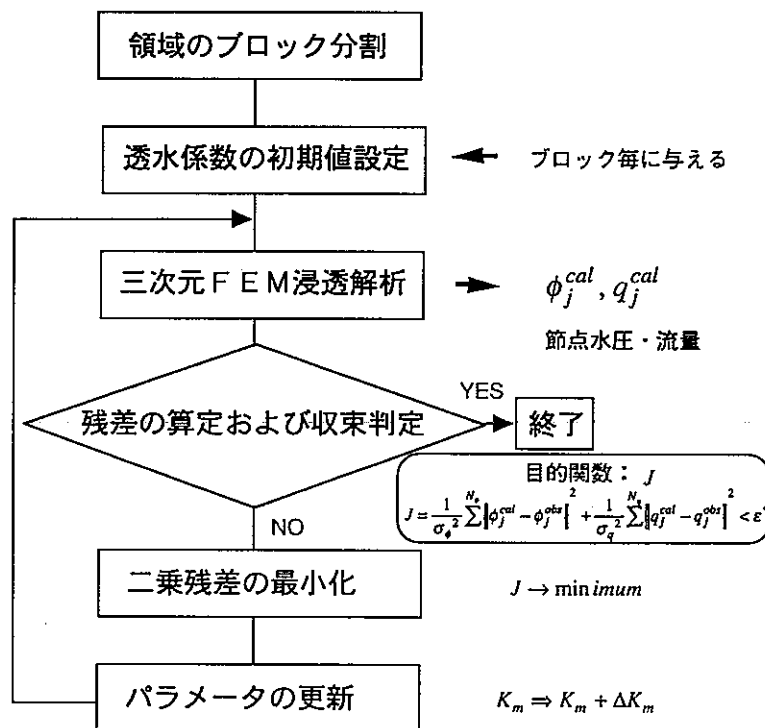


図-6.5.1 逆解析フロー

6.5.2 逆解析の初期モデル

逆解析は、6.3節で作成した等価不均質連続体モデルを初期モデルとして行う。ここで、各要素の透水テンソル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、平均透水係数により $10^{-3} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ の間の6段階（対数）で要素をグルーピングし、2ゾーン×6グループ=12グループに分割し、各グループ内で平均透水テンソルの主透水係数比および主軸方向は既知として固定した。これにより、逆解析では、各グループの平均透水係数（12個）が未知数となる。

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	54.7	24.0
区間 2	365～505	16.3	96.0
区間 3	505～620	0.7	80.0
区間 4	620～710	118.0	56.0
合計	300～710	189.7	256.0

* 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。

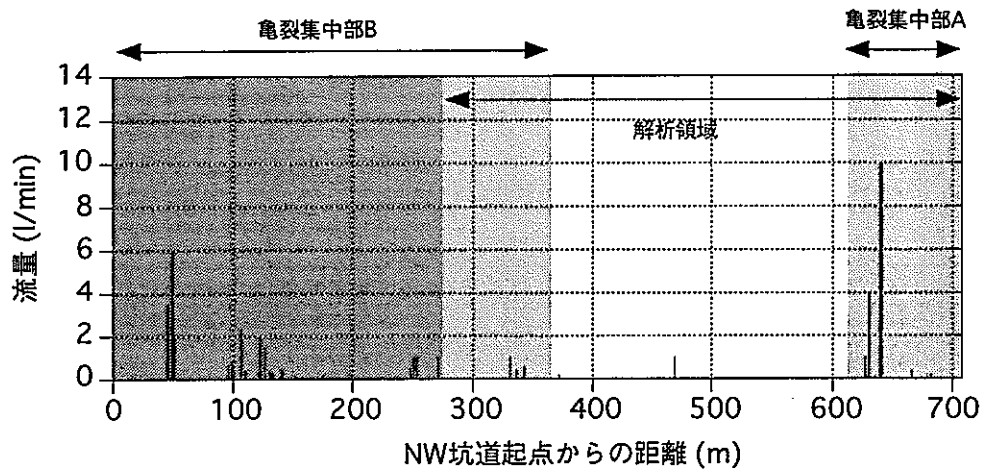


図-6.5.2 亀裂滴水量の分布 (NW坑道)

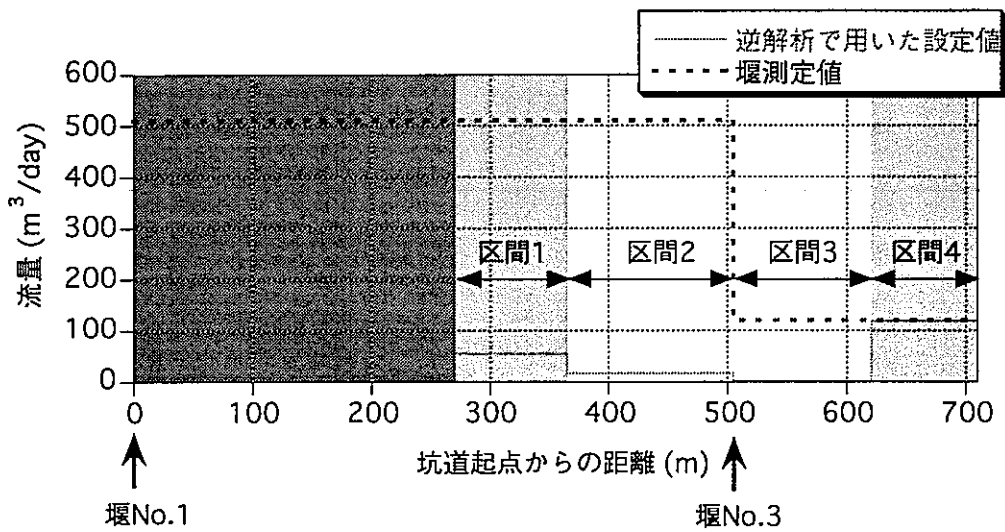


図-6.5.3 NW坑道の堰流量と逆解析の設定流量

6.5.4 逆解析結果

(1) 透水係数の変化

逆解析に伴う各グループの平均透水係数 $(K_{xx}+K_{yy}+K_{zz})/3$ の変化グラフを図-6.5.4に示す。ここで、501～512は要素を平均透水係数毎に分けたグループ番号を示しており、平均透水係数の高い順に、501～506が一般部、507～512が割れ目ゾーン部である。図-6.5.5に、順解析と逆解析後の550mレベルにおける平均透水係数分布を示す。

一般部について見ると、各グループの平均透水係数は、501を除いて、全体的に $10^6 \sim 10^7$ [cm/s]の間の釜石鉱山における平均的な透水係数へ収束していることが分かる。一方、割れ目ゾーン部では、全体的に1オーダー程度づつ透水係数が低下している。

今回の逆解析では透水係数グループの分布を固定しているため、透水係数の変化は水圧よりも流量により大きく規制されるものと考えられる。今回、逆解析の既知流量として用いたNW坑道4区間の湧水量では、割れ目ゾーン部と一般部の湧水量の違いは反映されているものの、解像度的にゾーン内部での不均一性を表せていない。従って、情報の不足により、一般部の透水係数が平均的（均一的）に評価されたものと考えられる。割れ目ゾーン部の逆解析では、順解析で得られた多くの湧水量を実測に合わせるように、全体的な透水係数を低下したのと考えられる。

(2) 550mレベルにおける全般の水理状況

逆解析により得られた550mレベル平面の水圧分布および流速ベクトル分布を、順解析結果とともに示す。水圧分布を見ると、逆解析により割れ目ゾーン部の透水係数が低下したことから、高水圧の東西方向の伝達が悪くなり、アクセス坑道北側のボーリング孔（KH-19～KH-25孔）での水圧が低下している。流速ベクトルについても同様に割れ目ゾーン部の流速が低下しているのが分かる。KD-90坑道周辺の水圧低下域については、逆解析の前後で大きな変化は見られない。

(3) 坑道区間湧水量と孔内水圧の変化

孔内水圧の変化を図-6.5.5に示す。ここに見られるように、孔内水圧に関しては逆解析による明瞭な改善は見られない。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。表-6.5.2に、逆解析の結果得られたNW坑道内湧水量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

は実測湧水量と一致しているのが分かる。

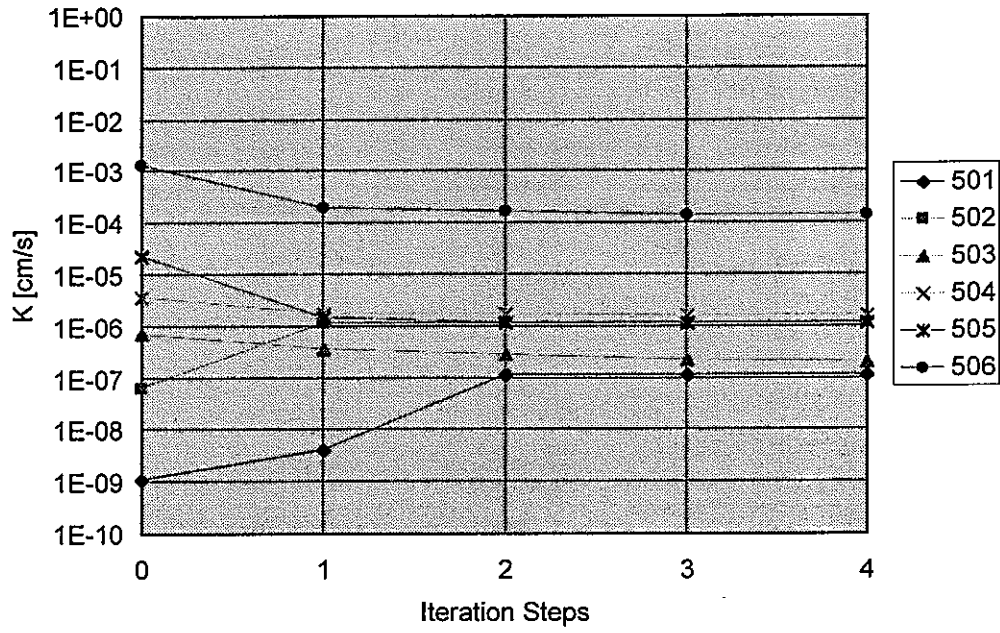
表-6.5.2 NW坑道内湧水量の観測値と計算値 単位：m³/day

坑道区間	観測流量	計算流量	
		順解析	逆解析後
区間 1	54.7	138.2	52.7
区間 2	16.3	4.9	10.4
区間 3	0.7	3.0	→ 13.6
区間 4	118.0	527.8	137.4
合計	189.7	673.9	214

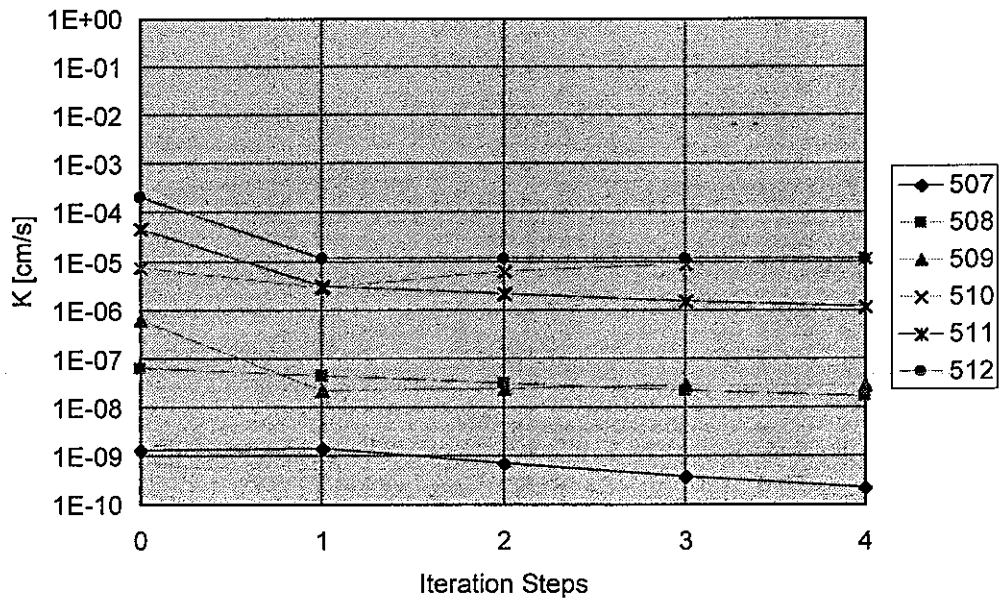
図-6.5.9 (b)にNW坑道に沿って得られた節点流量の分布を示す。これを見ると、坑道湧水量の不均一な分布が得られていることが分かる。これは、同図(a)に示す開口亀裂をコンディショニングした結果、開口度の高い割れ目の集中する部分での湧水量が多くなっているためである。図-6.5.9(b)中に坑道壁面からの亀裂滴水量の実測値の分布を併せて示したが、解析結果の湧水量分布と比較して湧水ピークの場所的な一致が見られる。

(3) 平成7年度の逆解析結果との比較

図-6.5.9に本年度と平成7年度の逆解析結果の比較を示す。本年度の順解析においては、平成7年度と比べて割れ目ゾーン部における東西方向の水圧伝達が良くなったが、逆解析では本年度と平成7年度の大きな違いは見られない。逆解析で用いた観測データが両年度で同一であるため、逆解析結果もほぼ同様になっている。

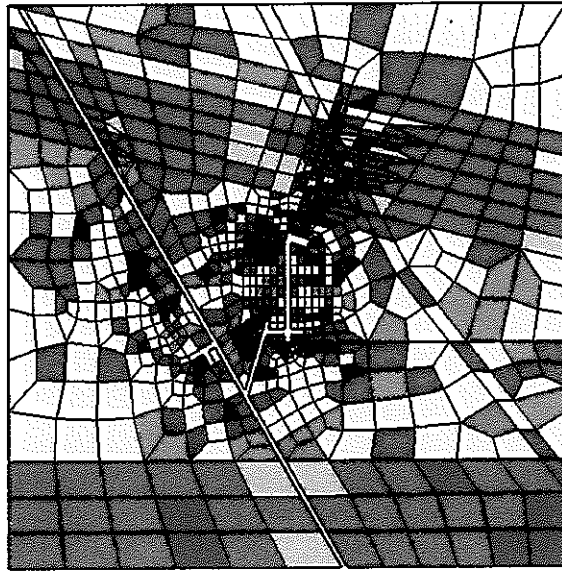


(a) 一般部

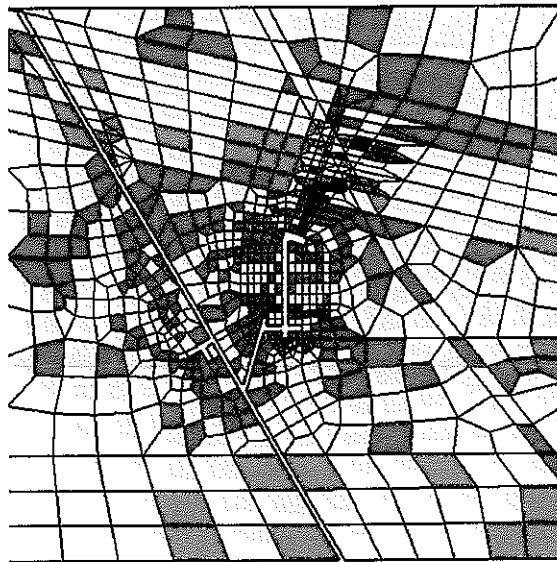


(b) 割れ目ゾーン部

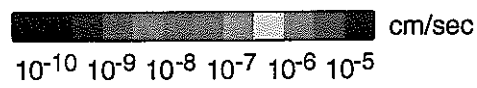
図-6.5.4 逆解析ステップに伴う透水係数変化



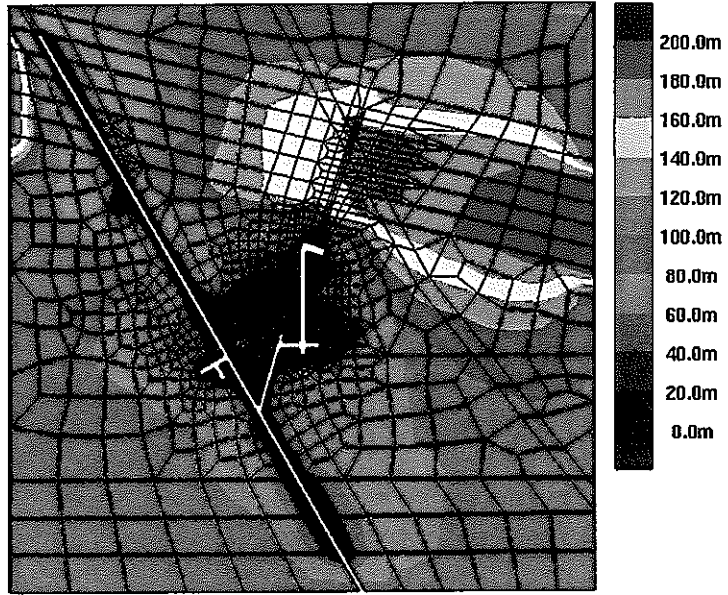
(a) 逆解析前



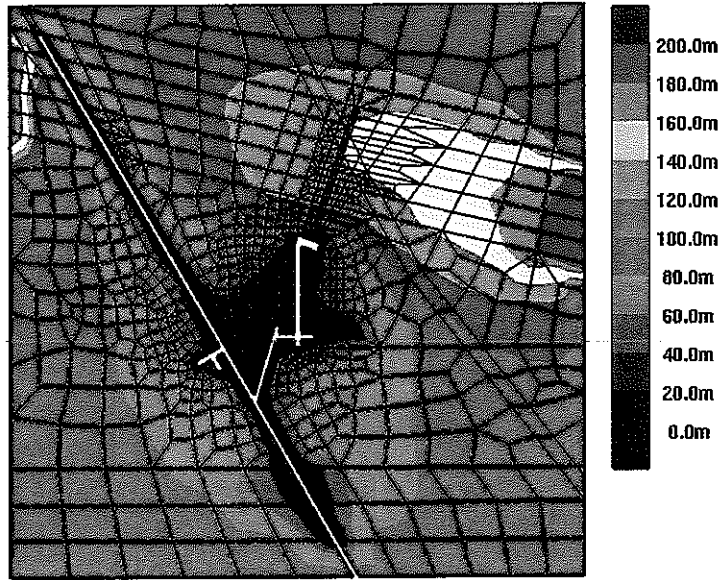
(a) 逆解析後



図=6.5.5 逆解析による透水係数の変化
(550 mレベル平面における平均透水係数の分布)

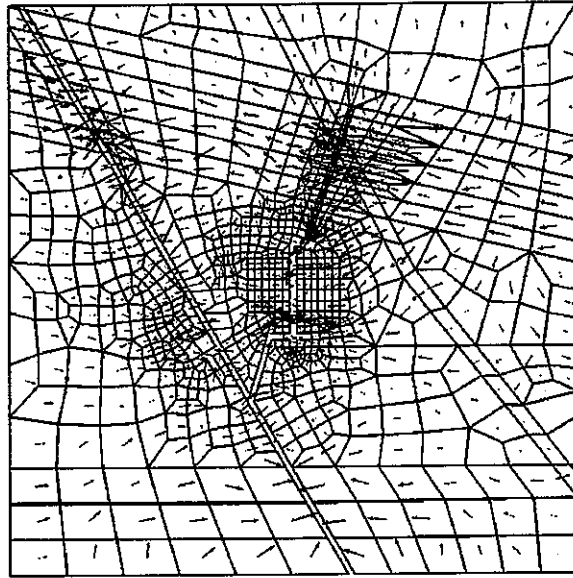


(a) 順解析結果

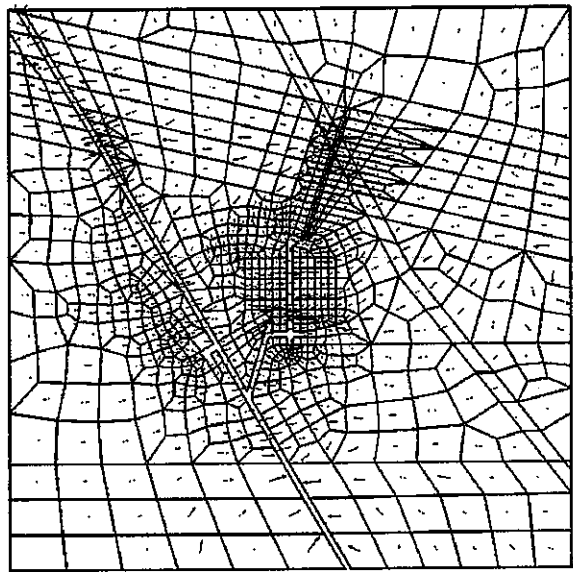


(b) 逆解析結果

図-6.5.6 逆解析による水圧分布の変化
(550mレベル平面における水圧)

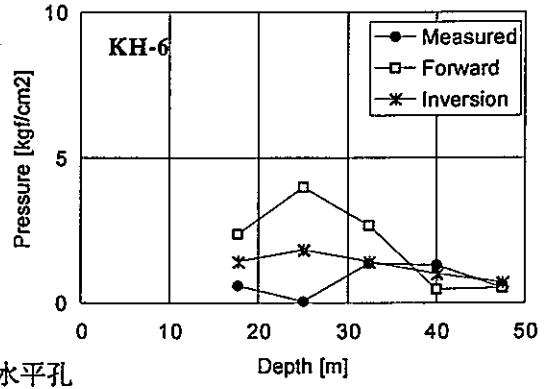
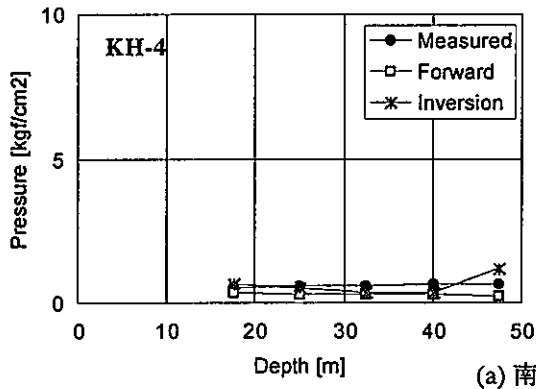


(a) 順解析結果

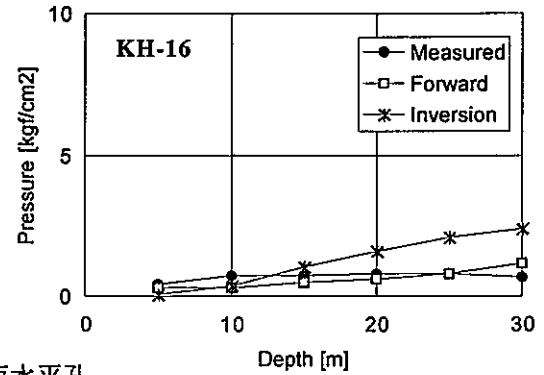
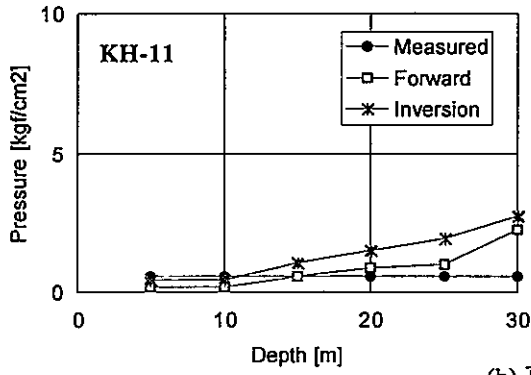


(b) 逆解析結果

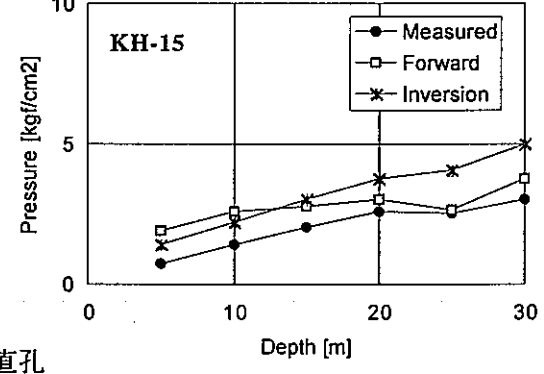
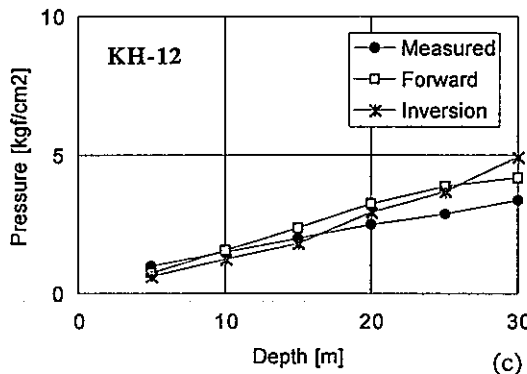
図-6.5.7 逆解析による流速ベクトル分布の変化
(550mレベル平面)



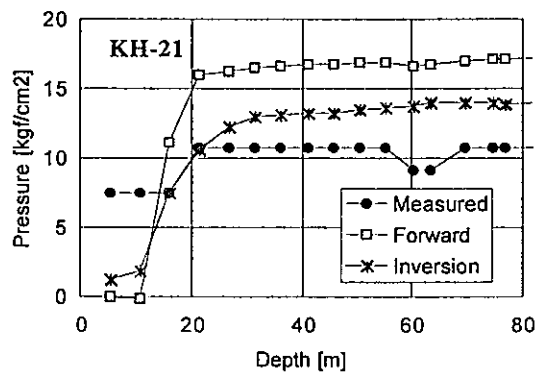
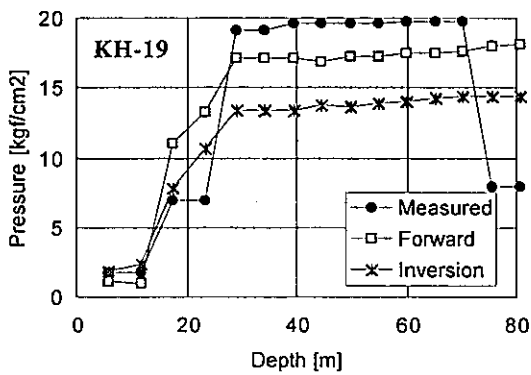
(a) 南北水平孔



(b) 東西水平孔

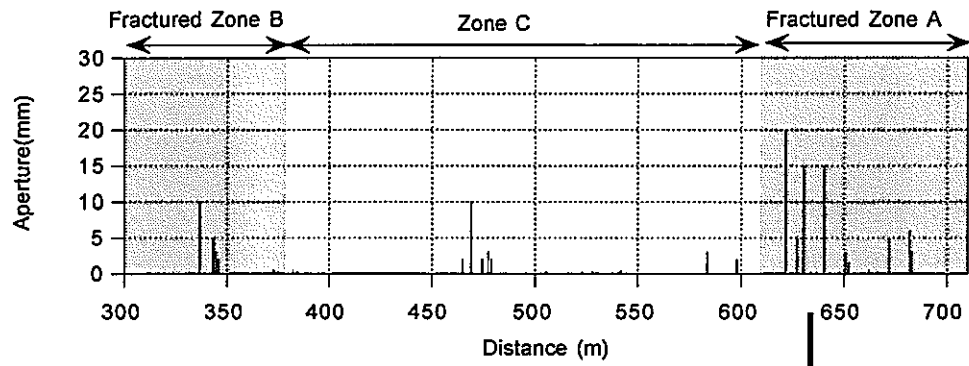


(c) 鉛直孔

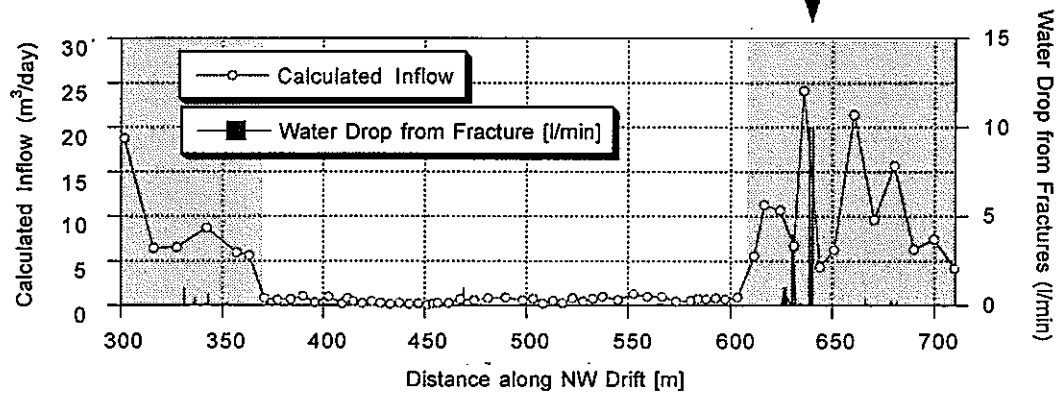


(d) 高水圧帯内部孔

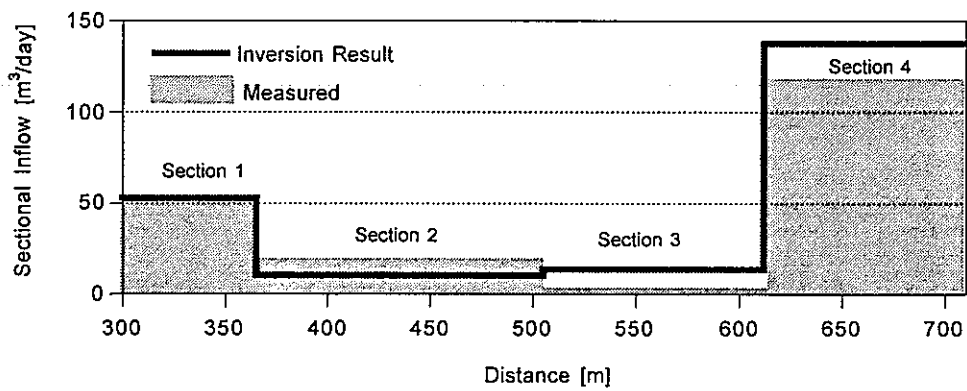
図-6.5.8 間隙水圧の実測値と逆解析結果



(a) 亀裂開口幅の分布

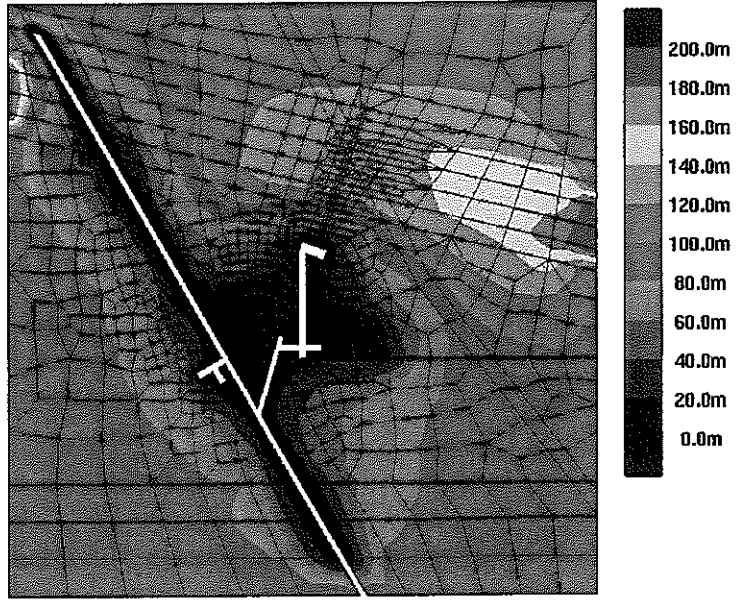


(b) 逆解析後の計算流量の分布

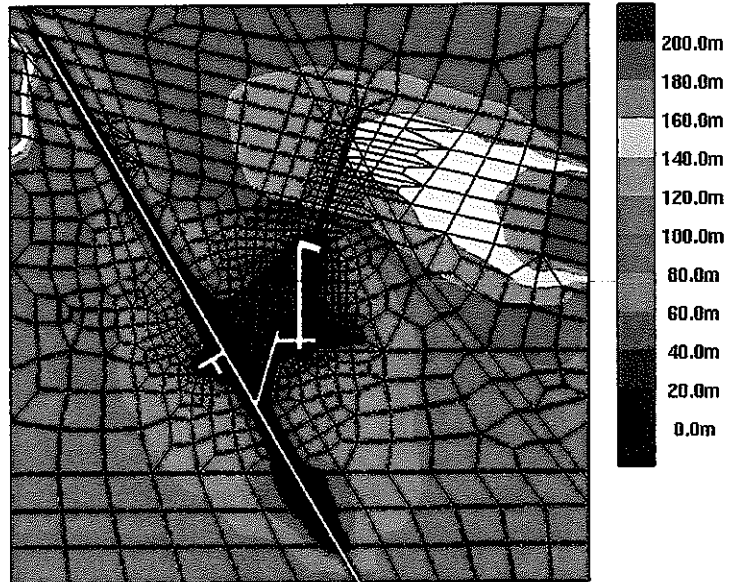


(c) 逆解析後の区間流量の実測と計算値の比較

図-6.5.9 NW坑道湧水量（逆解析結果と実測の比較）



(a) 平成7年度 逆解析結果



(b) 本年度 逆解析結果

図-6.5.10 平成7年度逆解析結果との比較
(5.50mレベル平面での水圧)

7 まとめと考察

7.1 等価不均質連続体モデルがもつ特性に関する検討

(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を、釜石鉱山内の原位置データによる同一の亀裂分布パラメータを用いて作成して浸透流解析を行い、以下の項目について検討した。

- ・解析領域の大きさによる等価透水係数のスケール効果
- ・等価不均質連続体モデルにおいて固有の問題となるメッシュサイズの影響

その結果、以下のことが示された。

- ・いずれのモデルにおいても、スケール20～40m程度で標準偏差の減少傾向がゆっくりとなり、このスケールは、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（30m弱）とほぼ対応する。
- ・釜石鉱山の亀裂分布に対しては、スケール40m以上であれば、不連続体モデルと等価不均質連続体モデルの透水係数の標準偏差はほぼ一致し、等価不均質連続体モデルが不連続体モデルと同程度の不均質性を表現できる。
- ・スケール40m以下においても、等価不均質連続体モデルのメッシュを細かくすることにより、ある程度まで不連続モデルに近づけることが可能である。

(2) 亀裂パラメータの感度解析

釜石鉱山の亀裂パラメータを基本とし、平均開口幅、平均半径、1次元密度などの亀裂パラメータの差異が解析結果に及ぼす影響を数値解析により調べた。具体的には、立方体領域における浸透流解析を亀裂パラメータを変化させながら行い、等価な透水係数の分布の変化を調べた。

その結果によれば、いずれのパラメータも、透水係数とその分布、ひいては浸透流解析の結果に大きく影響することが示された。従って、本解析で採用しているように、透水試験のシミュレーションによる実測透水係数とのマッチングや逆解析的手法によるモデルのキャリブレーションが必要不可欠であると考えられる。

7.2 解析モデルの改良

7.2.1 亀裂統計量の見直し

(1) 亀裂の方位分布

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。

(2) 亀裂の半径分布

亀裂の半径分布について、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、数値シミュレーションにより、実測の透水係数分布を再現する平均半径を決定した。KF-1孔およびKH-5孔の透水試験データに対するシミュレーションの結果は、実測の透水係数分布をよく再現しており、いずれの孔とも平均半径は8 mと評価された。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。

(3) 割れ目ゾーン部の透水性 (KF-1孔流量検層のシミュレーション)

平成7年度以降に得られたKF-1孔の流量検層データを追加し、透水試験のシミュレーションを行った。KF-1孔は割れ目ゾーン部に位置し、その平均透水係数は、一般部に位置するKH-5孔に比べて1オーダー程度大きい。シミュレーション結果によれば、前者の平均水理開口幅は後者の2倍程度大きいものと評価された (KF-1孔：73 [μm]、KH-5孔：31[μm])。本解析では、KF-1孔、KH-5孔で得られた平均水理開口幅を各々、割れ目ゾーン部、一般部の代表値として用いることとした。

7.2.2 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南限が若干北側にずれていたため、割れ目ゾーンの南限を15 m程度南側へ移動し、割れ目ゾーンの幅を拡げた。また、透水性に関しては、7.2.1(3)に述べたKF-1孔の流量検層データを反映した値を用いた。

7.3 改良した解析モデルによる三次元岩盤浸透解析

7.3.1 順解析結果

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。

(1) 高間隙水圧帯

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。

今回の解析では、割れ目ゾーンの幅および割れ目ゾーンの亀裂パラメータの見直しにより、東西方向の水圧伝達が向上し、KD-90坑道北側の高水圧は18 [kgf/cm²]程度と、前回よりも実測値に近い値が得られた。

(2) KD-90坑道周辺

KD-90坑道周辺には広い範囲の水圧低下域が認められる。本年度の解析においても、平成7年度解析と同様に同坑道周辺の水圧低下が表現された。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。

(3) NW坑道湧水量

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定性的に表現することができた。ただし、堰の流量から設定した観測湧水量よりも3倍程度の多くの流量が得られた。ただし、堰の流量測定では、必ずしも全湧水量が測定されているとは限らず、測定値に問題がある可能性も考えられる。

7.3.2 逆解析結果

(1) 透水係数の変化

逆解析による透水係数の更新に伴い、初期透水係数値に対して全体的に透水係数が均一化し、割れ目ゾーン部においては透水係数が低下するように変化した。前者の理由として、坑道湧水量の観測値が4区間と粗いために、情報量の不足から透水係数が

平均的に評価されたことが考えられる。また、後者の理由としては、NW坑道湧水量の順解析結果（初期値）が実測値に対して多いため、それを低減させるために透水係数が低下したものと考えられる。特に、逆解析で得られた岩盤の透水係数分布を平均化する傾向は、逆解析で求められる不均質性の程度に応じた坑道湧水量や水圧観測のデータの量・解像度が必要であることを示している。

(2) 湧水量・水圧の変化

順解析では3倍程度の違いが見られたNW坑道に沿った実際の湧水量坑道湧水量に関し、逆解析を用いることにより、定量的にかなり良い一致が見られた。

逆解析の結果、最終的に得られた透水係数・水圧分布は、平成7年度とほぼ同様になった。これは、用いた観測値が平成7年度とほぼ同一であるためと考えられる

以上のことから、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。また、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、対象領域内部の地下水流動をある程度説明できる水理地質構造概念モデルおよび解析モデルを構築することができた。

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7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。

3年間にわたる解析研究により、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、対象領域内部の地下水流動をある程度説明できる水理地質構造概念モデルおよび解析モデルを構築することができた。 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、山本：等価不均質連続体モデルによる釜石鉍山原位置試験場周辺の地下水解析、第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 1997.
- 下茂、山本：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、澤田：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：釜石鉍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, 日鉄鉍業株式会社, 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.