

本資料は~~2005~~年 ~~2~~月 ~~20~~日付で登録区分  
変更する。

【施設技術グループ】

# 釜石鉱山における岩盤浸透流解析 に関する研究

(平成 7 年度)

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1996年3月

大成建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

~~この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意してください。~~

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

—動力炉・核燃料開発事業団—

環境技術開発本部

地層科学的研究グループ



限 定 資 料  
PNC ZJ1205 96-006  
1996年 3月

## 釜石鉱山における浸透流解析に関する研究

(平成7年度)

下茂道人\*、井尻裕二\*  
山本 肇\*、上村佳司\*\*  
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、今年度においては、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うとともに、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る。解析結果によれば、原位置の調査・試験データを多く反映することにより、前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。

---

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

契約番号：070D0388

事業団担当部課室および担当者：環境技術開発本部、地層科学研究グループ、武田精悦

\*：大成建設（株）技術研究所、 \*\*：大成建設（株）土木設計部、 \*\*\*：大成建設（株）エネルギー部

登録区分  
2005.7.20  
変更表示

~~COMMERCIAL PROPRIETARY~~

PNC ZJ1205 96-006

March 1996

## Groundwater Flow Analysis at Kamaishi Mine (H7)

Michito Shimo\*, Yuji Ijiri\*  
Hajime Yamamoto\*, Keiji Uemura\*\*  
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 planed 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 this year, 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.

As result, it was shown that by taking the in-situ hydrogeologic information into account, 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.

---

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

PNC Liaison :Seietsu Takeda, Geoscience Research Program, Power Reactor and Nuclear Fuel Corporation

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

\*\*\*: Engineering Department, Taisei Corporation

## 目 次

1 はじめに .....	1
2 研究概要 .....	4
2.1 研究内容 .....	4
2.2 地形・地質概況 .....	8
2.3 解析の全体フロー .....	12
3 等価不均質連続体モデル化手法 .....	13
3.1 概要 .....	13
3.2 岩盤浸透流解析モデルの分類 .....	15
3.3 モデル化手法 .....	18
3.4 モデル作成のフロー .....	20
4 解析領域および境界条件の設定 .....	21
4.1 解析領域の設定 .....	21
4.1.1 側方境界 .....	21
4.1.2 上部・下部境界 .....	24
4.2 解析領域のゾーニング .....	25
4.3 境界条件の設定 .....	29
5 割れ目ゾーンモデルの作成 .....	30
5.1 透水特性の設定 .....	30
5.2 割れ目ゾーンモデルの作成 .....	31
6 不均質等価不連続体モデルの作成 .....	32
6.1 モデル作成手順 .....	32
6.2 亀裂分布モデル .....	33
6.3 亀裂統計量の決定 .....	34
6.3.1 方位分布 .....	35
6.3.2 開口幅分布と一次元密度 .....	36
6.3.3 直径分布 .....	40
6.3.4 3次元亀裂密度 .....	46
6.3.5 亀裂統計量のまとめ .....	47
6.4 水理学的開口幅の決定 .....	48

6.5 コンディショニング	49
6.6 等価不均質連続体モデルの作成	51
6.6.1 クラックテンソルにより求めた平均的な透水異方性	51
6.6.2 モデル作成結果	52
 7 定常3次元浸透流解析	 55
7.1 解析手法	55
7.2 解析メッシュ	55
7.3 解析ケース	55
7.4 解析結果	58
7.4.1 解析領域全般の水理状況	58
7.4.2 試錐孔内の間隙水圧分布	65
 8 逆解析による3次元透水係数分布の推定	 72
8.1 逆解析手法	72
8.2 逆解析の初期モデル	73
8.3 逆解析に用いた観測データ	74
8.4 逆解析結果	76
8.4.1 透水係数の変化	76
8.4.2 坑道湧水量と孔内水圧の変化	79
 9 まとめと考察	 83
9.1 解析結果のまとめ	83
9.2 連続体モデルの適用性と今後の課題	85
9.3 水理地質構造の考察	87
 10 おわりに	 88
参考文献	89

## 図 目 次

### 1章

図-1.1.1 平成7年度の研究のフロー	2
図-1.1.2 初年度の研究との比較	3

### 2章

図-2.1.1 釜石鉱山における岩盤浸透流解析のフロー	4
図-2.1.2 割れ目ゾーンモデル	5
図-2.1.3 等価不均質連続体モデル	6
図-2.2.1 釜石鉱山の位置図	8
図-2.2.2 釜石鉱山地形図	9
図-2.2.3 釜石鉱山地質図	10
図-2.2.4 釜石鉱山坑道鳥瞰図	11
図-2.2.5 原位置試験場周辺詳細図	11
図-2.3.1 解析のフロー	12

### 3章

図-3.1.1 岩盤中の地下水の流れ	14
図-3.1.2 亀裂ネットワークモデル	14
図-3.2.1 亀裂性岩盤のモデル化	15
図-3.2.2 等価不均質連続体モデルの概念	17
図-3.3.1 モデル化の概念	18
図-3.4.1 等価不均質連続体モデルの作成フロー	20

### 4章

図-4.1.1 解析領域平面図（標高550mレベル）	22
図-4.1.2 KG-1孔における間隙水圧計測結果	22
図-4.1.3 KG-1孔における間隙水圧経時変化	23
図-4.1.4 解析領域鳥瞰図	24
図-4.2.1 リニアメント解析により得られた亀裂ゾーン位置図 （長他、1994）	26
図-4.2.2 高間隙水圧帯の推定位置	27
図-4.2.3 KH-19削孔時の間隙水圧と湧水量（口元）	28
図-4.3.1 定水位境界模式図	29

## 6章

図-6.1.1	等価不均質連続体モデルの作成フロー	32
図-6.2.1	作成した3種類の亀裂分布モデル	33
図-6.3.1	亀裂の統計分布の決定手順	34
図-6.3.2	亀裂の方位分布 (KH-4~18孔)	36
図-6.3.3	亀裂の方位分布の補正と分布関数の当てはめ	36
図-6.3.4	亀裂開口幅と一次元密度の関係 (KH-4~18孔)	37
図-6.3.5	NW坑道に沿った開口亀裂の分布 (坑道起点より300~710m)	38
図-6.3.6	亀裂開口幅と一次元密度の関係 (NW坑道)	39
図-6.3.7	亀裂開口幅と一次元密度の関係 (KH-4~18孔とKH-20~23孔の比較)	39
図-6.3.8	KD-90坑道壁面の亀裂トレース図	40
図-6.3.9	トレース長分布 (KD-90坑道壁面)	41
図-6.3.10	トレース長分布 (実測とシミュレーションの比較、KD-90坑道)	44
図-6.3.11	トレース長と開口幅の相関	45
図-6.3.11	下限開口幅と発生亀裂数の関係	46
図-6.3.12	発生した亀裂分布の一例	47
図-6.4.1	透水試験シミュレーションの解析条件	48
図-6.4.2	透水試験シミュレーション結果と実測との比較	49
図-6.5.1	亀裂分布のコンディショニング	49
図-6.5.2	コンディショニング時の亀裂中心点の存在範囲	50
図-6.5.3	コンディショニングにより得られた亀裂分布	50
図-6.6.1	クラックテンソルによる透水テンソルの主軸方向	51
図-6.6.2	要素の体積と平均透水係数の関係 (CASE24)	52
図-6.6.3	等価不均質連続体モデルによる透水係数分布 (CASE21~24)	53
図-6.6.4	等価不均質連続体モデルによる透水係数分布 (CASE31~34)	54

## 7章

図-7.2.1	解析メッシュで考慮した地形・地質 (平面図)	56
図-7.2.2	解析メッシュ鳥瞰図	57
図-7.4.1	順解析結果 (割れ目ゾーンモデル、CASE1)	59
図-7.4.2	順解析結果 (水圧分布、等価不均質連続体モデル、CASE21~24)	60
図-7.4.3	順解析結果 (水圧分布、等価不均質連続体モデル、CASE31~34)	61
図-7.4.4	順解析結果 (流速ベクトル分布、等価不均質連続体モデル、CASE21~24)	62
図-7.4.5	順解析結果	

(流速ベクトル分布、等価不均質連続体モデル、CASE31～34) ……	63
図-7.4.6 コンディショニング前後での流速ベクトル分布の比較 ……	66
図-7.4.7 間隙水圧の実測値と解析結果 (割れ目ゾーンモデル、CASE1) ……	67
図-7.4.8 間隙水圧の実測値と解析結果 (等価不均質連続体モデル、CASE21, 22, 23, 24) ……	68
図-7.4.9 間隙水圧の実測値と解析結果 (等価不均質連続体モデル、CASE31, 32, 33, 34) ……	69
図-7.4.10 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) ……	70
図-7.4.11 孔内水圧の相対誤差 ……	71

## 8章

図-8.1.1 逆解析フロー ……	72
図-8.2.1 要素透水係数と材料グループ番号 ……	73
図-8.3.1 亀裂滴水量の分布 (NW坑道) ……	75
図-8.3.2 NW坑道の堰流量と逆解析の設定流量 ……	75
図-8.4.1 逆解析ステップに伴う透水係数変化 (割れ目ゾーンモデル、CASE1) ……	76
図-8.4.2 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、CASE24) ……	78
図-8.4.3 逆解析の更新過程に伴う湧水量・水圧の変化 (割れ目ゾーンモデル、CASE1) ……	80
図-8.4.4 逆解析の更新過程に伴う湧水量・水圧の変化 (等価不均質連続体モデル、CASE24) ……	81
図-8.4.5 NW坑道湧水量 (割れ目ゾーンモデルと等価不均質連続体モデルの比較) ……	82

## 1 はじめに

本研究の目標は、釜石原位置試験場周辺を対象として、複数の解析手法（連続体解析手法、不連続体解析手法）を用いて浸透流解析を実施し、亀裂性岩盤のモデル化手法としての各解析手法の妥当性を確認するとともに、解析を通じて原位置試験場周辺の水理地質学的環境を把握すること、である。

平成6年度は、KD-90坑道を中心とした同坑道周辺の試錐孔を含む領域を対象とし、均質等方性モデルおよび均質異方性モデルを用いた定常3次元浸透流解析を実施し、同領域内の水理状況の把握とこれまでに得られた間隙水圧や湧水量データの解釈を行なった。その結果、以下の点が課題として残された。

- ・ KD-90坑道内への湧水量に関しては、総湧水量は計算値と実測値がオーダー的に一致するが、坑道内の各区間への湧水量の実測値は、各区間間でのバラツキが大きく、解析結果とは傾向的にも一致しない。
- ・ KD-90坑道周辺の試錐孔内の間隙水圧分布に関しては、全般的に解析結果の方が実測値よりも大きく、坑道周辺の間隙水圧は広い範囲にわたって低下しているものと考えられる。

上記のうち、前者の湧水量のバラツキは、坑道周辺岩盤の（割れ目の）透水性の不均一性が大きな影響を与えているものと考えられ、後者の水圧低下域の形成には高透水性割れ目の存在が関係している可能性がある。いずれも、亀裂系に支配された透水性の不均一性に起因する現象と考えられる。

本年度は、図-1.1.1のフローに沿って、昨年度実施した均質等方性モデル、均質異方性モデルを用いた解析により得られた知見をもとに、図-2.3.1に示すような、亀裂分布に起因する不均質性を加味したモデルを用いた浸透流解析を実施し、不連続性岩盤の水理地質構造をより詳細に理解するための解析を実施する。

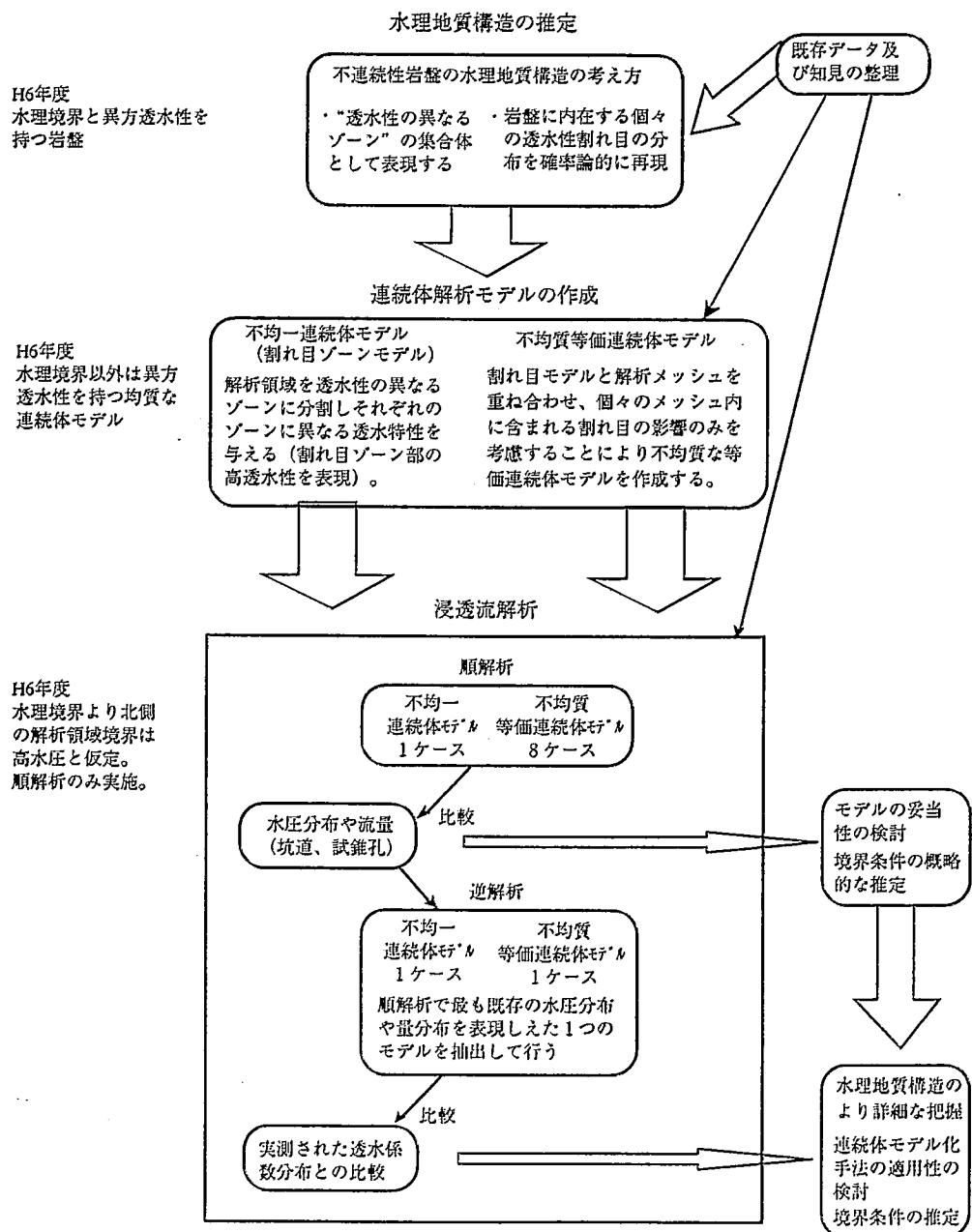


図-1.1.1 平成7年度の研究のフロー

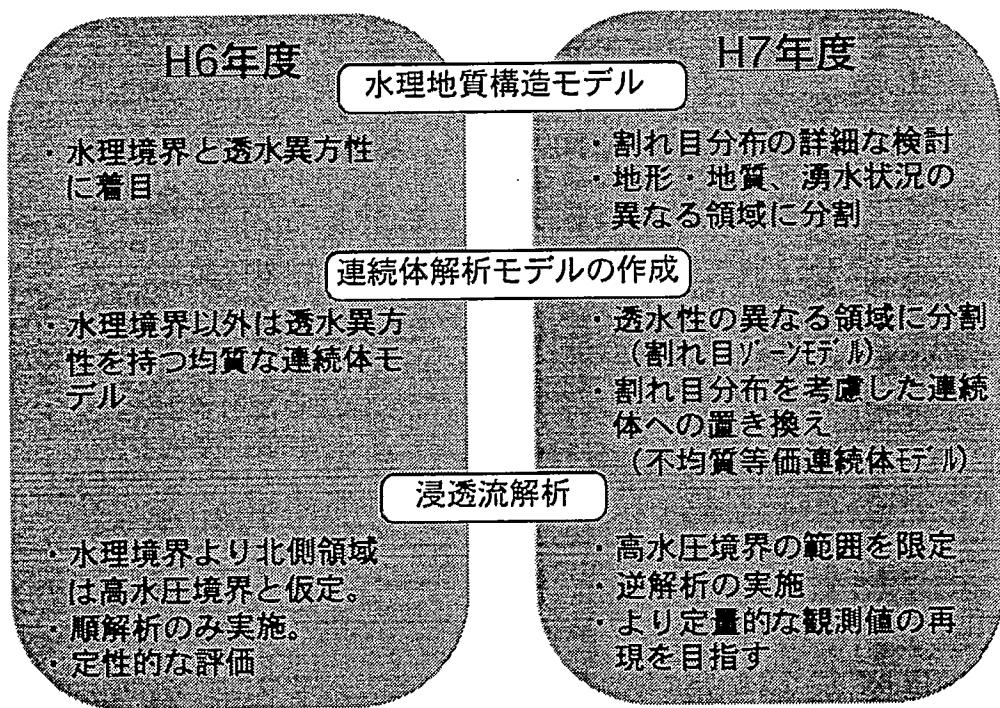


図-1.1.2 初年度研究との比較

## 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とおりである。

- (1) 既存データの整理
- (2) 水理地質構造の推定
- (3) 連続体解析モデルの作成
- (4) 原位置試験場周辺を対象とした浸透流解析
- (5) 原位置試験場周辺の水理地質学的環境の考察と解析モデルの改良に関する検討

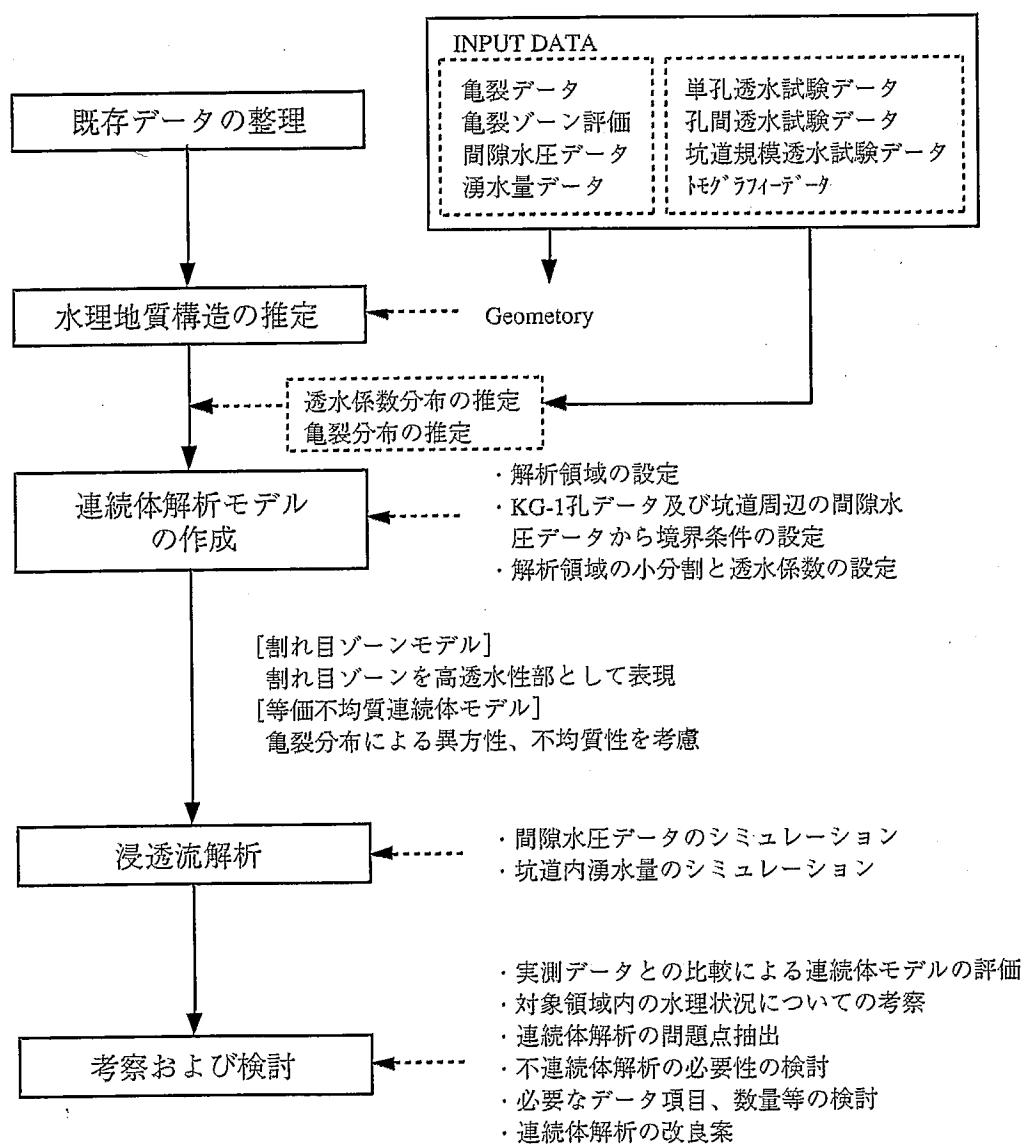


図-2.1.1 釜石鉱山における岩盤浸透流解析フロー

### (1) 既存データの整理

H 7年度に削孔されたKF-1、KF-2孔、KH-21, 23, 25孔の試錐記録、間隙水圧データ、NE・NW坑道への流量測定データ等、昨年度以降に取得されたデータまたは昨年度に整理されなかった既存データのうち、水理地質構造モデルの構築および解析結果の評価に有用と思われるデータを抽出し整理する。

### (2) 水理地質構造の推定

(1) および昨年度までに整理した既存データを空間分布や経時変化の観点から分析し、水理地質構造（主要な透水性亀裂の分布や連結性）を推定する。

### (3) 連続体解析モデルの作成

解析領域は、昨年度の解析結果との比較を行なう観点から昨年度と同一の解析領域を設定する。なお、新たに設けられたボーリング孔のうち、解析結果の評価に用いられるものはすべてモデルに反映する。今年度は、昨年度の解析より抽出された課題を考慮し、以下の2種類の連続体解析モデルを作成する。

#### (i) 割れ目ゾーンモデル

割れ目ゾーン、水理境界を考慮したモデル（図-2.1.2に概念を示す）。

#### (ii) 等価不均質連続体モデル

亀裂分布、透水性の分布を考慮したモデル（図-2.1.3に概念およびモデルの構築方法を示す）。

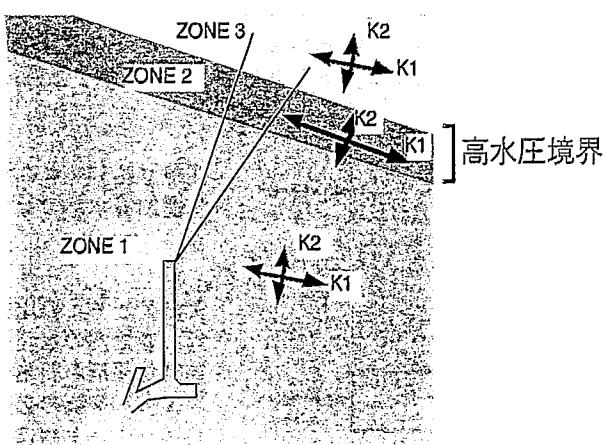
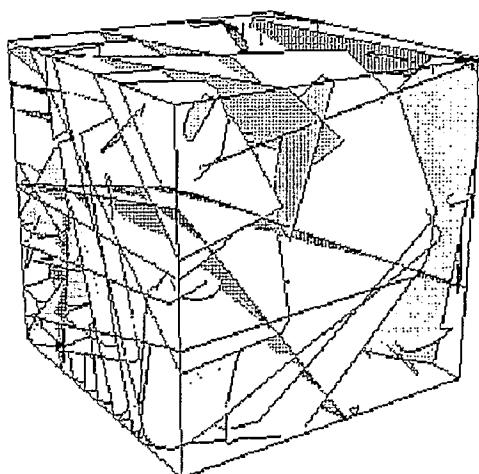
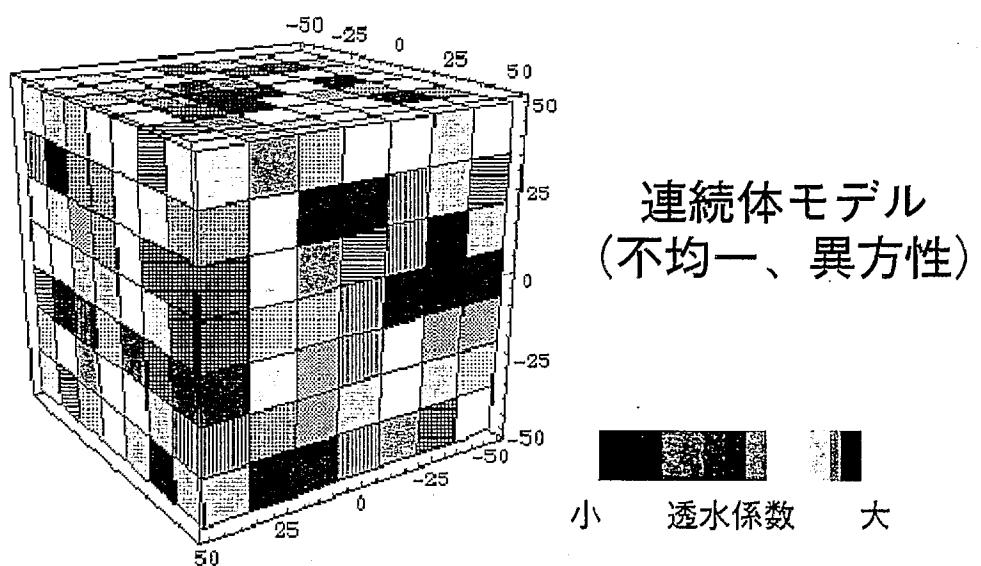


図-2.1.2 ゾーンモデル



不連続体モデル



連続体モデル  
(不均一、異方性)

図-2.1.3 等価不均質不連続体モデル

(4) 原位置試験場周辺を対象とした浸透流解析および逆解析

(3) 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。

(5) 原位置試験場周辺の水理地質学的環境の考察と解析モデルの改良に関する検討

(4) の解析結果と、昨年度の解析結果および実測データ（今年度、本解析の対象領域内に掘削される新規試錐孔を用いた間隙水圧測定等のデータを含む）との比較を行ない、本解析で用いたモデル化手法や構築された不均質モデルの妥当性の検討を行なう。また、併せて、今年度使用したモデルの改良点や改良方法の抽出を行なう。

## 2.2 地形・地質概況

釜石鉱山原位置試験場は、栗橋花崗閃綠岩体中の標高約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、1993<sup>1)</sup>）。

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。

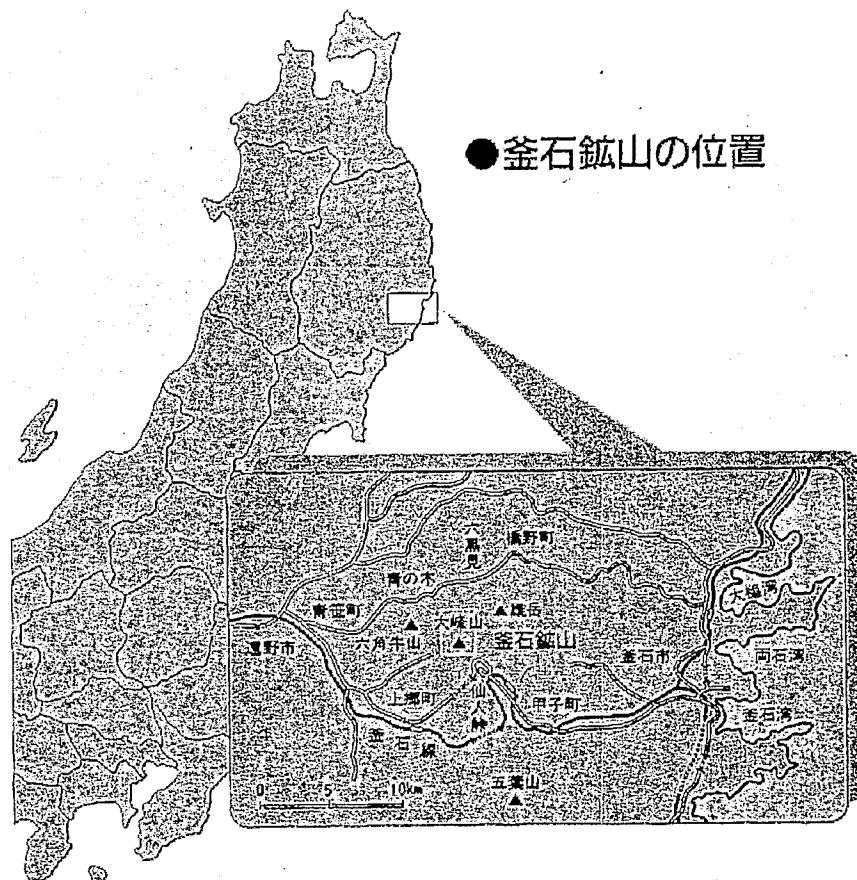


図-2.2.1 釜石鉱山の位置図

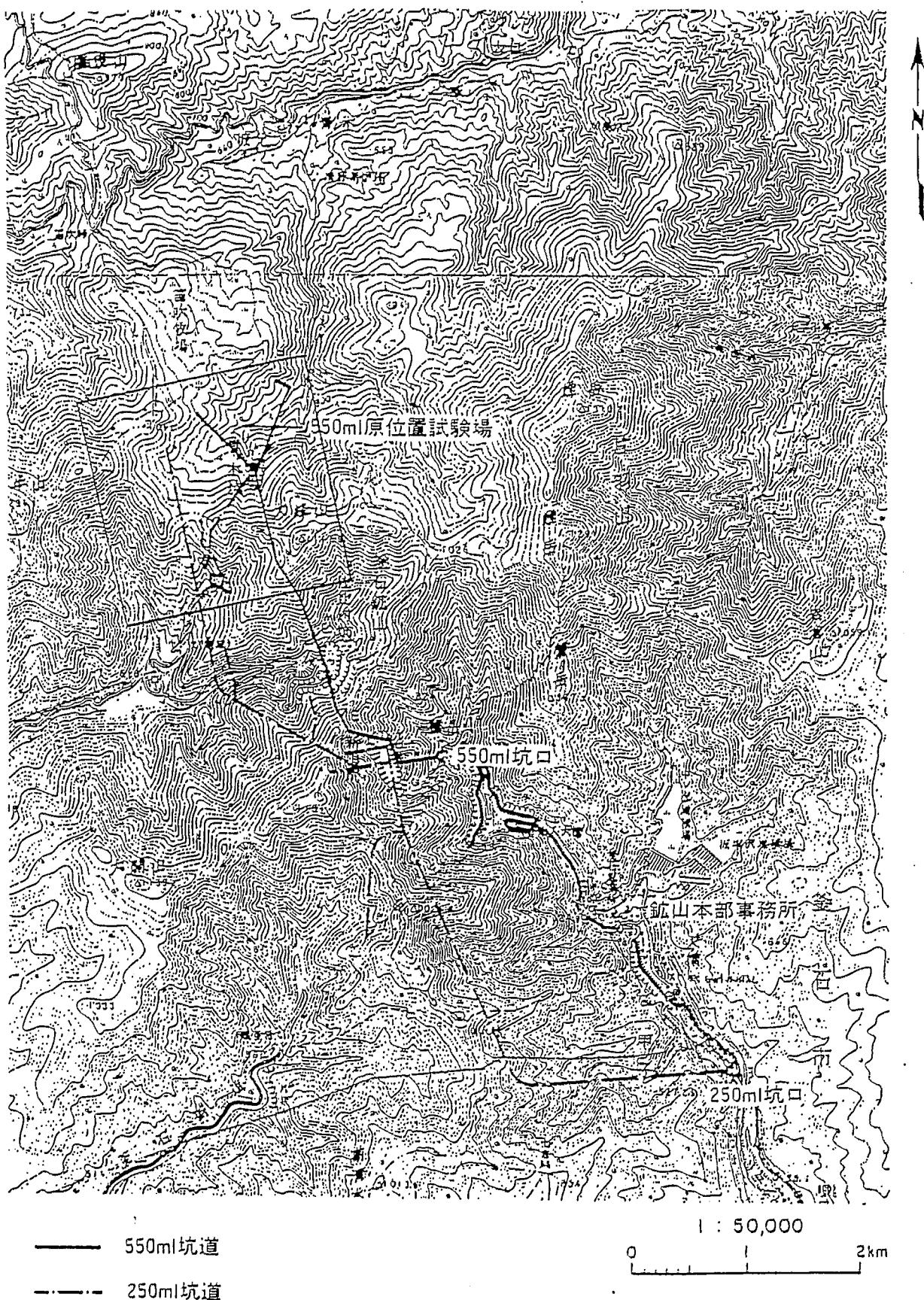
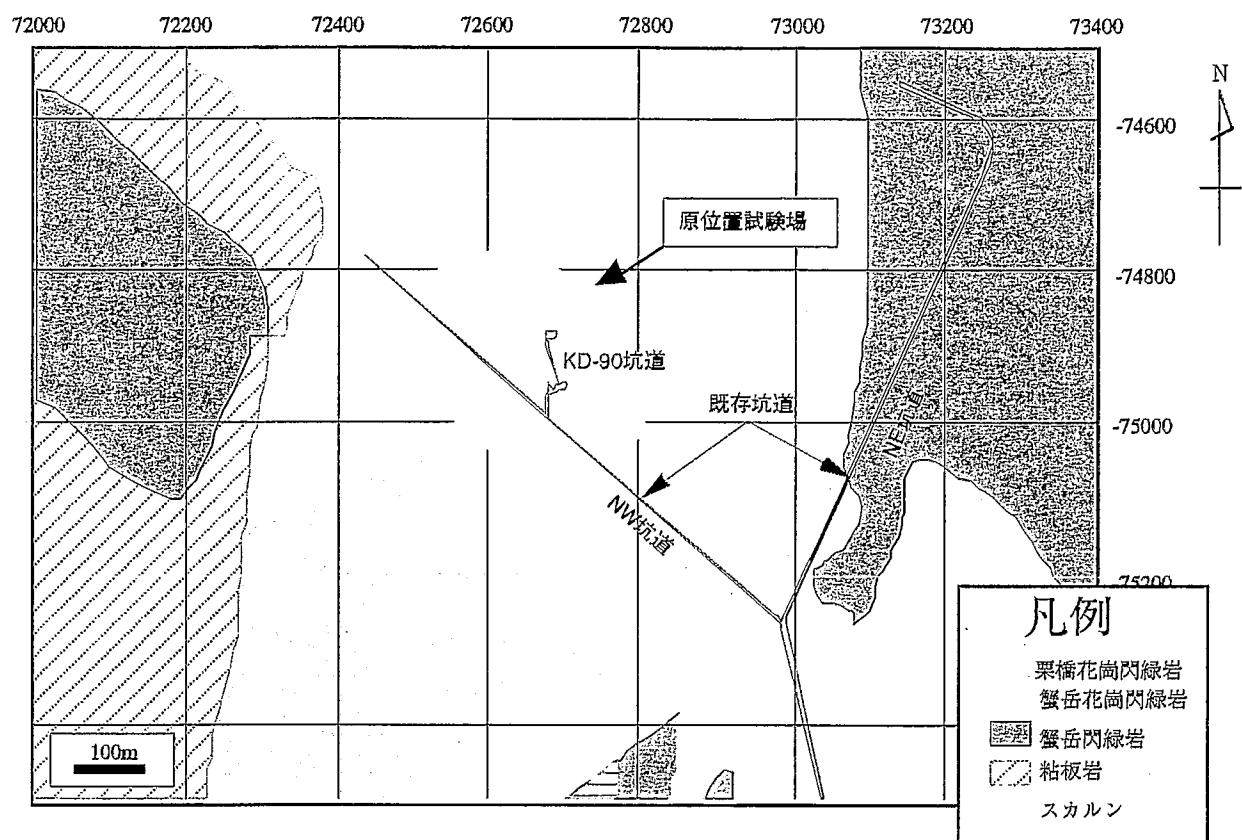
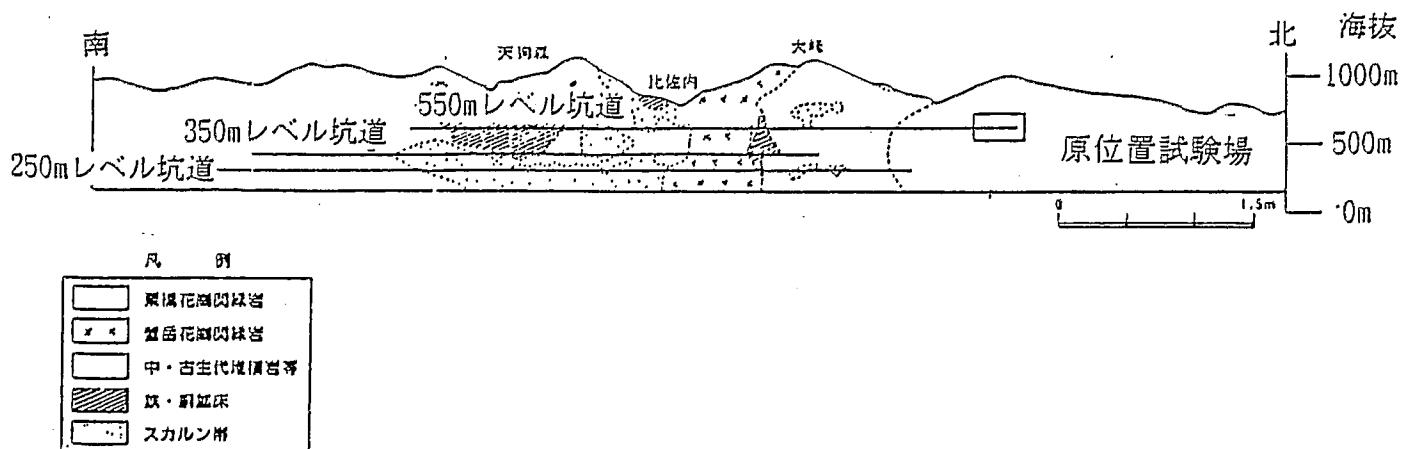


図-2.2.2 釜石鉱山地形図



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2.2.3 築石鉱山地質図

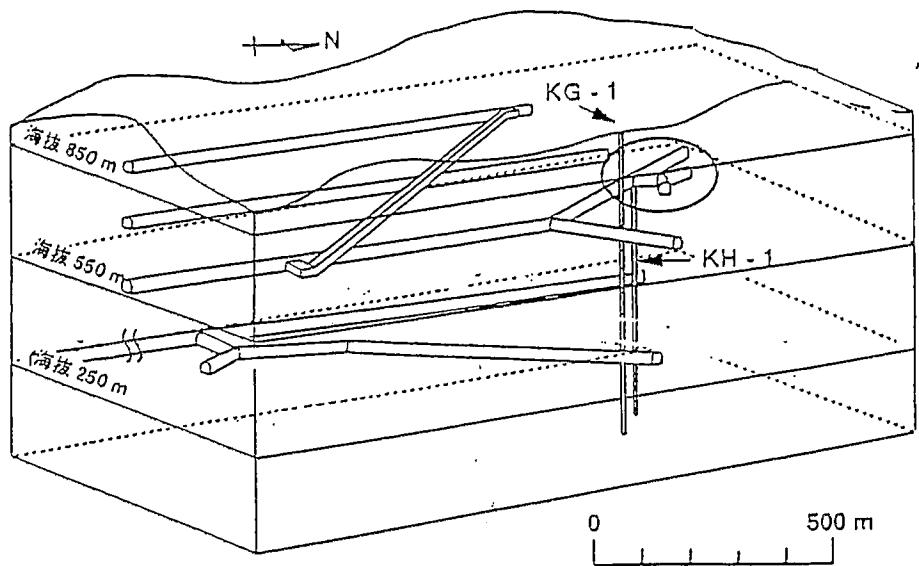


図-2.2.4 釜石鉱山坑道鳥瞰図

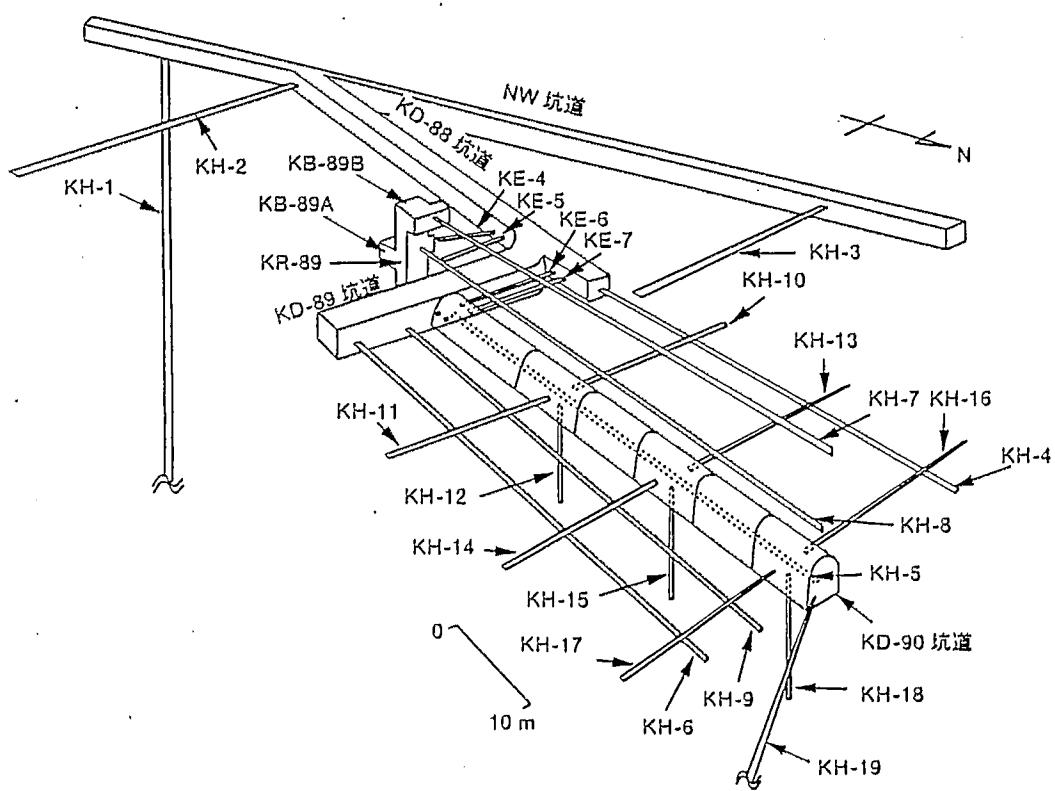


図-2.2.5 原位置試験場周辺詳細図

### 2.3 解析の全体フロー

平成6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-2.3.1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ゾーンモデル（従来の連続体解析モデル）および等価不均質連続体モデルを構築し、3次元有限要素法による浸透解析を実施する。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。

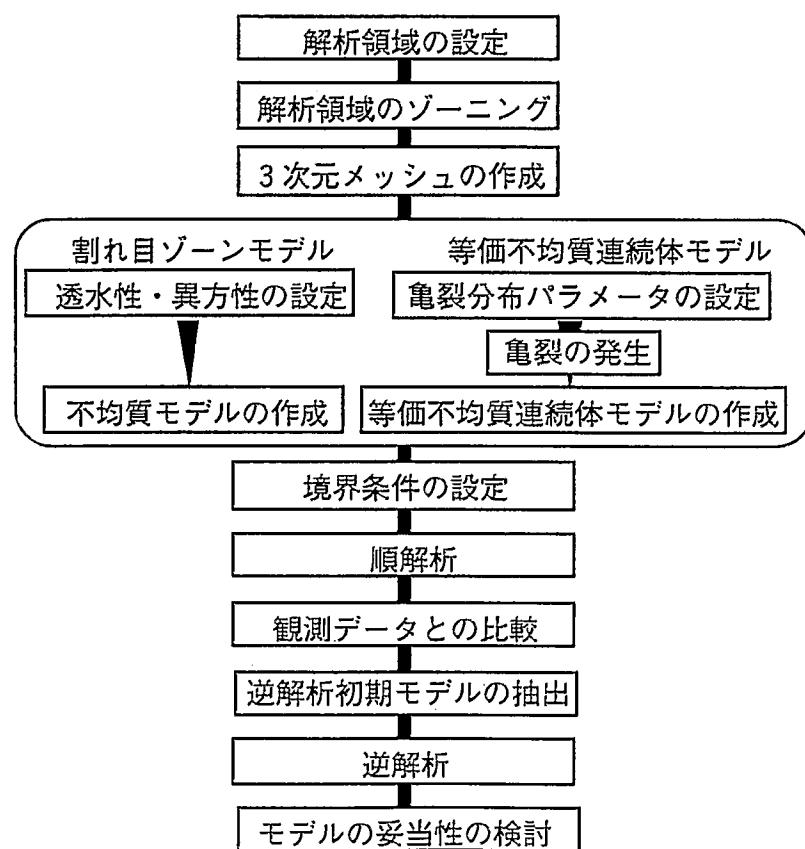


図-2.3.1 解析のフロー

### 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に摸式的に示すように、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、これらの亀裂を中心とす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 et al, 1982; Dershowitz et al., 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と開口幅を持つ平板（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 et al, 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。

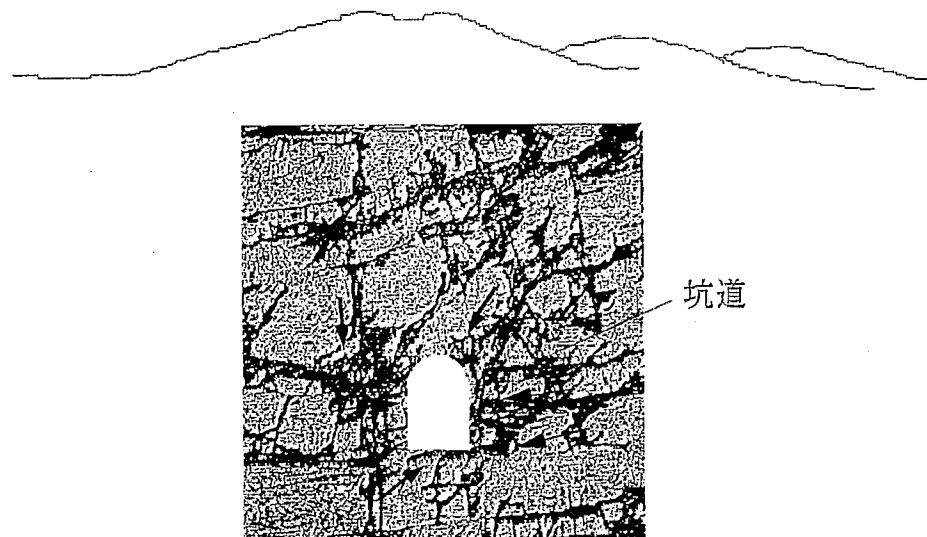


図-3.1.1 岩盤中の地下水の流れ（模式図）



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)
不連続体モデル (Discrete model)	二重空隙体モデル (Double porosity 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

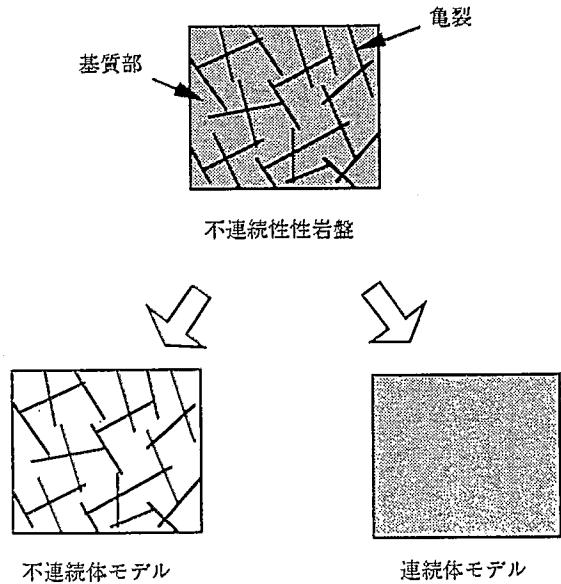


図-3.2.1 亀裂性岩盤のモデル化

に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、今回、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」を提唱する。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。

## 等価不均質連續体モデル

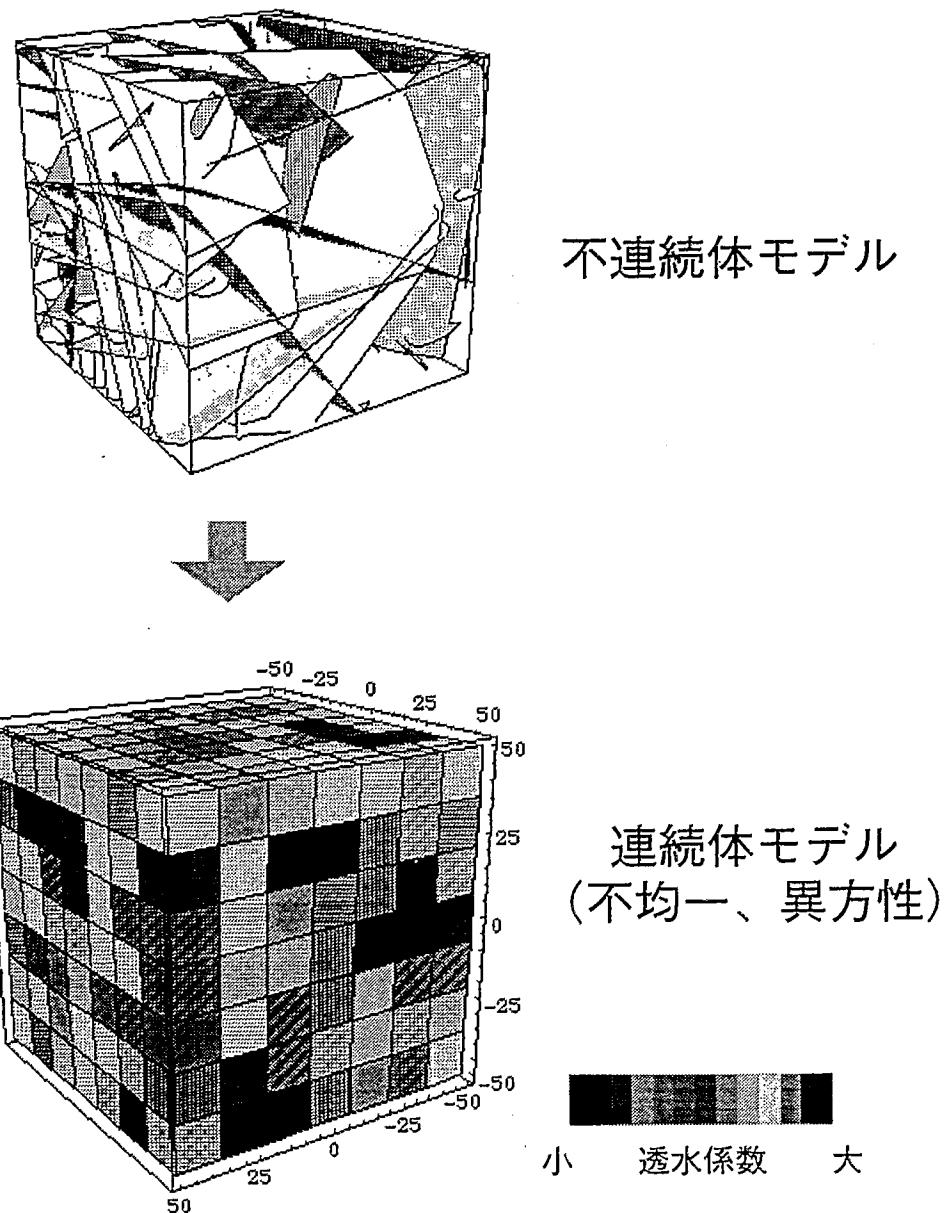


図-3.2.2 等価不均質連續体モデルの概念

### 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 $\Delta V$ 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、 $\Delta V^c = \sum_k \Delta V_k^c$ ： $\Delta V$ 中の亀裂の総体積、 $K_{ij}^m$ ：基質部の透水テンソル、 $K_{kij}^c$ ： $\Delta V$ 中の亀裂 $k$ の透水テンソル、 $S^m$ ：基質部の比貯留係数、 $S_k^c$ ： $\Delta V$ 中の亀裂 $k$ の比貯留係数、 $\Delta V_k^c$ ： $\Delta V$ 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、 $\Delta V$ 中の亀裂の体積が $\Delta V$ に比べて無視できる程小さい、すなわち、

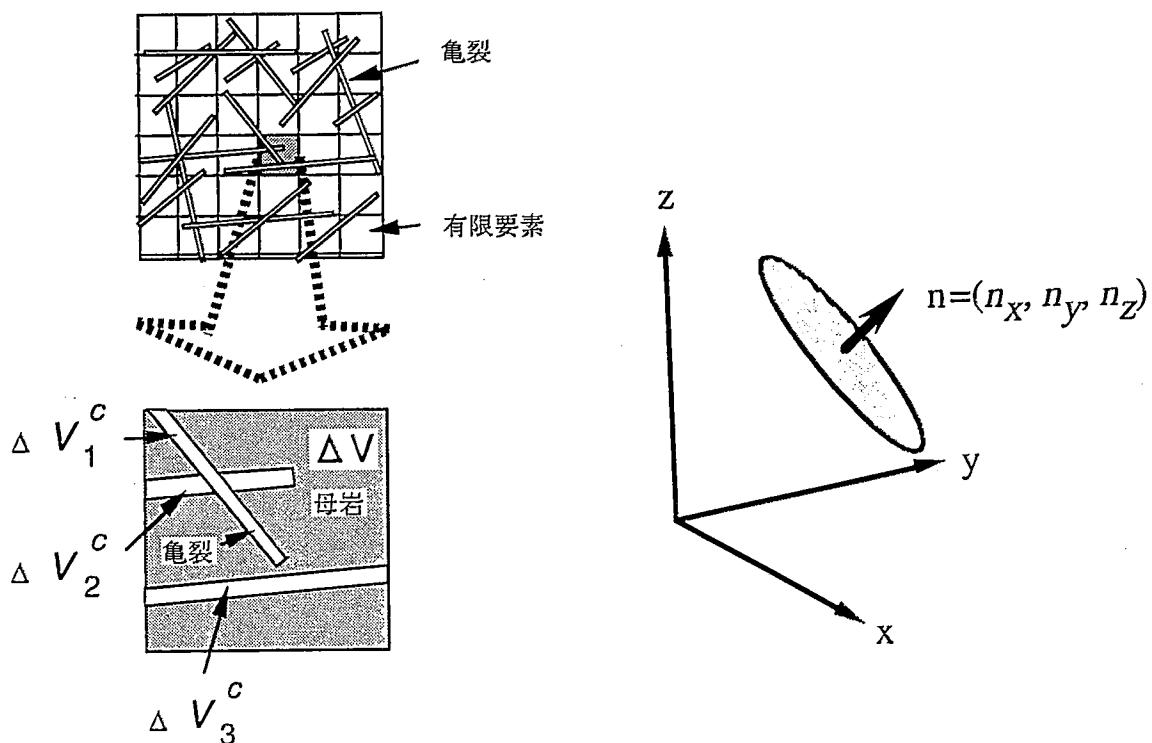


図-3.3.1 モデル化の概念

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,  $\Delta A_k^c$ :  $\Delta V$ 中に占める亀裂kの面積,  $\delta_{ij}$ : クロネッカーデルタ関数,  $n_i$ : 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  $\Delta V$ 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ます。

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、亀裂調査結果とともに、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。

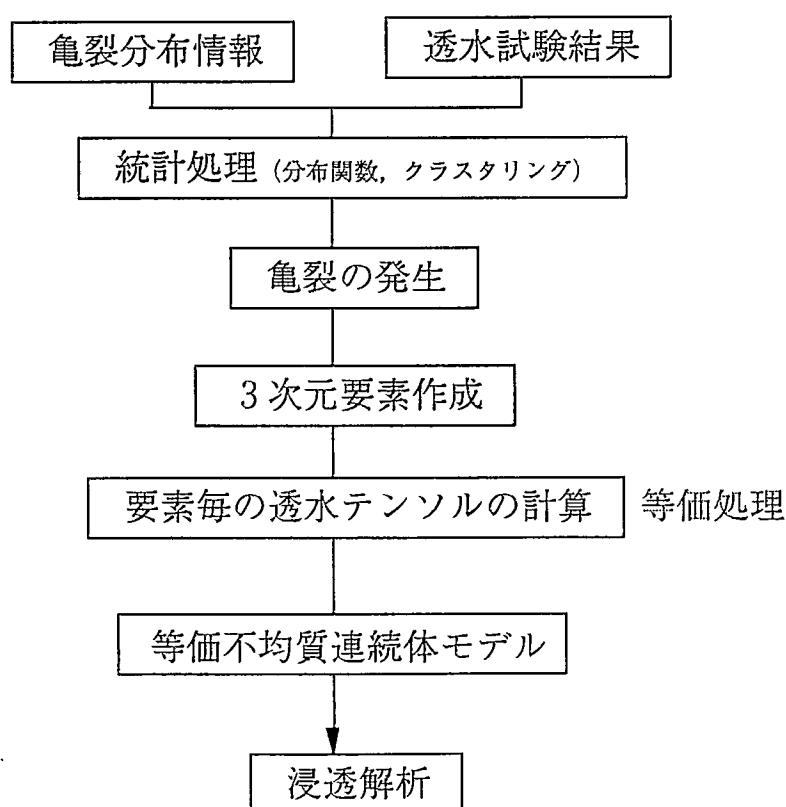


図-3.4.1 等価不均質連続体モデルの作成フロー

## 4 解析領域および境界条件の設定

### 4.1 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-4.1.1）を含む領域で、高間隙水圧帯を含む領域とする（図-4.1.1）。

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-4.1.1 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
割れ目ゾーン	: A (高間隙水圧帯) 、 B

#### 4.1.1 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-4.1.1参照、割れ目ゾーンA、Bについては4.2で後述）。図-4.1.2と表-4.1.2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/cm<sup>2</sup>で、図-4.1.3に示すように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/cm<sup>2</sup>程度で、KG-1孔とKD-90坑道の間で約7.0kgf/cm<sup>2</sup>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坑道を中心とし、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-4.1.1に示すような1辺400mの正方形領域とする。

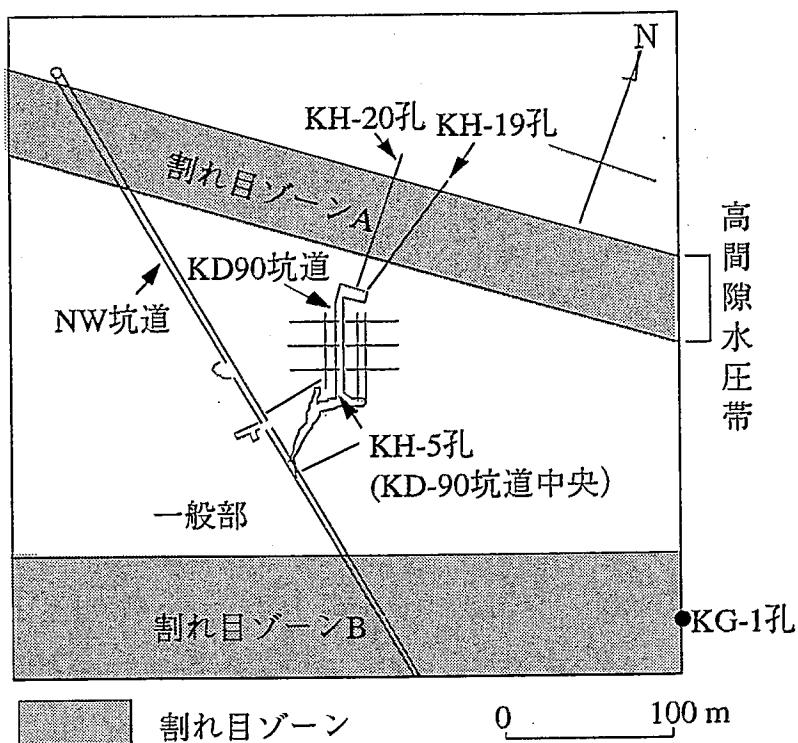


図-4.1.1 解析領域平面図（標高 550 m レベル）

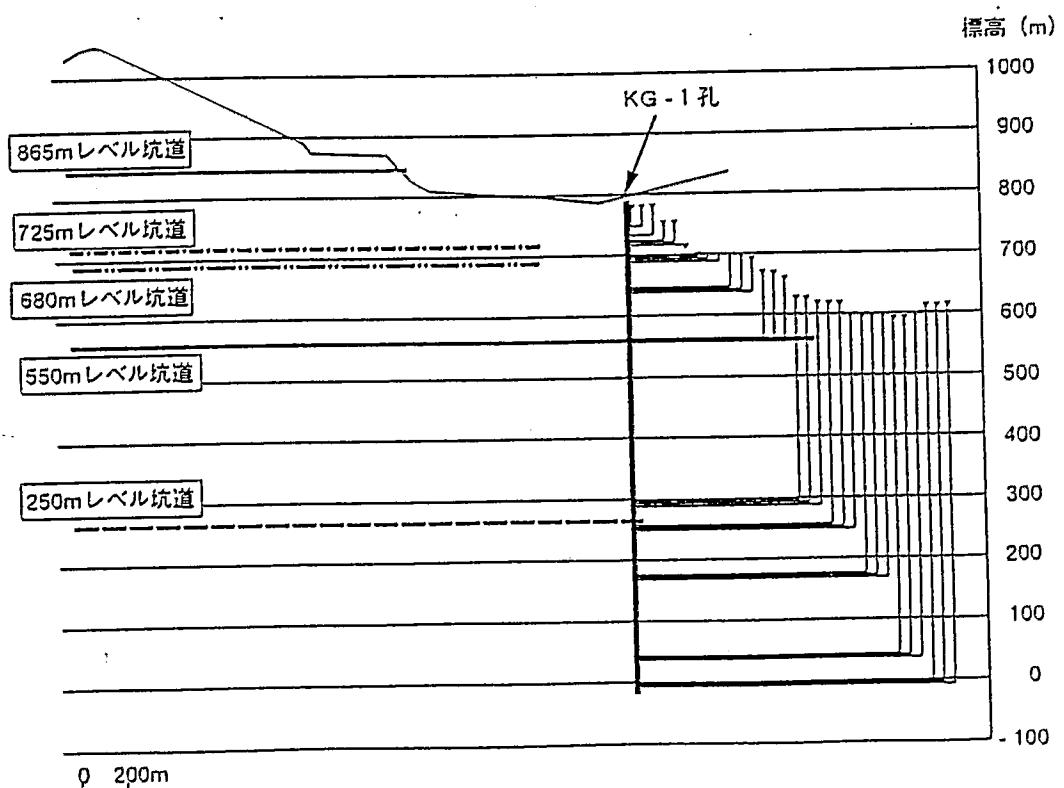


図-4.1.2 KG-1孔における間隙水圧計測結果

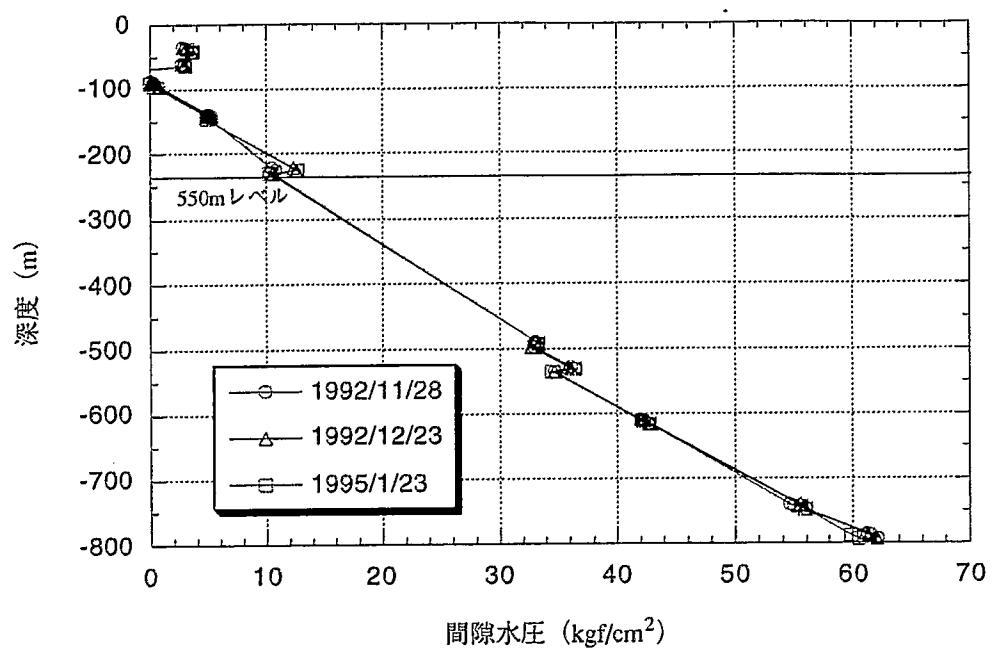


図-4.1.3 KG-1孔における間隙水圧経時変化

表-4.1.2 KG-1孔における間隙水圧計測結果（1992年11月28日）

計測位置標高 (m)	水頭 (m)	間隙水圧 (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均値 (kgf/cm <sup>2</sup> )
555.14	658.74	10.36	10.55
559.60	667.70	10.81	
562.73	667.63	10.49	

#### 4.1.2 上部・下部境界

図-4.1.2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 $10.0\text{kgf/cm}^2$ 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レベルの中間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-4.1.4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。

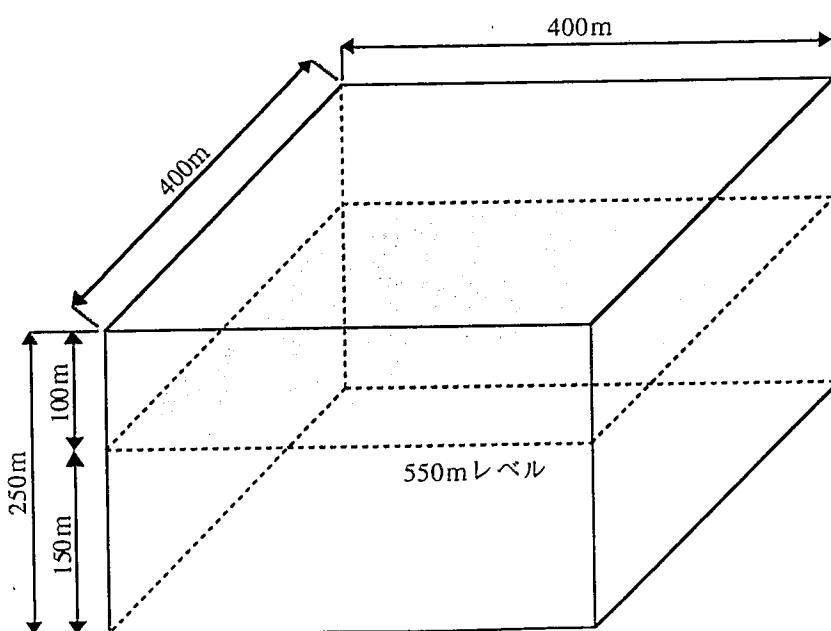


図-4.1.4 解析領域鳥瞰図

## 4.2 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-4.2.1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/cm<sup>2</sup>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-4.2.3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/cm<sup>2</sup>）。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-4.2.2参照）は、図-4.2.1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-4.1.1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。

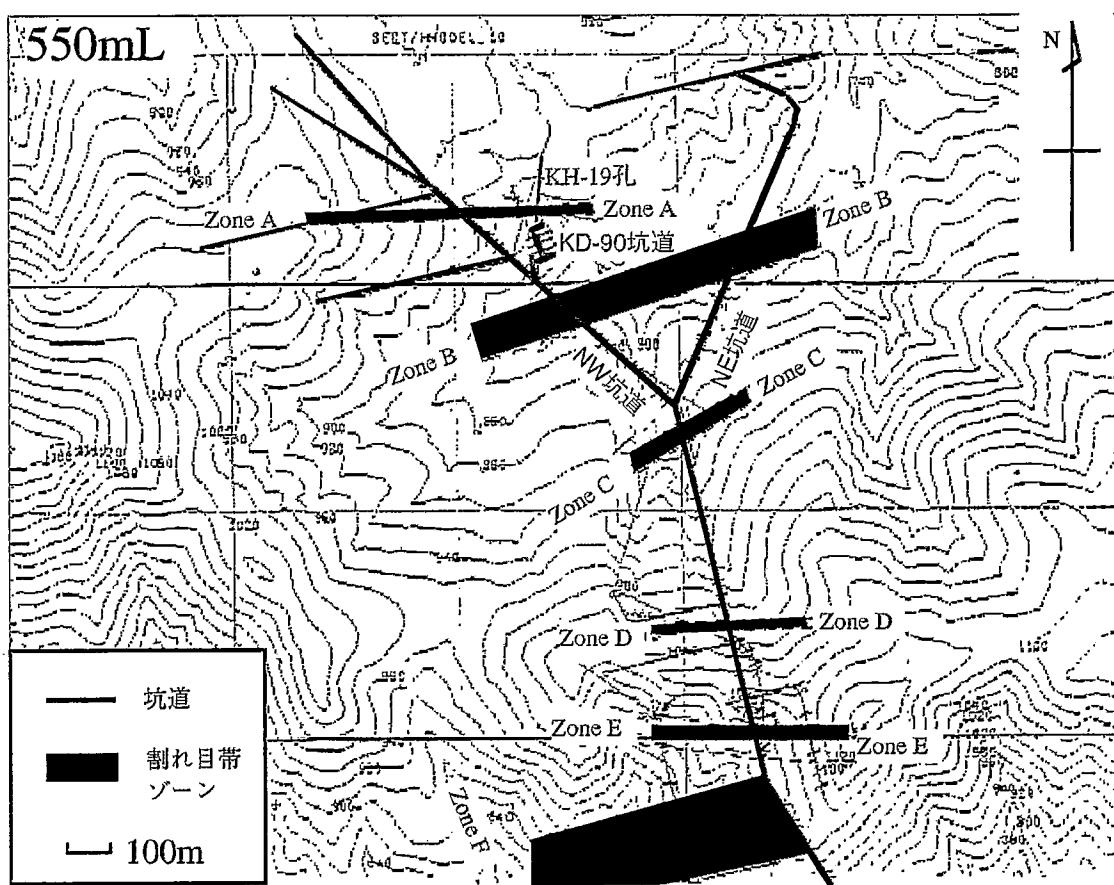


図-4.2.1 リニアメント解析により得られた割れ目ゾーン位置図（長他、1994）

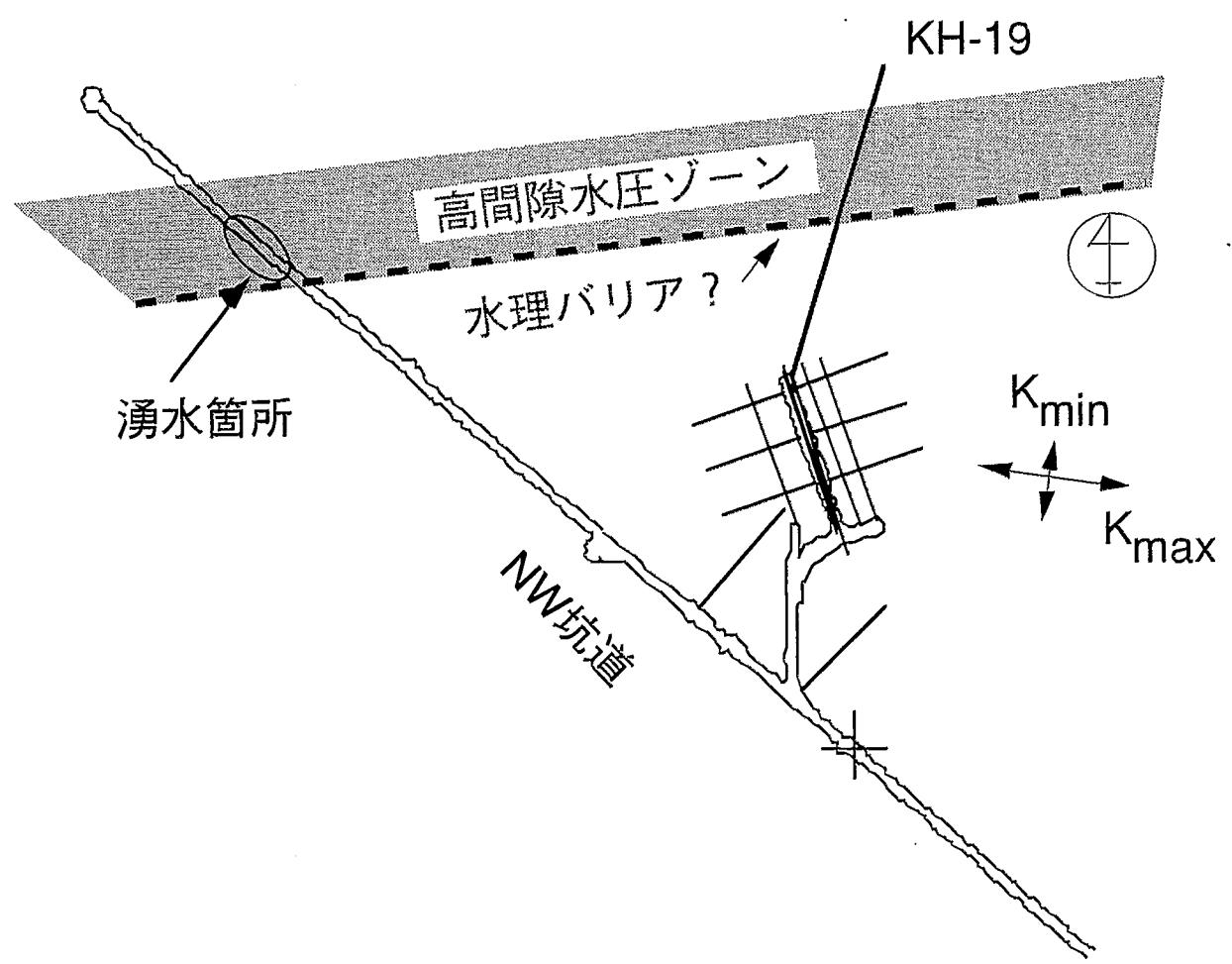


図-4.2.2 高間隙水圧帯の推定位置

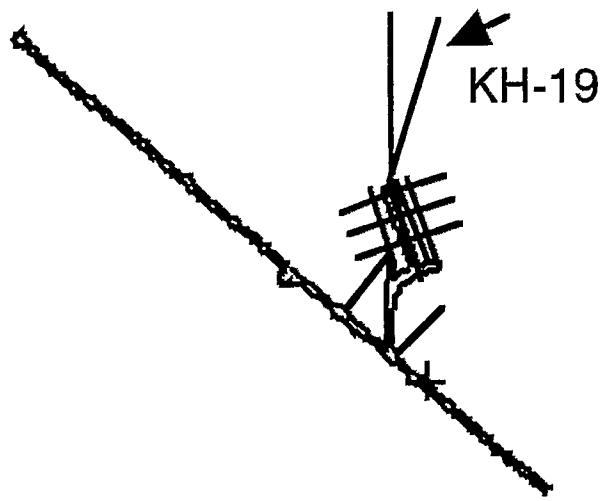
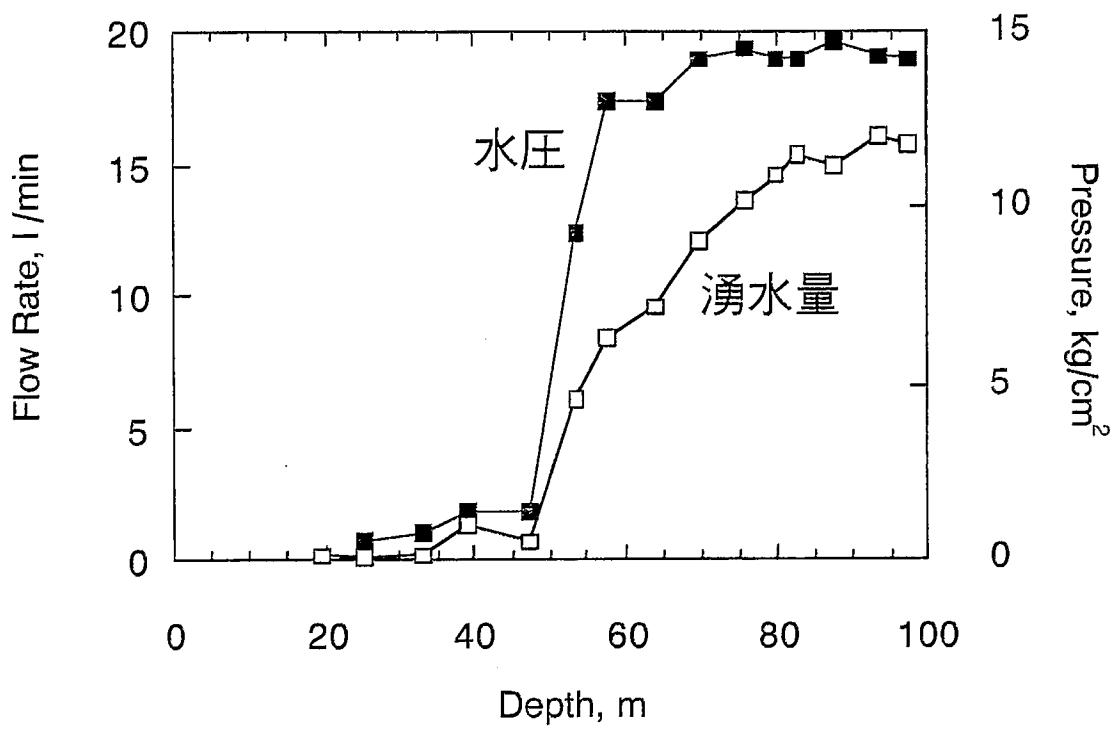


図-4.2.3 KH-19削孔時の間隙水圧と湧水量（口元）

### 4.3 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帶では、約20kgf/cm<sup>2</sup>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、高間隙水圧帶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<sup>2</sup>、その他の境界では10kgf/cm<sup>2</sup>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-4.3.1）。

[一般部] 定水位境界： 10kgf/cm<sup>2</sup> (550m レベル)

[割れ目ゾーン] 定水位境界： 20kgf/cm<sup>2</sup> (550m レベル)

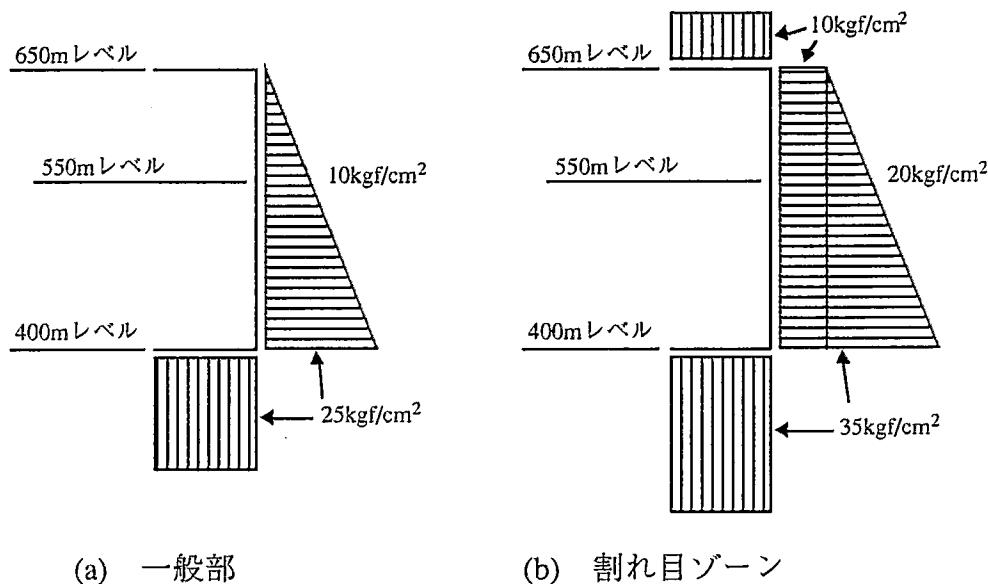


図-4.3.1 定水位境界模式図

## 5 割れ目ゾーンモデルの作成

割れ目ゾーンモデルでは、解析領域を割れ目ゾーンA、Bと一般部に分け、2種類のゾーンに異なる透水性を与えたケースについて浸透流解析を行う。

### 5.1 透水特性の設定

割れ目ゾーンモデルの作成にあたっては、原位置で実施された水理試験（単孔透水試験、孔間透水試験、坑道規模透水試験、ベンチレーション試験、1000m級透水試験、JFT試験）の結果より、透水係数と透水異方性について評価した。なお、深度方向の透水係数の深度依存性については、十分なデータが得られていないため、今回は考慮しないことにした。

550mレベルにおける水平方向の透水係数は、KD-90坑道とKD-90坑道周辺の水平孔で実施された以下に示す水理試験結果より評価する。

- (1) 単孔透水試験 : KH-2、KH-3、KH-5、KE-3、KE-6、KE-7
- (2) 孔間透水試験 : KH-4、KH-5、KH-6、KH-7
- (3) 坑道規模透水試験 : KD-90坑道
- (4) ベンチレーション試験 : KD-90坑道

このうち、単孔透水試験により得られた透水係数の一覧を表-5.1.1に示す。

表-5.1.1 透水係数対数平均値（低圧ルジオン試験）

試錐孔	測定点数	透水係数 (cm/s)
KE-3	6	$1.49 \times 10^{-7}$
KE-6	5	$4.60 \times 10^{-8}$
KE-7	5	$4.12 \times 10^{-8}$
KH-2	6	$2.98 \times 10^{-6}$
KH-3	8	$5.06 \times 10^{-7}$
KH-5	15	$7.74 \times 10^{-7}$
平均値 (KE-6,7)	10	$4.35 \times 10^{-8}$
平均値 (KE-3,KH-2,3,5)	35	$6.67 \times 10^{-7}$
平均値 (全孔)	45	$3.64 \times 10^{-7}$

### [透水係数]

まず、透水係数に関しては、単孔透水試験の結果が $10^6\text{cm/s}$ オーダーから $10^9\text{cm/s}$ オーダーの範囲に分布し、全6孔の対数平均値とKD-90坑道内に削孔されたKH-5孔の平均値はともに $10^7\text{cm/s}$ オーダーにあることから（表-5.1.1）、代表値としては $5.0 \times 10^7\text{cm/s}$ が妥当と思われる。

### [異方性]

透水異方性については、単孔透水試験の結果から亀裂の卓越方向に削孔された2孔（KE-6、7）の透水係数の対数平均が $4.35 \times 10^8\text{cm/s}$ と、亀裂の卓越方向に斜めまたは直交する方向に削孔された4孔（KH-2、3、5、KE-3）の透水係数の対数平均（ $6.67 \times 10^7\text{cm/s}$ 、35点）より1オーダー小さい。そこで、最大および中間主軸方向はともに亀裂卓越方向の透水係数（ $5.0 \times 10^7\text{cm/s}$ ）を用い、最小主軸方向の透水係数には亀裂卓越方向に直交した方向の透水係数（ $5.0 \times 10^8\text{cm/s}$ ）を用いる。

異方性の主軸方向に関しては、リニアメントおよび亀裂解析から求められた亀裂の卓越方向、孔間透水試験により求められた透水係数の最大主軸方向がともにおよそ $N65^\circ$  E $70^\circ$  ~  $90^\circ$ 方向にあるので、透水テンソルの最大および中間主軸方向をこの面内の水平および鉛直方向にとり、最小主軸をこの面と直交する方向にとることとした。

### [不均質性]

今回用いた透水試験結果は、全て一般部内部に位置するボーリング孔内で得られたものであり、亀裂集中部内部での透水試験は十分に行われていない。亀裂集中部の透水係数を全体的に1オーダー高い値とすることにした。

## 5.2 割れ目ゾーンモデルの作成

割れ目ゾーンモデル作成に用いた透水係数を表-5.1.2に示す。

表-5.1.2 割れ目ゾーンモデル作成に用いた透水係数（最大主軸方向： $N65^\circ$  E $90^\circ$ ）

	割れ目ゾーン部	一般部
最大主軸方向透水係数	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-7}$
中間主軸方向透水係数	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-7}$
最小主軸方向透水係数	$5.0 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-8}$

## 6 等価不均質連続体モデルの作成

### 6.1 モデル作成手順

図-6.1.1にモデルの作成フローを示し、モデル作成に用いた亀裂データを表-6.1.1に示す。まずB T V調査結果から、開口亀裂のみを抽出し、亀裂形状を円形と仮定して亀裂の統計分布（亀裂密度、方向、幾何学的開口幅等）を求め、透水試験結果との比較により、水理開口幅を決定した。そこ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した。特に、ボーリング孔および坑道と交差する亀裂について、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）手法も用いた。このようにして発生させた亀裂分布を用いて、要素毎の透水テンソルを求め、等価不均質連続体モデルを作成した。

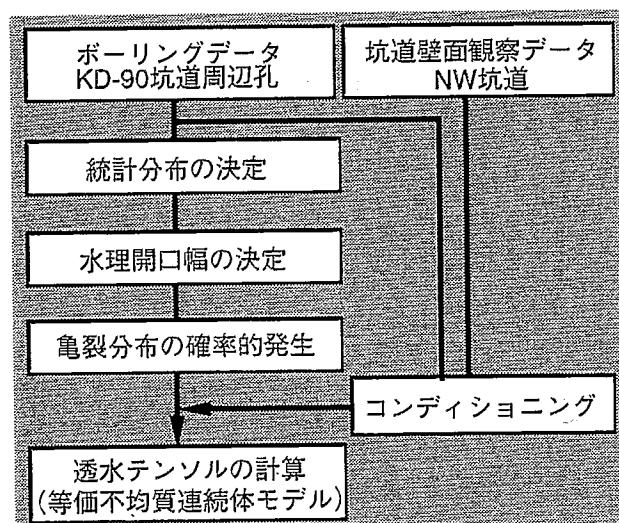


図-6.1.1 等価不均質連続体モデルの作成フロー

表-6.1.1 等価不均質連続体モデルの作成に用いた亀裂データ

		延長(m)	方位	利用情報	統計処理項目	コンディショニング
試錐孔	KH-4,5,6,7,8,9	50	N19W 水平	方向、開口幅、位置 鉛直	方向分布の推定	○ (KH-5孔のみ)
	KH-10,11,13,14,16,17	30	N71E水平		開口幅分布の推定	
	KH-12,15,18	30			1次元密度の推定	
	KH-19	100	N17E水平	方向、開口幅、位置 NS水平	"	○ (KH-20孔のみ)
	KH-20,21,23,25	80*	NS水平		"	
	NW坑道	約700	N49W水平	方向、開口幅、位置		○ (330m~708m)
坑道	KD-90坑道 (50cm以上の亀裂)	約50	N19W水平	トレース長	亀裂直径分布の推定	

\* KH-20孔のみ100m

## 6.2 亀裂分布モデル

今回作成した3種類の亀裂分布モデルを図-6.2.1に示す。均一モデルは、全領域で亀裂分布特性が変わらないとし、亀裂発生に用いる統計分布パラメータを全ての領域で同一にしたモデルである。一方、不均一モデルでは、亀裂集中帯とその外部（一般部）での亀裂分布特性の違いを反映し、亀裂集中帯での亀裂密度と平均開口幅を増加させたモデルである。さらに、均一モデルと不均一モデルに対して、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モデルも作成した（コンディショニング）。不均一モデルでは亀裂集中帯と外部で異なる亀裂分布パラメータを与えるが、その決定に際しては、亀裂データを取得位置によって亀裂集中帯と外部に分類し、両者の差異を検討・評価した。

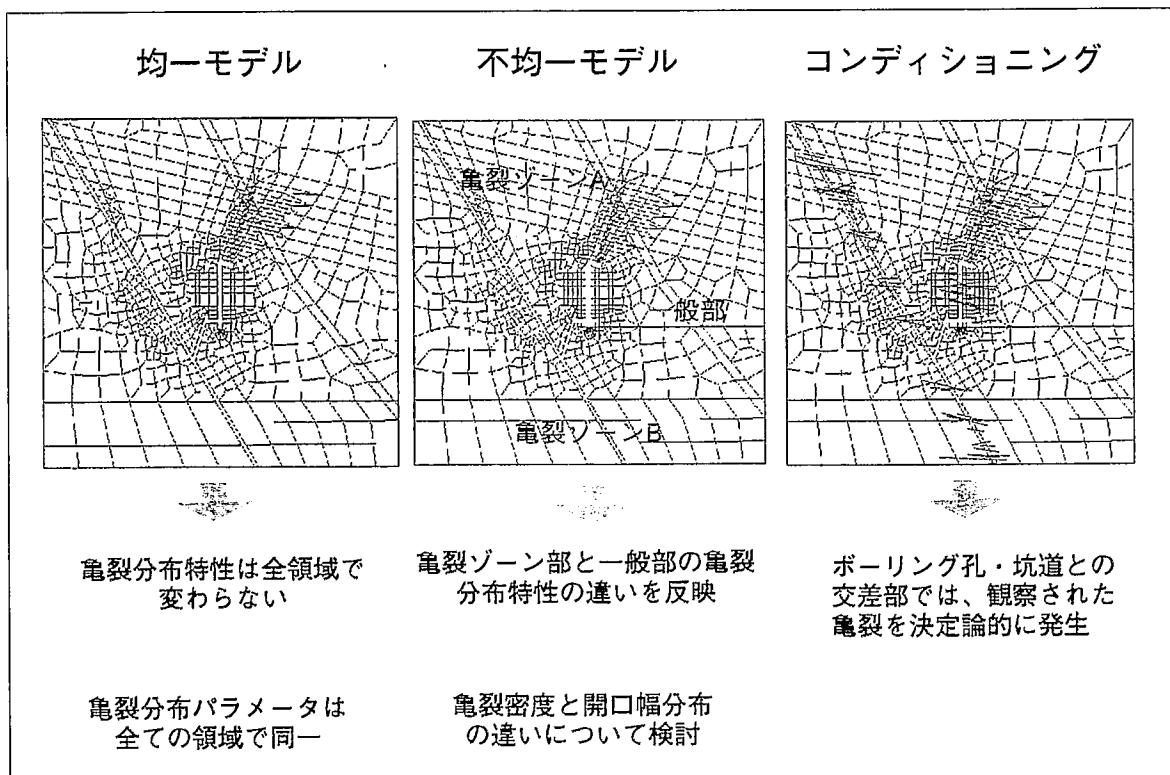


図-6.2.1 作成した3種類の亀裂分布モデル

### 6.3 亀裂統計量の決定

亀裂分布のモデル化では、まず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した後、モンテカルロ法により亀裂を発生した。今回は、各分布について分布関数形を仮定し、これを原位置の亀裂観察データに当てはめ、その適合性を確認するとともに、平均、分散などの統計分布パラメータを求めた。その手順を図-6.3.1に示す。また、仮定した分布関数形と使用したデータを表-6.3.1に示す。

開口幅と直径の分布については負の指数分布を仮定したため、決定すべき未知パラメータは平均値のみとなる。また通常、直径分布の決定は坑道壁面のトレース長に基づいて行うが、今回はボーリング孔のデータしか得られていない場合も想定し、その場合には亀裂の平均開口幅と平均直径の比例関係を仮定することとした。

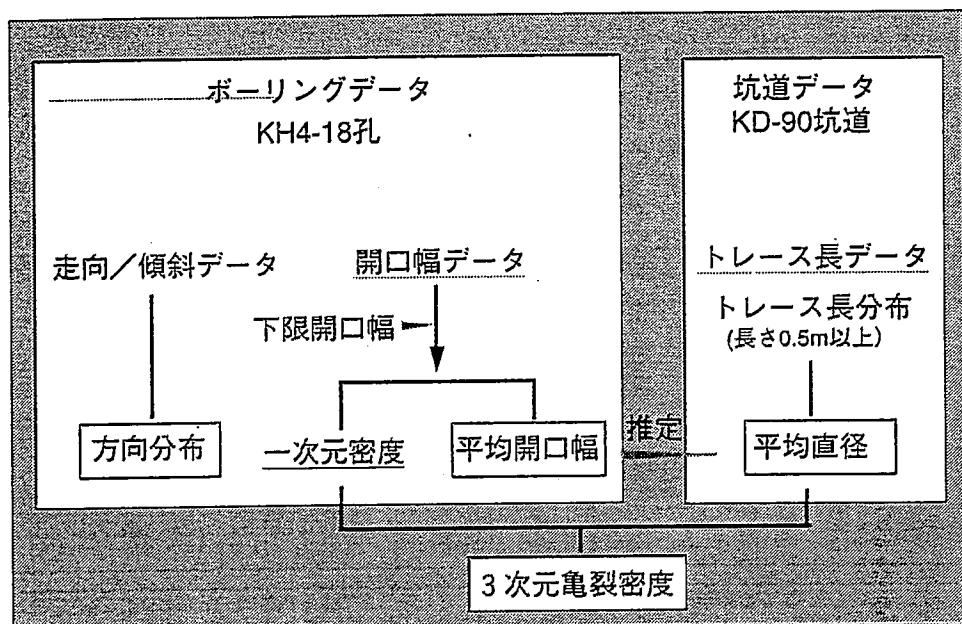


図-6.3.1 亀裂の統計分布の決定手順

表-6.3.1 統計分布関数と使用データ

分布	分布関数	使用データ	
		ボーリングのみ	ボーリング+坑道
方位分布	Fisher分布	KH-4孔～KH-18孔BTBデータ	KH-4孔～KH-18孔BTBデータ
開口幅分布	負の指数分布	KH-4孔～KH-18孔BTBデータ	KH-4孔～KH-18孔BTBデータ
直径分布	負の指数分布	幅-直径の比例関係より決定	KD-90坑道壁面トレース図

### 6.3.1 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-6.3.2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）。

$$E(\mathbf{n}) = E_b(\mathbf{n}) / n_e \quad n_e = |\mathbf{e} \cdot \mathbf{n}| \quad (6.1)$$

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-4.1.19の各3つの分布に対して上記の補正を行い、それらを合成して真の方向分布を推定した結果を図-6.3.3(a)に示す。この分布を自動クラスタリング（重心法）により3つの卓越セットに分類し、次式のフィッシャー分布をセット毎に当てはめて分布パラメータを決定した（図-6.3.3(b)）。

$$f(\theta) = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} \exp(\kappa \cos \theta) \quad (6.2)$$

ここに、 $\theta$ ：平均方位からの角度、 $\kappa$ ：分散パラメータである。得られた各セットの平均方位と分散パラメータを表-6.3.2に示す。

表-6.3.2 方向分布パラメータ

	Set 1	Set 2	Set 3
Plunge (°)	142.2	232.2	0.1
Dip (°)	23.6	14.9	65
$\kappa$	6.4	7.7	28

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  $\kappa$ ：分散(°)= $1/\kappa \times 180.0/\pi$

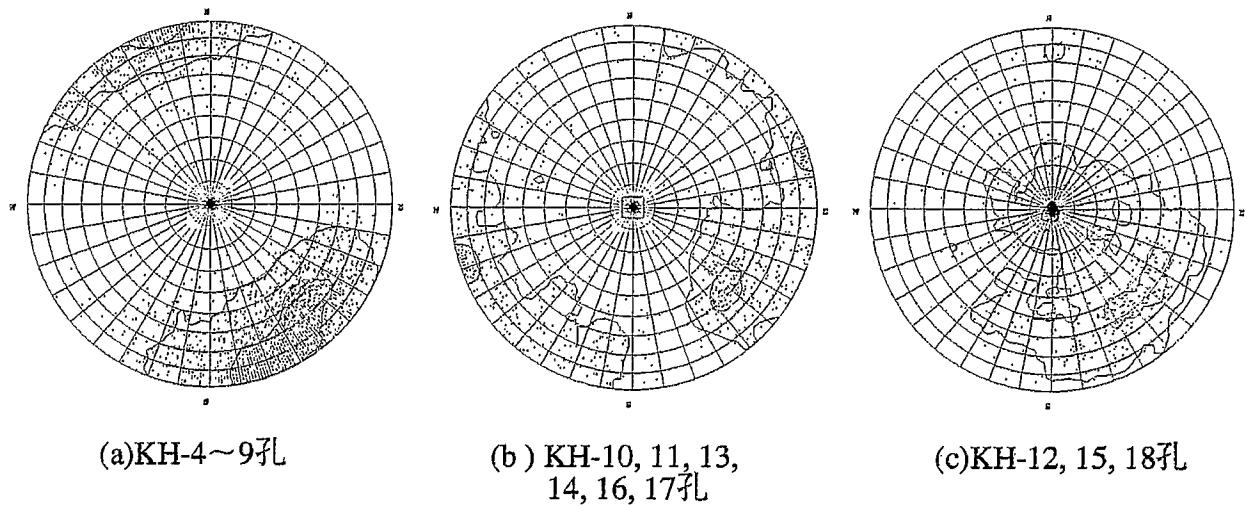


図-6.3.2 龜裂の方位分布 (KH4~18孔、ウルフネット下半球投影)

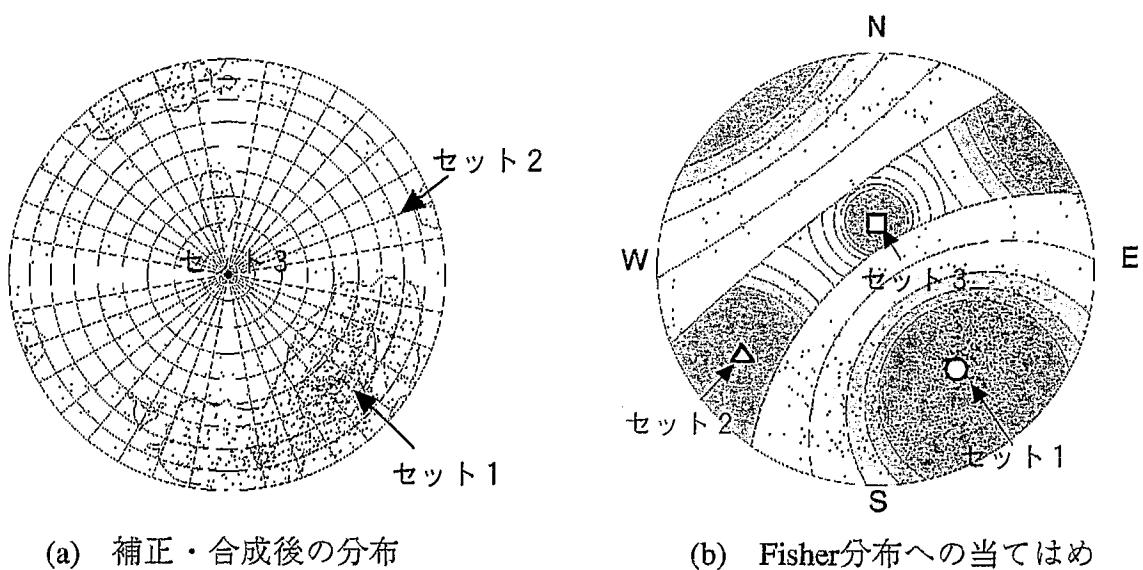


図-6.3.3 龜裂の方位分布の補正と分布関数の当てはめ  
(ウルフネット下半球投影)

### 6.3.2 開口幅分布と一次元密度

#### (1) 開口幅の分布関数

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。

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad (6.3)$$

ここに、 $\lambda$ は $1/\text{平均開口幅}$ 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。

$$F(t) = \exp(-\lambda t) \quad (6.4)$$

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。

$$\rho_1(t) = \rho_1(0) \exp(-\lambda t) \quad (6.5)$$

## (2) 一次元密度の測定

一次元密度  $\rho_1(t)$  は、計測線と交差する開口亀裂の頻度から次式により求められる。

$$\rho_1(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N(t)} \frac{1}{n_i} \quad (6.6)$$

ここに、  $N(t)$  : 幅  $t$  以上の開口亀裂数、  $L$  : 計測線の長さ、  $n_i$  : 計測線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。

実際の亀裂計測では観察の解像度により決まる下限値が存在し、真の  $\lambda$  と  $\rho_1(0)$  を直接求めることはできない。そこで、下限開口幅を設定し、それ以上の開口幅範囲で (6.5) 式に当てはめることにより、  $\lambda$  と  $\rho_1(0)$  を求めた。

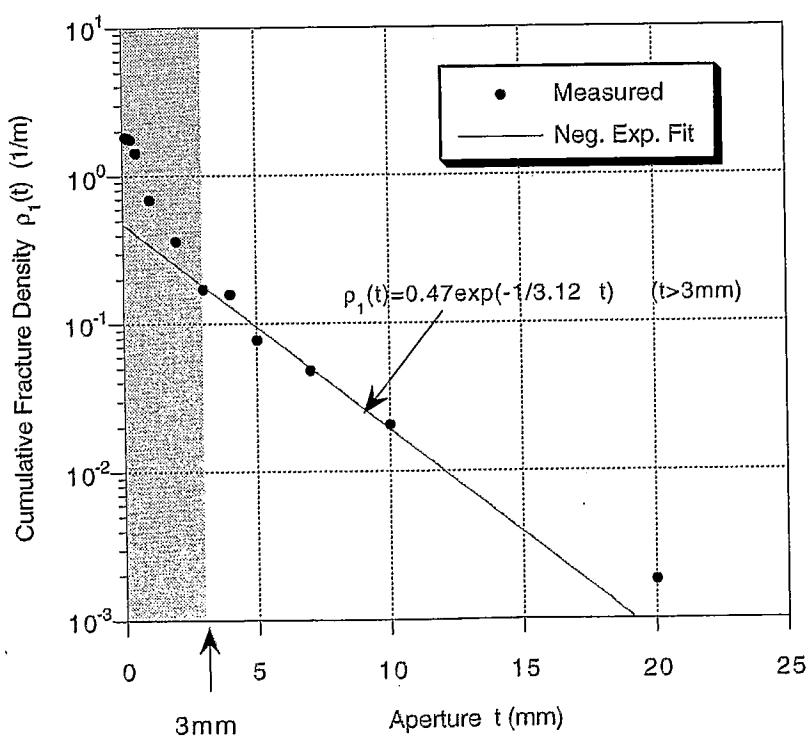


図-6.3.4 亀裂開口幅と一次元密度の関係 (KH-4~18孔)

### (3) 分布パラメータの決定

#### (均一モデル)

均一モデルでは、KD-90坑道周辺に位置するKH-4～18孔のデータにより全領域を代表させることとした。KH-4～18孔の平均の $\rho_i(t)$ を図-6.3.4に示す。負の指数分布は片対数グラフで直線となるが、開口幅の小さい範囲での亀裂密度の急増が見られ、これを一つの負の指数分布で表わすことは難しい。モデル化の観点から、全ての開口亀裂を考慮することは、計算機容量・計算時間の点で困難であり、逆に出現頻度が少ない大きな開口亀裂はモデルにあまり影響しないものと考えられる。そこで、開口幅3～10mmの範囲を対象としたフィッティングを行うと、 $\rho_i(0)=0.47 \text{ m}^{-1}$ 、平均開口幅=3.12 mmを得る。

#### (不均一モデル)

NW坑道に沿った開口亀裂の分布を図-6.3.5に示す。大きな開口亀裂は割れ目ゾーンA、Bに多く分布していることが分かる。そこで、坑道に沿った亀裂を割れ目ゾーンと一般部に分け、各々の $\rho_i(t)$ を求めた結果を図-6.3.6に示す。割れ目ゾーンA、B (Zone-A、Bと表記) では、一般部 (Zone-Cと表記) に比べて平均開口幅で6～7倍、開口亀裂密度で約2倍大きくなっている。しかし、サンプル数が十分でなく、解像度の点で坑道とボーリング孔のデータを同じく扱うことは適当でない。そこで、ボーリング孔データどうしの比較として、割れ目ゾーン内に位置するKH-20, 21, 23孔と一般部のKH-4～18孔の $\rho_i(t)$ を図-6.3.7に示す。しかし、両者は幅3mm以上の範囲で同様の分布を示しており、有意な差は見いだされない。つまり、割れ目ゾーン内部では亀裂開口度が高い傾向にあるものの、定量的な評価が難しい。今回は概略的に、割れ目ゾーン内の $\rho_i(0)$ 、平均開口幅を、ともに一般部の2倍として与えたが、今後見直す必要がある。

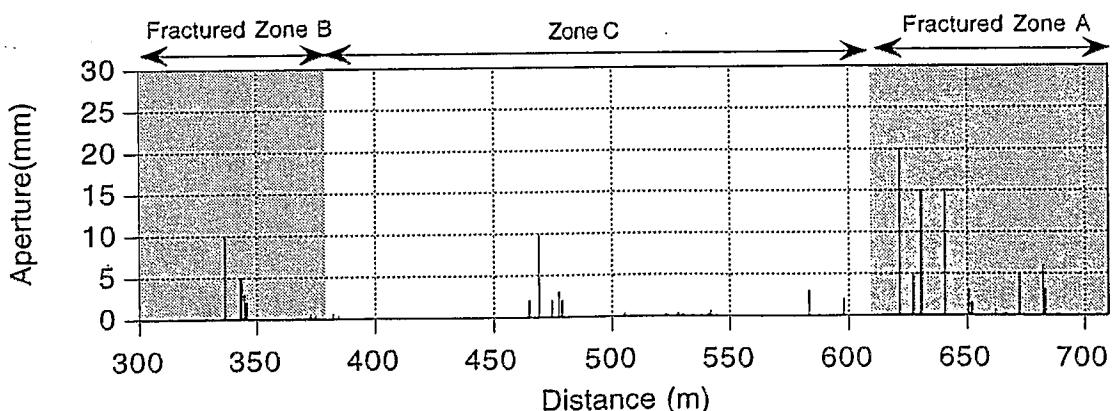


図-6.3.5 NW坑道に沿った開口亀裂の分布（坑道起点より300～710m）

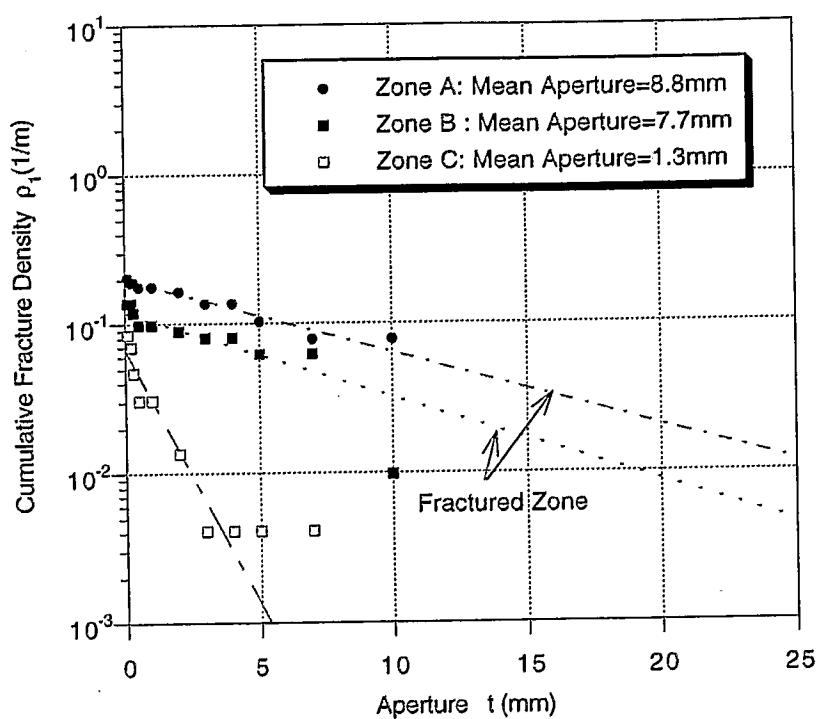


図-6.3.6 亀裂開口幅と一次元密度の関係 (NW坑道)

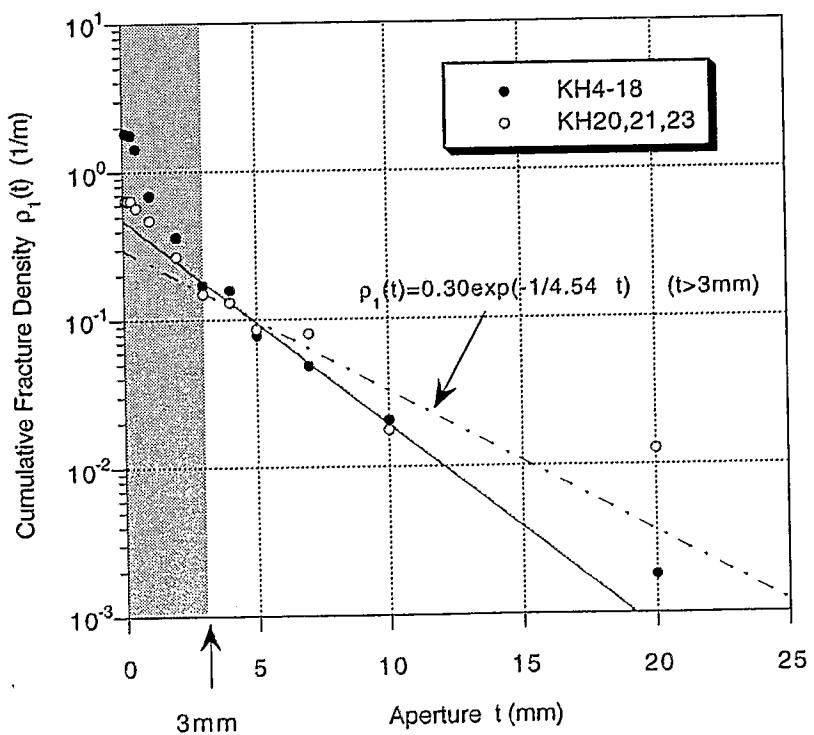


図-6.3.7 亀裂開口幅と一次元密度の関係  
 (KH4~18孔とKH-20~23孔の比較)

### 6.3.3 直径分布

亀裂直径分布の推定は、通常、露頭や坑道壁面での亀裂のトレース長に基づいて行うが、ボーリング孔のデータしか得られていない場合も想定して、次の2つの方法により評価した。

- (1) 坑道壁面のトレース長データを用いた評価
- (2) ボーリング孔内の開口幅データを用いた評価  
(平均開口幅と平均トレース長の関係を仮定)

#### (1) トレース長データを用いた評価

(使用データ)

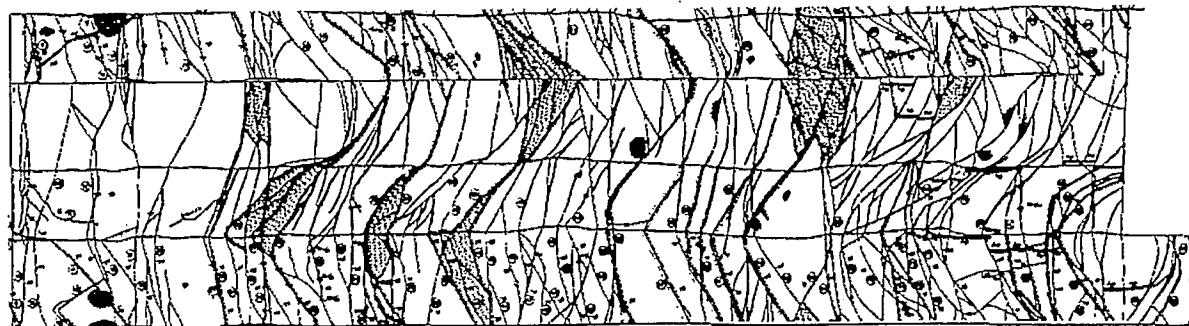
KD-90坑道の天盤、東側および西側の3つの壁面について得られている亀裂トレースデータを使用した(図-6.3.8)。これには、長さ50cm以上の亀裂について個々のトレース長、方向、開口幅、充填鉱物、亀裂端点形状などの項目について詳細に記載がなされている。今回は、トレース長、方向、亀裂端点形状のデータを用いた。

(トレース長さの分布関数)

トレース長分布の確率密度関数としては、従来から対数正規分布と負の指数分布の2つが提案されている。対数正規分布では平均と分散を推定しなければならないのに対して、負の指数分布は平均のみ推定すれば良く、前者が実用的には有利である。そこで今回は負の指数分布を用いる。

(トレース長分布の偏りと分布推定)

トレース長計測に際しては以下のようないくつかの分布の偏りが生じることが知られている。



- (a) size bias : 大きな亀裂ほどサンプリングされる確率が高くなることによる偏り
- (b) censoring bias : 観測領域が有限なため大きな亀裂の全長を計測できないことによる偏り
- (c) truncation bias : 小さな亀裂が計測から省かれることによる偏り

KD-90坑道のデータにおいても、観測領域の広さは十分でなく、上記の偏りが生じていると考えられる。上記の偏りのうち、(a)、(b)については、トレース端点形状の情報を用いて数学的に補正する方法が、例えばKulatilake他(1984)により考案されており、(c)についても、トレース長さの分布形を仮定することにより補正することが可能である。

KD-90坑道の天盤、東側壁面、西側壁面におけるトレース長さの分布ならびに統計量を各々、図-6.3.9と表-6.3.3に示す。偏りの補正を行わない場合の平均トレース長は1.78m、標準偏差は1.05mである。

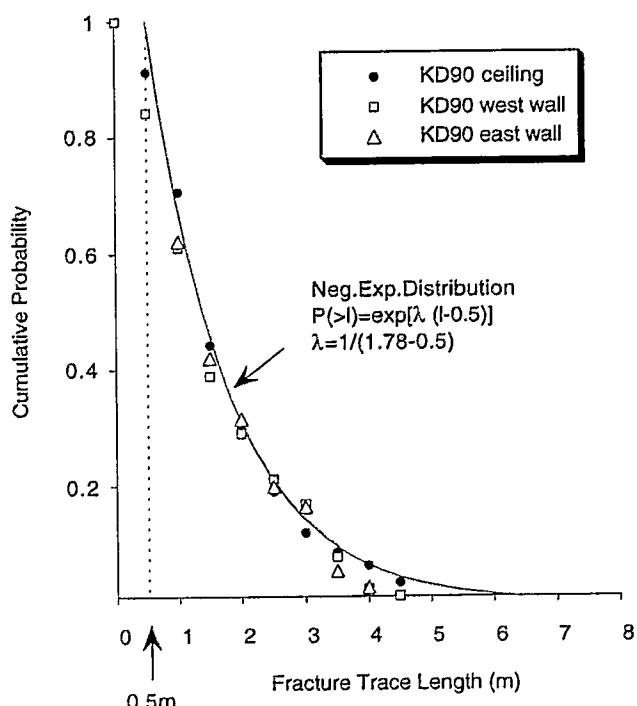


図-6.3.9 トレース長分布 (KD-90坑道壁面)

表-6.3.3 KD-90坑道壁面におけるトレース長の統計量

	トレース数	最大値 (m)	最小値 (m)	標準偏差 (m)	平均トレース長 (m)
KD90坑道 天盤	491	5.420	0.500	1.071	1.797
KD90坑道 西壁	258	4.840	0.500	1.068	1.776
KD90坑道 東壁	277	4.840	0.500	1.021	1.764
平均	342	5.033	0.500	1.053	1.779

先の(a)、(b)の偏りを補正するため、Kulatilake&Wuの方法を用いて平均トレス長を求めた。Kulatilake&Wuの方法では、有限な長方形領域内の観測から真の平均トレス長を推定する手法であり、分布を仮定したり、個々のトレス長を用いる必要がなく、平均トレス長 $\mu$ は次式で与えられる。

$$\mu = \frac{wh(1+m_0/m - m_2/m)}{(wB+hA)(1-m_0/m + m_2/m)}$$

$$A = E[|\cos \theta_i|] = 1/N \sum_{i=1}^N |\cos \theta_i|$$

$$B = E[|\sin \theta_i|] = 1/N \sum_{i=1}^N |\sin \theta_i| \quad (6.7)$$

ここに、 $m_0$ ：両端とも観測できないトレスの数、 $m_2$ ：両端とも観察可能なトレスの数、 $N$ ：全トレス数、 $\theta_i$ ： $i$ 番目のトレスと観察領域の長辺の方向とが成す角、 $w$ 、 $h$ ：各々、サンプリングウインドウの長辺、短辺の長さ、である。

KD90坑道においては、個々のトレスの端形状が以下のように分類・記載されている。

X：トレスの端が調査範囲外へ延びるもの

R：トレスの端が調査範囲内で消滅するもの

D：トレスの端が調査範囲内で他のトレスに切られるもの

B：トレスの端が調査範囲内で他のトレスから枝分かれするもの

ここで、両端とも観測できないトレス数をclass 0、片端が観測できるトレスをclass 1、両端とも観察可能なトレスをclass 2と表す（大西他, 1991）。X以外は全て端を観察できるので、R、D、BをまとめてYと表記すると、

class 2 : X X

class 1 : X Y

class 0 : Y Y

となる。このようにして、KD90坑道内における各classのトレス数を求め、(6.7)式から平均トレス長を算出した結果を表-6.3.4に示す。

端点形状により求められる平均トレス長は、壁面によって若干ばらつくが、

表-6.3.4 Kulatilake&Wuの方法により求めた平均トレス長

	トレス数	class 0	class 1	class 2	平均トレス長 (m)
KD90坑道 天盤	491	26	122	378	0.922
KD90坑道 西壁	258	42	96	133	1.172
KD90坑道 東壁	277	40	62	175	1.759
平均	342	36	93	229	1.284

概ね1~1.7m程度となり、先に算術平均により求めた平均トレース長（1.78m）と大きな差は無い。

次に、前述した(c)の偏り（truncation bias）を補正を行い、トレース長さの真の平均（長さ0~∞の範囲における平均）を推定するとともに、トレース長さ分布の負の指数分布への適合性を検討する。

トレース長の分布が負の指数分布に従うと仮定すると、長さ $\hat{l}$ 以上の範囲における平均トレース長 $\mu_{\text{obs}}$ は、真のトレース長 $\mu_{\text{true}}$ と次の関係にある（大西他, 1991）。

$$\mu_{\text{true}} = \mu_{\text{obs}} - \hat{l} \quad (4.8)$$

この関係を用い、 $\mu_{\text{obs}}$ として算術平均による平均トレース長=1.78mを用いると、真の平均長は $1.78 - 0.50 = 1.28\text{m}$ と算定される。負の指数分布の超過確率関数 $P(l)$ は、次式で与えられる。

$$P(l) = \lambda \exp[-\lambda(l - \hat{l})] \quad (4.9)$$

ここに、 $\lambda = 1 / \mu_{\text{true}}$ である。前出の図-6.3.9の分布に対して、長さ0.5m以上の範囲で負の指数分布を当てはめた結果を同中に示す。この図より、実測のトレース長分布は、長さ0.5m以上の範囲で負の指数分布により良く表されることが分かる。

#### （直径分布の決定）

直径分布の確率密度関数が次式で示される負の指数分布に従うものと仮定する。

$$f_r(r) = \lambda_r \exp[-\lambda_r(r - \hat{r})]$$

$$\lambda_r = \frac{1}{\langle r \rangle - \hat{r}} \quad (4.10)$$

ここに、 $\langle r \rangle$ ：直径の平均、 $\hat{r}$ ：最小直径である。

亀裂を円盤でモデル化した場合、直径の平均とトレース長さの-1乗平均の関係は次のようになる（Oda, 1983）。

$$\langle r \rangle = \frac{\pi}{2\langle l^{-1} \rangle} \quad (4.11)$$

ここに、 $\langle l^{-1} \rangle$ ：トレース長さの-1乗平均である。KD-90坑道壁面のトレース長さのデータ ( $l > 0.5\text{m}$ ) から $\langle l^{-1} \rangle$ を算定すると $0.785(1/\text{m})$ となり、これを上式に代入す

ると $\langle r \rangle = 2.00\text{m}$ が得られる。ただし、負の指数分布においては $\langle l^{-1} \rangle$ が発散するため、解析的には求められない。そこで $l > 0.5\text{m}$ のトレース長の実測値から算定した。

$\langle r \rangle = 2.0\text{m}$ 、 $\hat{r} = 0.5\text{m}$ を用いて亀裂分布を発生し、KD-90坑道壁面に現れるトレース長分布をシミュレートし、実測と比較した結果を図-6.3.10に示す。この図より、実際のトレース長さの分布の再現性が確認される。

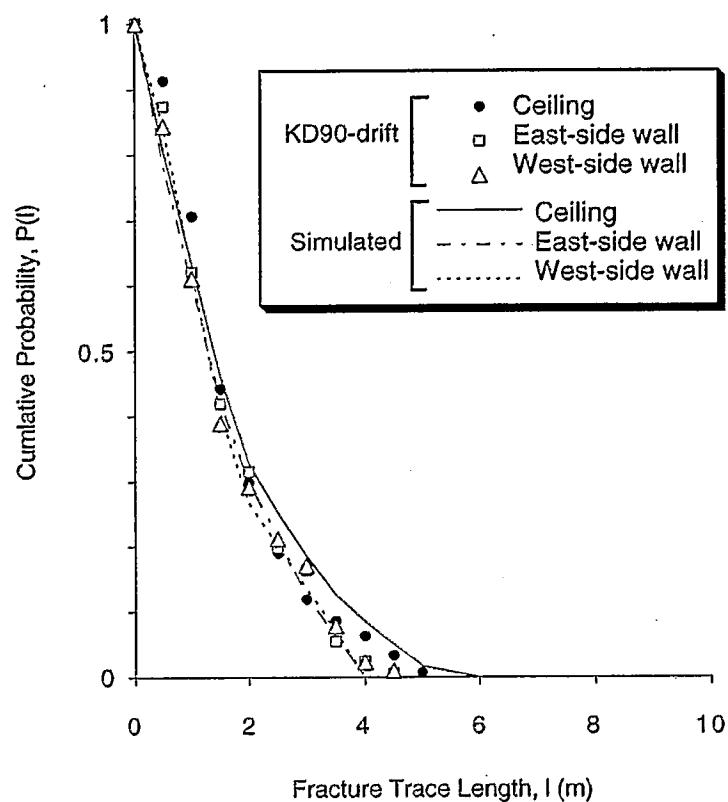


図-6.3.10 トレース長分布  
(実測とシミュレーションの比較、KD-90坑道)

## (2) ボーリング孔内の開口幅分布を用いた評価

ボーリング孔調査では亀裂の広がりについての情報を得ることが難しいので、ここでは平均開口幅と平均直径（またはトレース長）の関係を仮定し、KD-90坑道周辺のボーリング孔（KH-4～18孔）内の平均開口幅から平均直径を評価する。

亀裂の開口幅とトレース長の関係については、菊地他(1987)、白幡他(1994)の実測結果（いずれも花崗岩中）がある。本鉱山内においても、野口他(1991)はNW、NE坑道内において平均直径と平均開口幅を推定し、両者の比（平均開口幅／平均直径）として $5.4 \times 10^2$ を得ている。上記文献の結果をまとめたものを図-6.3.11に示す。また、KD-90坑道天盤・東盤でのトレース長と開口幅の関係を図中に併せて示す。この図から、トレース長と開口幅の相関は弱く1～2オーダ程度ではばらついており、特にKD-90坑道のデータではほとんど相関が見られていない。このように、開口幅から直径を評価することは難しいが、今回は平均直径を平均開口幅の300倍に設定した。

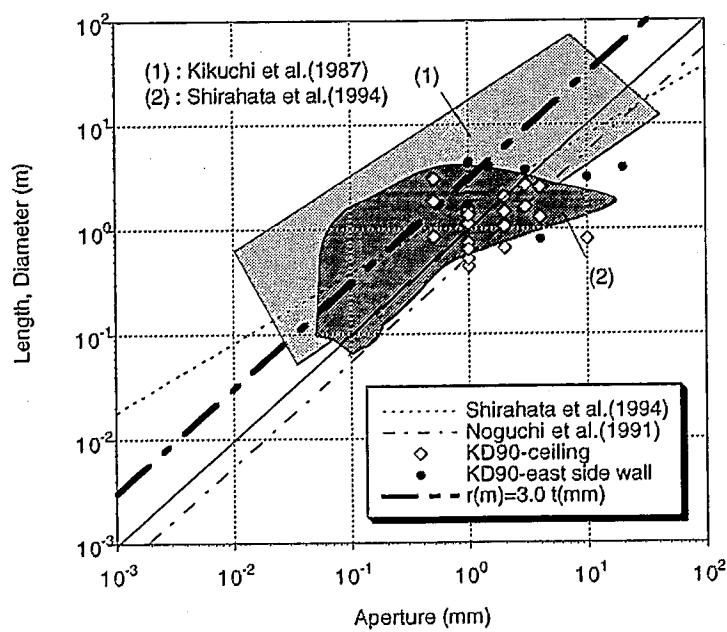


図-6.3.11 亀裂トレース長と開口幅の相関

### 6.3.4 3次元亀裂密度

#### (1) 密度の算定法

亀裂を円盤でモデル化した場合、亀裂中心の3次元亀裂密度 $\rho_v$ （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）。

$$\rho_v = \frac{4}{\pi} \rho_1 \frac{1}{\langle r^2 \rangle} \quad (6.12)$$

ここに、 $\rho_1$ ：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、上式中の直径の2乗平均は、1乗平均を用いて次式で求められる。

$$\langle r^2 \rangle = 2\langle r \rangle^2 \quad (6.13)$$

#### (2) 下限開口幅の設定による発生亀裂数の低減

前述したように、等価不均質連続体モデルによる解析では、個々の亀裂の透水性・異方性は各要素の等価透水テンソルへの寄与分として表現されるため、個々の亀裂をメッシュ化する必要がなく、かなり多くの亀裂を解析に組み込むことが可能である。しかし今回の広域解析においては、全ての亀裂を考慮すると、解析領域内の亀裂数が数100万～数1000万個となり、等価透水テンソルの計算が、計算容量・時間の面で困難となる。そこで、対象を透水性が高いと考えられる比較的大きな開口性亀裂に絞ることにより、発生亀裂数を低減する。

(6.12) 式に (6.5) 式を代入すると、亀裂体積密度と下限開口幅の関係を求められ

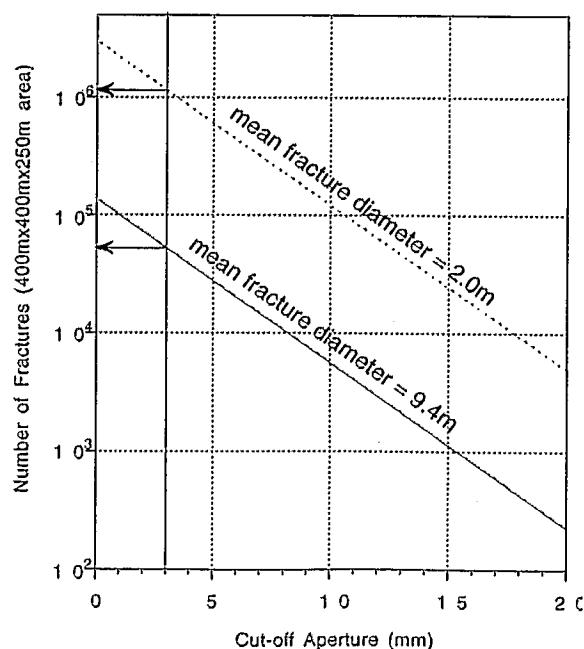


図-6.3.11 下限開口幅と発生亀裂数の関係

る。そして、体積密度に解析領域体積（400m×400m×250m）を乗じることにより、発生亀裂数と下限開口幅の関係を得る。その関係を図-6.3.11に示す。今回は、計算機の記憶容量の限界により、発生亀裂数を100万個程度とし、下限開口幅を3mmに設定した。

### 6.3.5 亀裂統計量のまとめ

以上から決定した亀裂の統計量を下表-6.3.5に示す。また、均一モデルのパラメータを用いて発生した亀裂分布の一例を図-6.3.12に示す。

表-6.3.5 亀裂の統計分布パラメータ

		均一モデル	不均一モデル	
			割れ目ゾーン部	一般部
平均幾何開口幅(mm)		3.1	2	4
最小幾何開口幅(mm)			3	
平均直径(m)	BTVデータ使用	9.4	6	12
	坑道データ使用	2	2	4
一次元亀裂密度(1/m)		$1.80 \times 10^{-1}$	$1.26 \times 10^{-1}$	$2.52 \times 10^{-1}$
三次元亀裂密度(1/m <sup>3</sup> )	BTVデータ使用	$1.31 \times 10^{-3}$	$1.30 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^{-3}$
	坑道データ使用	$3.66 \times 10^{-2}$	$2.57 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-2}$

\* 平均直径について、BTVデータ使用時は平均開口幅から決定した値、坑道データ使用時は坑道壁面トレース長分布から決定した値、を各々示した。

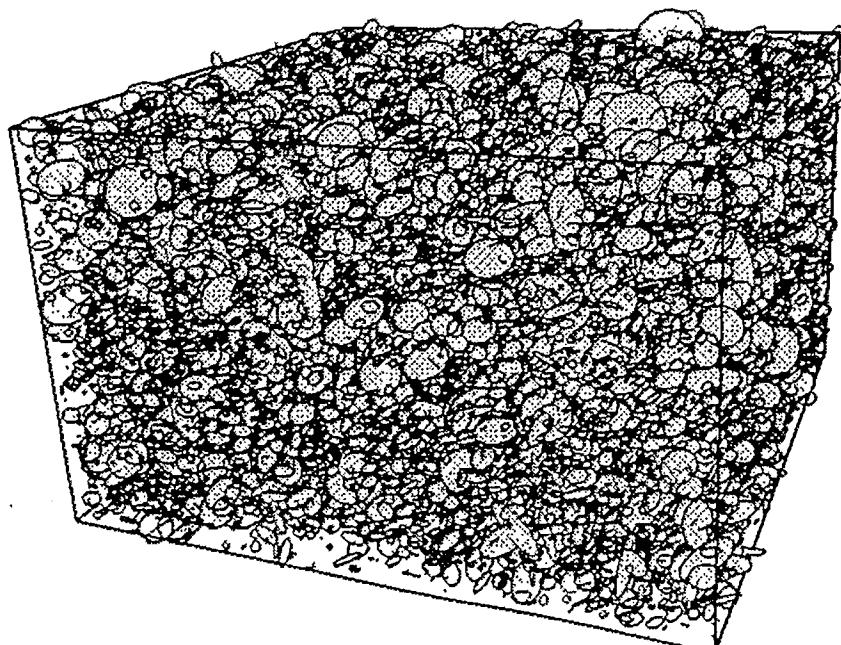


図-6.3.12 発生した亀裂分布の一例

## 6.4 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、次式の比例関係を仮定した。

$$t_h = \alpha \cdot t_g \quad (6.14)$$

上記比例定数 $\alpha$ を求めるために、先に決定した亀裂パラメータ（均一モデル）を用いて透水試験のシミュレーションを行い、それをKH-5孔の透水試験結果と比較した。

まず、図-6.4.1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を与える、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乱数初期値を変えて100ケース行い透水係数の分布を求めた。実際の透水試験（KH-5孔、JFT試験および低圧ルジオン試験）による分布と比較した結果を図-6.4.2に示す。ただし、シミュレーションの透水係数値は $10^6$ 倍してある。つまり、亀裂面内流れの三乗則が成り立つとすれば、 $\alpha = (10^6)^{1/3} = 10^2$ とすると、実測の透水係数分布がほぼ再現できることが分かる。

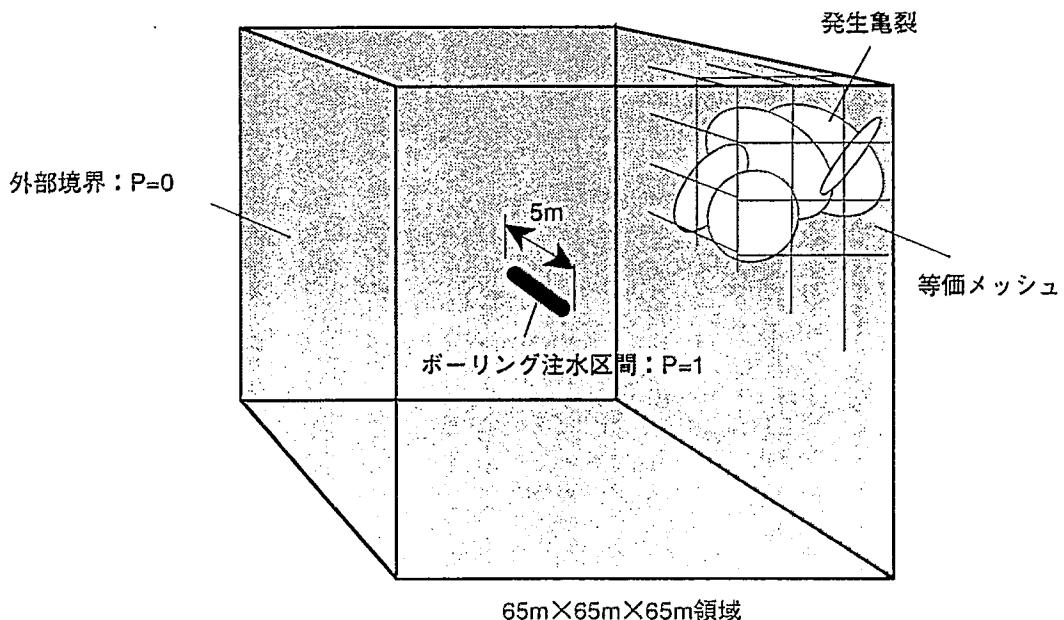


図-6.4.1 透水試験シミュレーションの解析条件

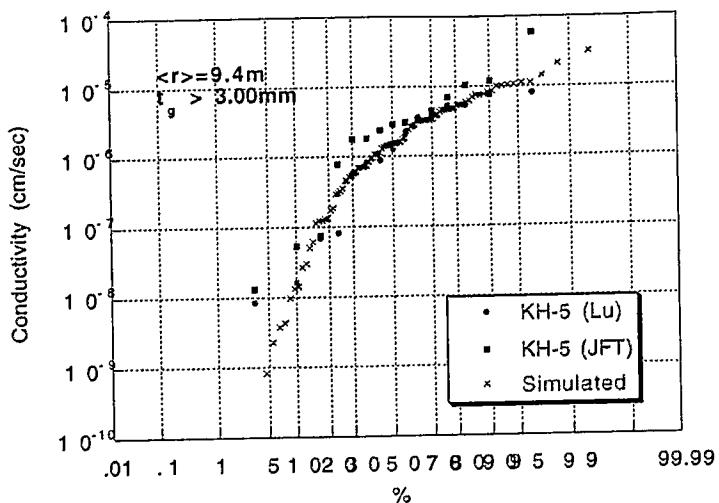


図-6.4.2 透水試験のシミュレーション結果と実測との比較

## 6.5 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-6.5.1）。

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-6.5.2）。

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-6.5.3）。

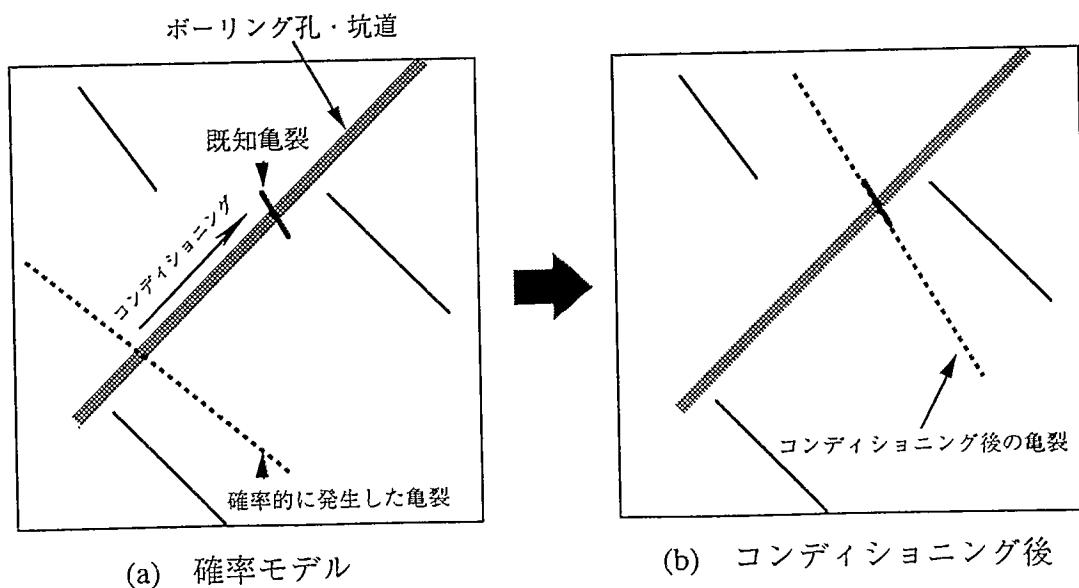


図-6.5.1 亀裂分布のコンディショニング

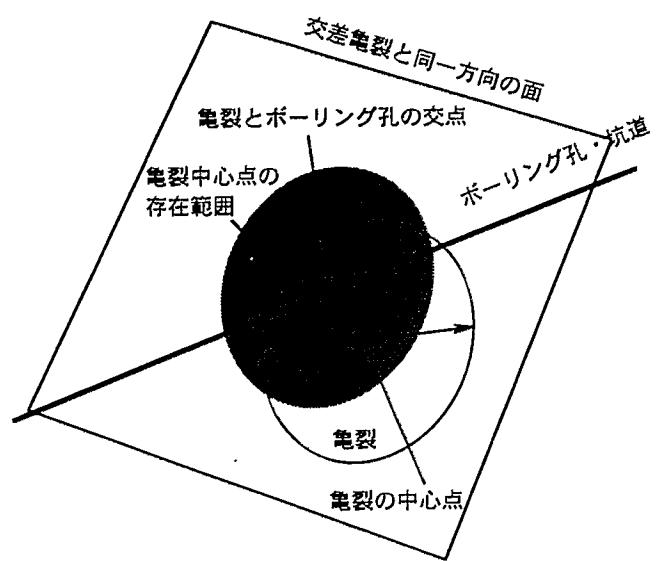


図-6.5.2 コンディショニング時の亀裂中心点の存在範囲  
(中心点位置は、網掛けの範囲内で乱数により決定)

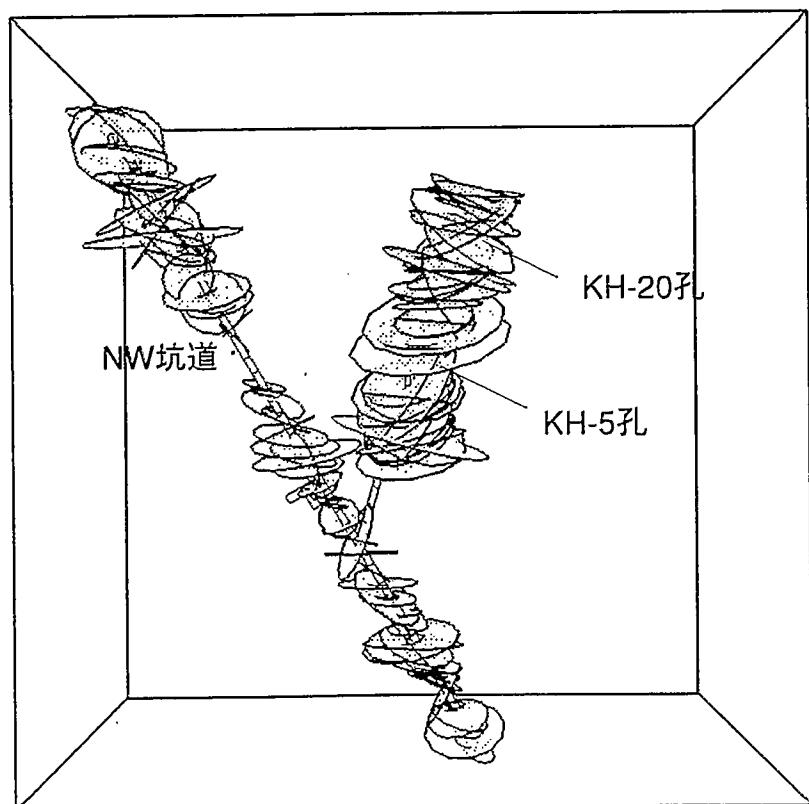


図-6.5.3 コンディショニングにより得られた亀裂分布  
(コンディショニングした亀裂のみを表示)

## 6.6 等価不均質連続体モデルの作成

### 6.6.1 クラックテンソルにより求めた平均的な透水異方性

等価不均質連続体モデルは、透水テンソルを要素毎に求めるため、得られる透水テンソルは不均質になる。そこで、全体の平均的な傾向を確認するために、クラックテンソルにより透水テンソルを次式により求めた（Oda, 1983）。

$$K_{ij} = \lambda (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij})$$

ここに、

$$P_{ij} = (\pi \rho_v / 4) t_h^3 \langle r^2 \rangle N_{ij}$$

$$N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n)$$

であり、 $\rho_v$ ：亀裂の体積密度( $1/m^3$ )、 $t_h$ ：水理開口幅(m)、 $r$ ：亀裂の直径(m)、 $n_i$ ：亀裂面の単位法線ベクトルnのxi軸に対する成分、 $E(n)$ ：nの確率密度関数、 $\Omega$ ：全立体角( $=4\pi$ )、 $d_{ij}$ ：クロネッカーデルタ、 $\lambda$ ：亀裂の連続性に関する係数( $=1/12$ )である。

均一モデルの亀裂統計量を用いて透水テンソルを算定した結果を表-6.7.1と図-6.7.1に示す。最大および中間主軸の方向は、最も卓越するセット1の平均面上にあり、最小/最大比は0.38となった。なお、平均透水係数 $K_m$ は $4.8 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ である。

表-6.6.1 クラックテンソルにより求めた透水テンソル

	$K_i/K_1$	主軸方位	主軸傾斜
$K_1$	1	275°	63°
$K_2$	0.94	36°	13°
$K_3$	0.38	131°	22°

方位は北を0° 東回りを正、傾斜は水平を0° 垂直を90° とした角度

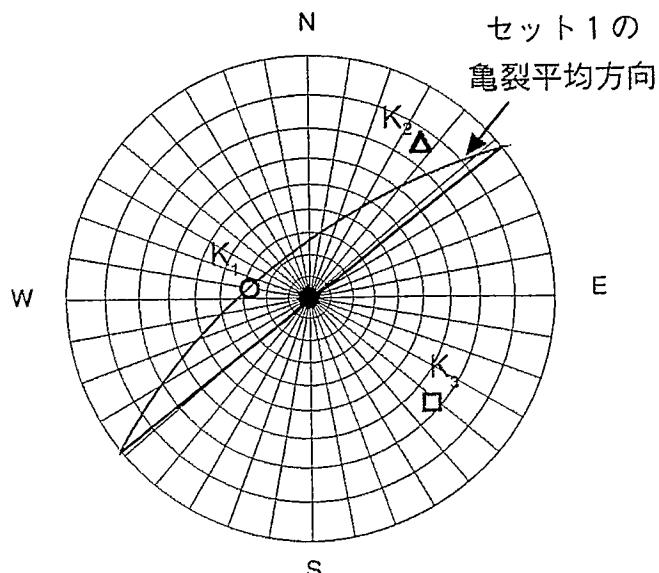


図-6.6.1 クラックテンソルによる透水テンソルの主軸方向

## 6.6.2 モデルの作成結果

今回作成した透水係数分布モデルのケース一覧を表-6.6.2に示す。各モデルについて得られた各要素の平均透水係数 ( $= (K_{11}+K_{22}+K_{33}) / 3$ ) の分布を図-6.7.3 (CASE21～CASE24) と図-6.6.4 (CASE31～CASE34) に示す。両図の違いは、平均亀裂直径の違い (各々9.3mと2.0m) であり、亀裂直径が小さいと亀裂密度が高くなるため (4.2式参照)、後者の分布の方が、透水係数のバラツキが小さく均一に近い。図-6.7.2にCASE24における解析要素の体積と平均透水係数の関係を示すが、要素体積が大きい程REVに近づき、透水係数のバラツキが小さくなっていることが分かる。

表-6.6.2 透水係数分布モデル

透水係数分布モデル	亀裂分布	コンディショニング	使用データ
CASE 21	均一	×	ボーリングのみ
CASE 22	不均一	×	ボーリングのみ
CASE 23	均一	○	ボーリングのみ
CASE 24	不均一	○	ボーリングのみ
CASE31	均一	×	ボーリング十坑道
CASE 32	不均一	×	ボーリング十坑道
CASE 33	均一	○	ボーリング十坑道
CASE 34	不均一	○	ボーリング十坑道

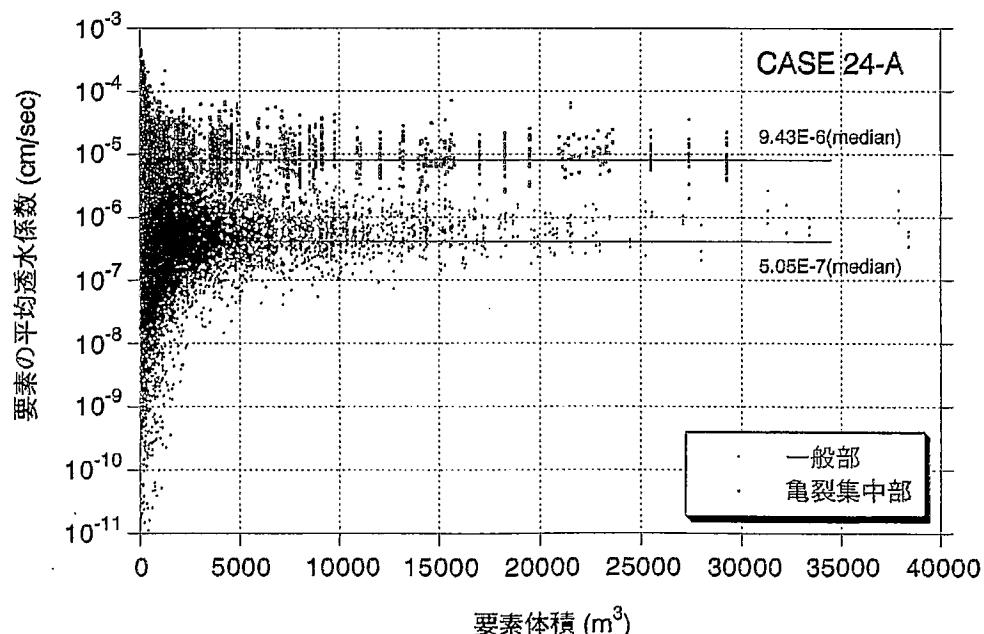


図-6.6.2 要素の体積と平均透水係数の関係 (CASE24)

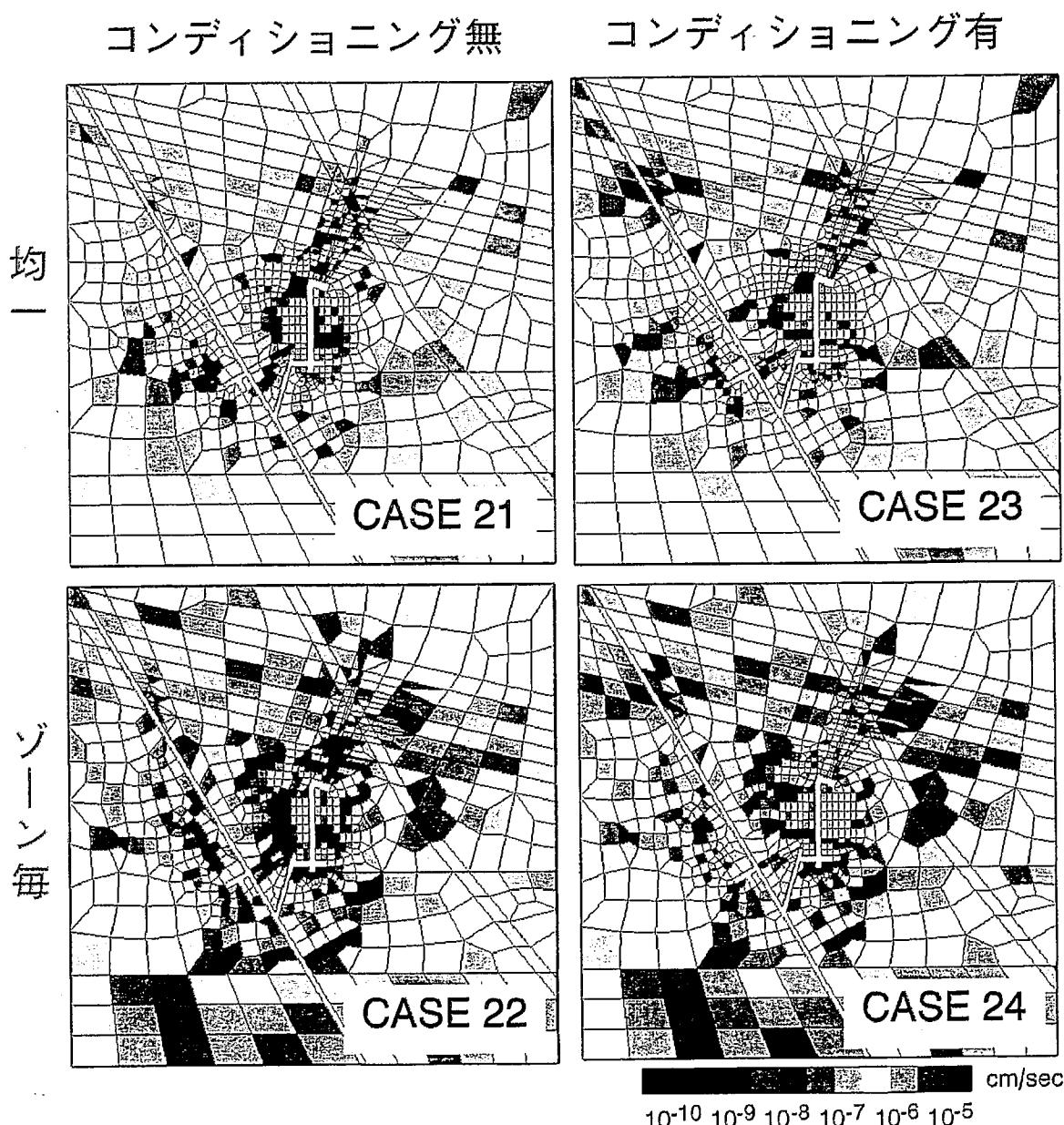
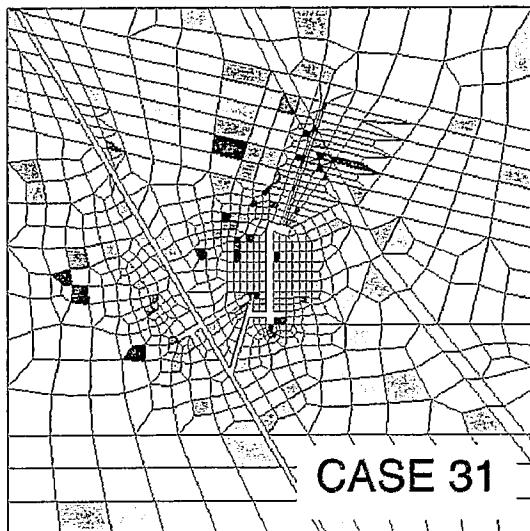


図-6.6.3 等価不均質連続体モデルによる透水係数分布（CASE 21～24）

均一  
ゾーン毎

コンディショニング無



コンディショニング有

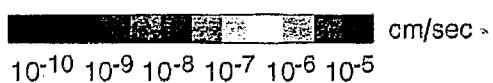
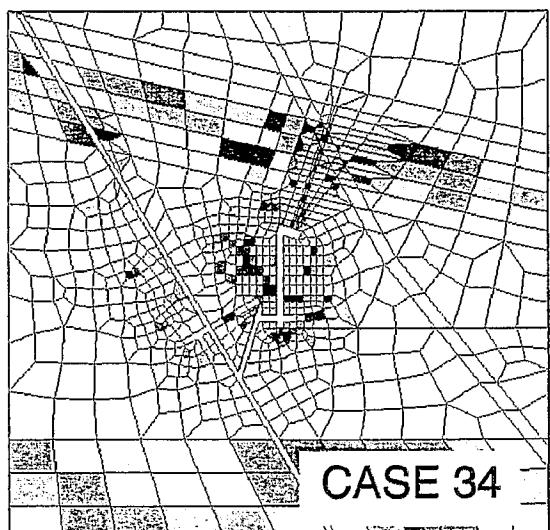
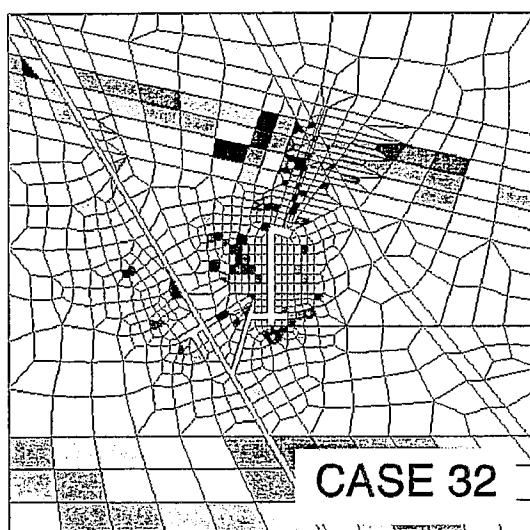
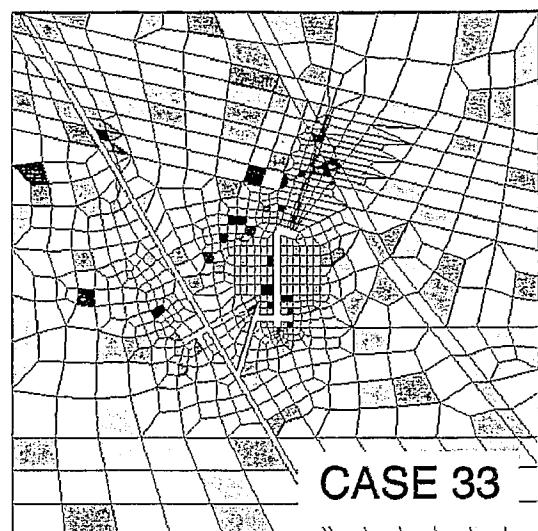


図-6.6.4 等価不均質連続体モデルによる透水係数分布 (CASE 31~34)

## 7 定常3次元浸透流解析

### 7.1 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)、 $\psi$ は圧力水頭である。

### 7.2 解析メッシュ

解析メッシュの鳥瞰図を図-7.2.2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-7.2.1)。

### 7.3 解析ケース

解析ケース一覧を表-7.3.1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。

表-7.3.1 解析ケース一覧

	解析モデル	境界条件(kgf/cm <sup>2</sup> )		透水係数
		割れ目ゾーンA	その他の部分	
CASE1	割れ目ゾーンモデル	20	10	表-5.1.2参照
CASE21~24	等価不均質連続体モデル	〃	〃	ボーリング孔データ使用 (表-6.6.2、図-6.6.3参照)
CASE31~34	〃	〃	〃	ボーリング孔+坑道データ (表-6.6.2、図-6.6.4参照)

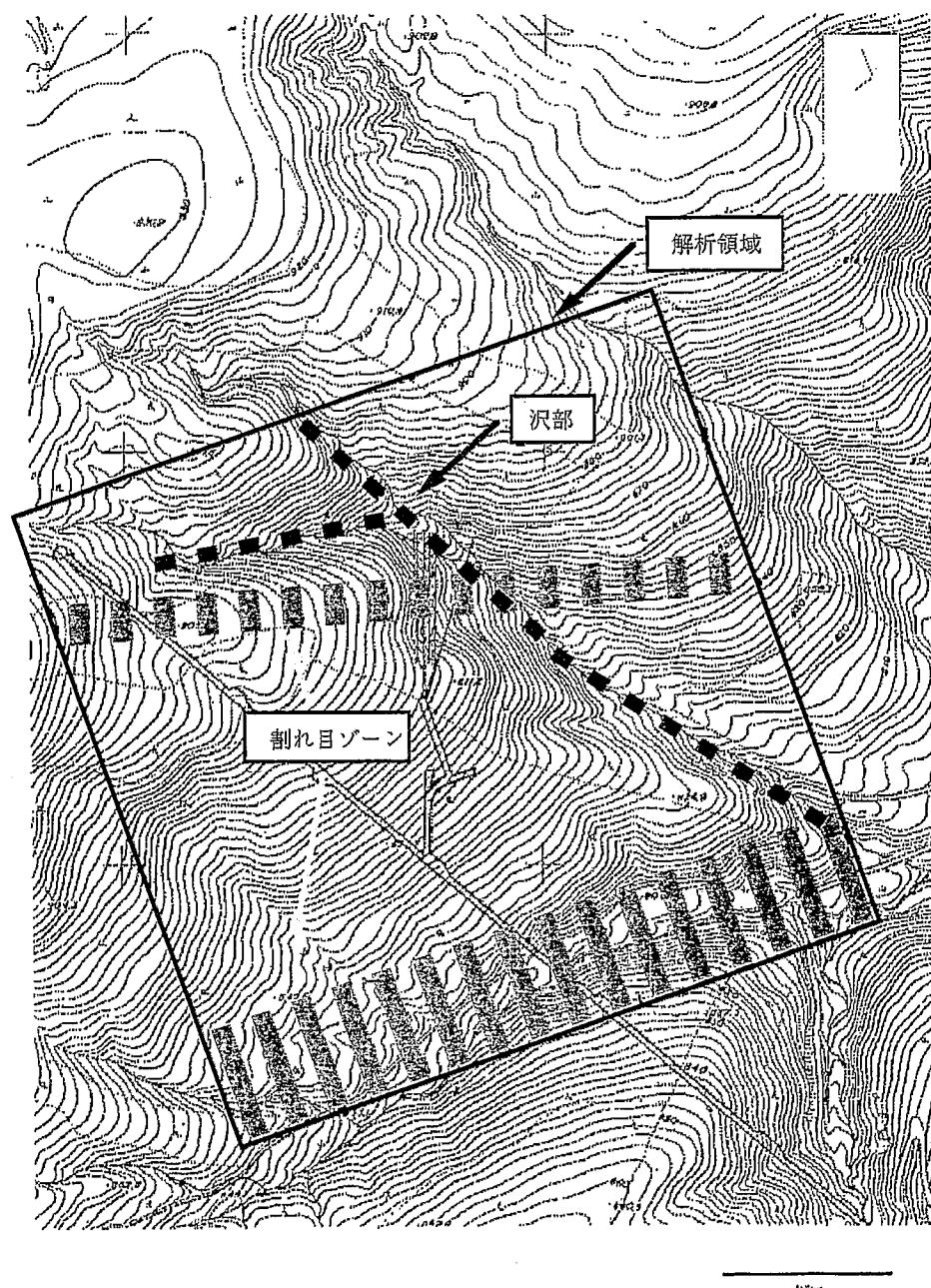


図-7.2.1 解析メッシュで考慮した地形・地質（平面図）

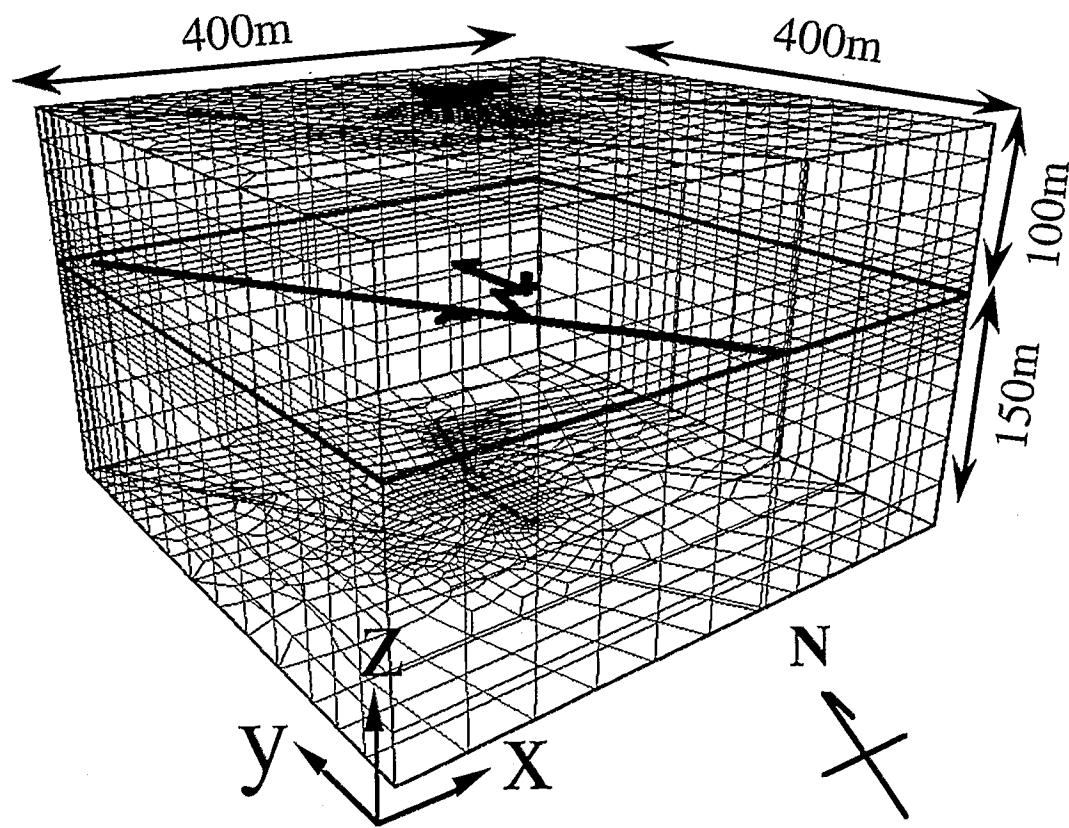
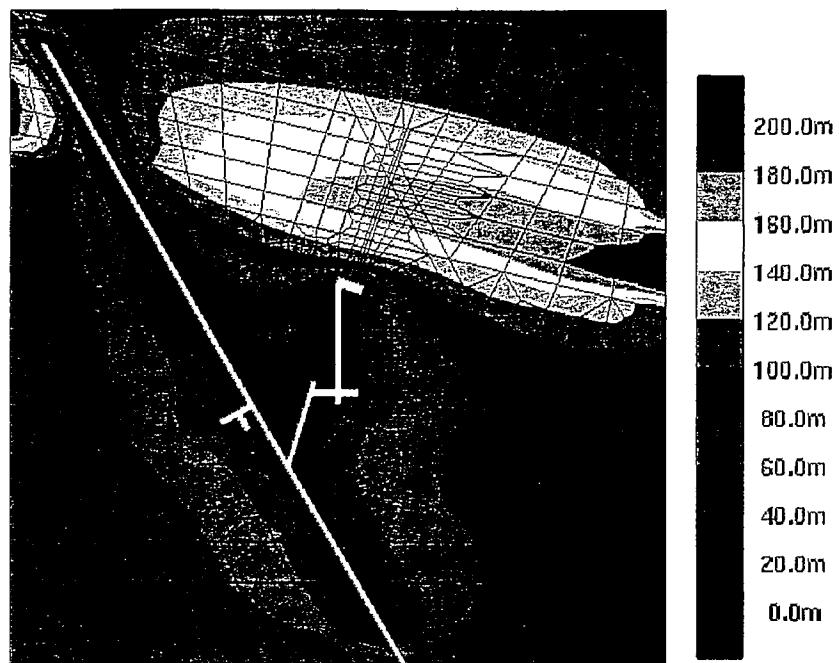


図-7.2.2 解析メッシュ鳥瞰図

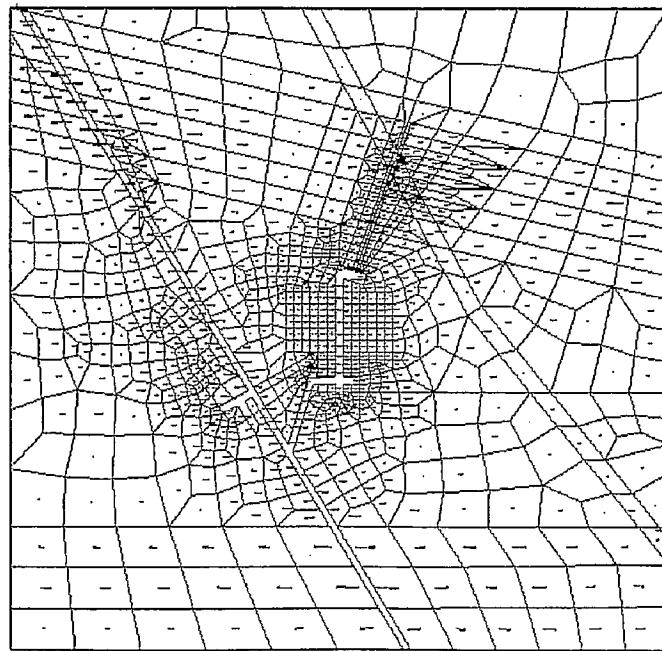
## 7.4 解析結果

### 7.4.1 解析領域全般の水理状況

CASE1～CASE34の全ての解析ケースについて、550m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-7.4.1～図-7.4.5に示す。また、均一モデルにおけるコンディショニングの有無（CASE21とCASE23）による流速ベクトルの比較を図-7.4.6に示す。



(a) 間隙水圧分布

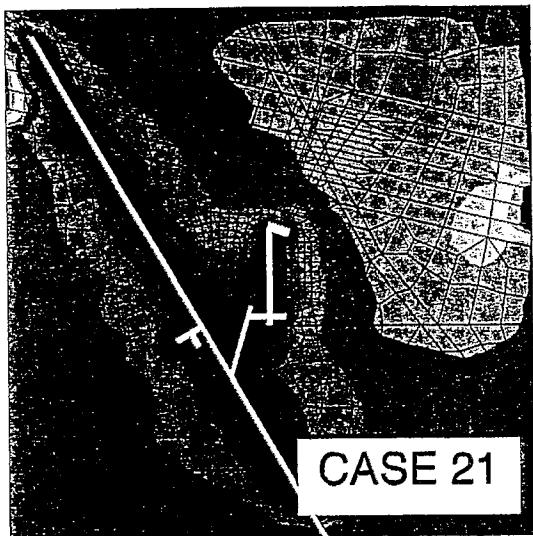


(b) 流速ベクトル分布

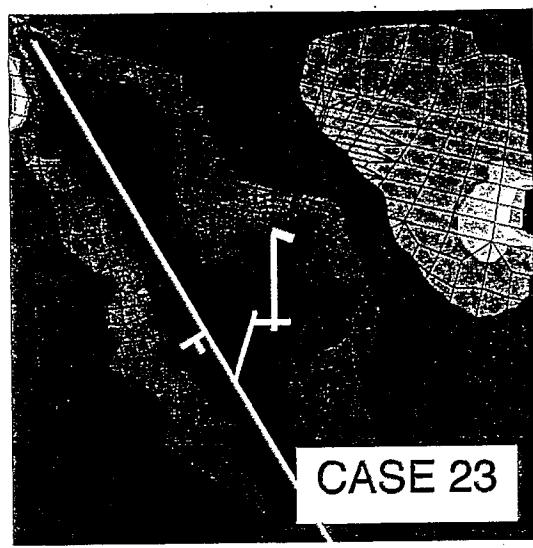
図-7.4.1 順解析結果（ゾーンモデル、CASE1）

均

コンディショニング無



コンディショニング有



ゾーン毎

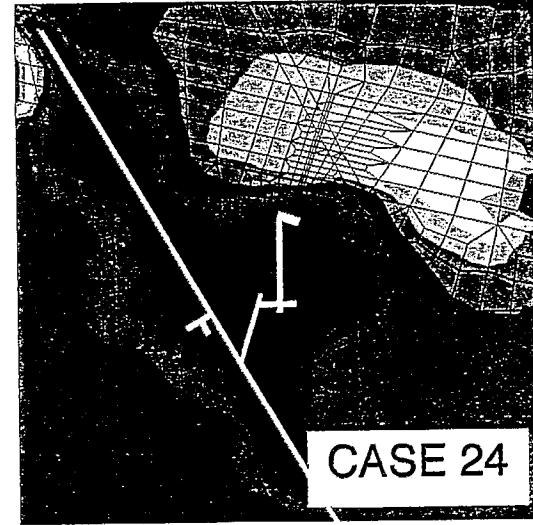
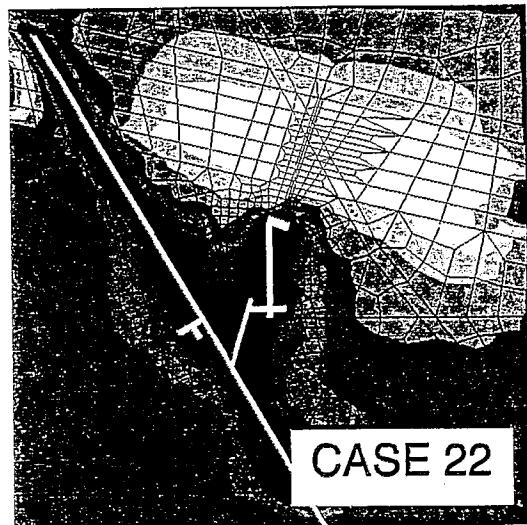
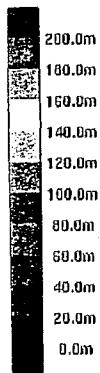


図-7.4.2 順解析結果  
(水圧分布、等価不均質連続体モデル、CASE21~24)



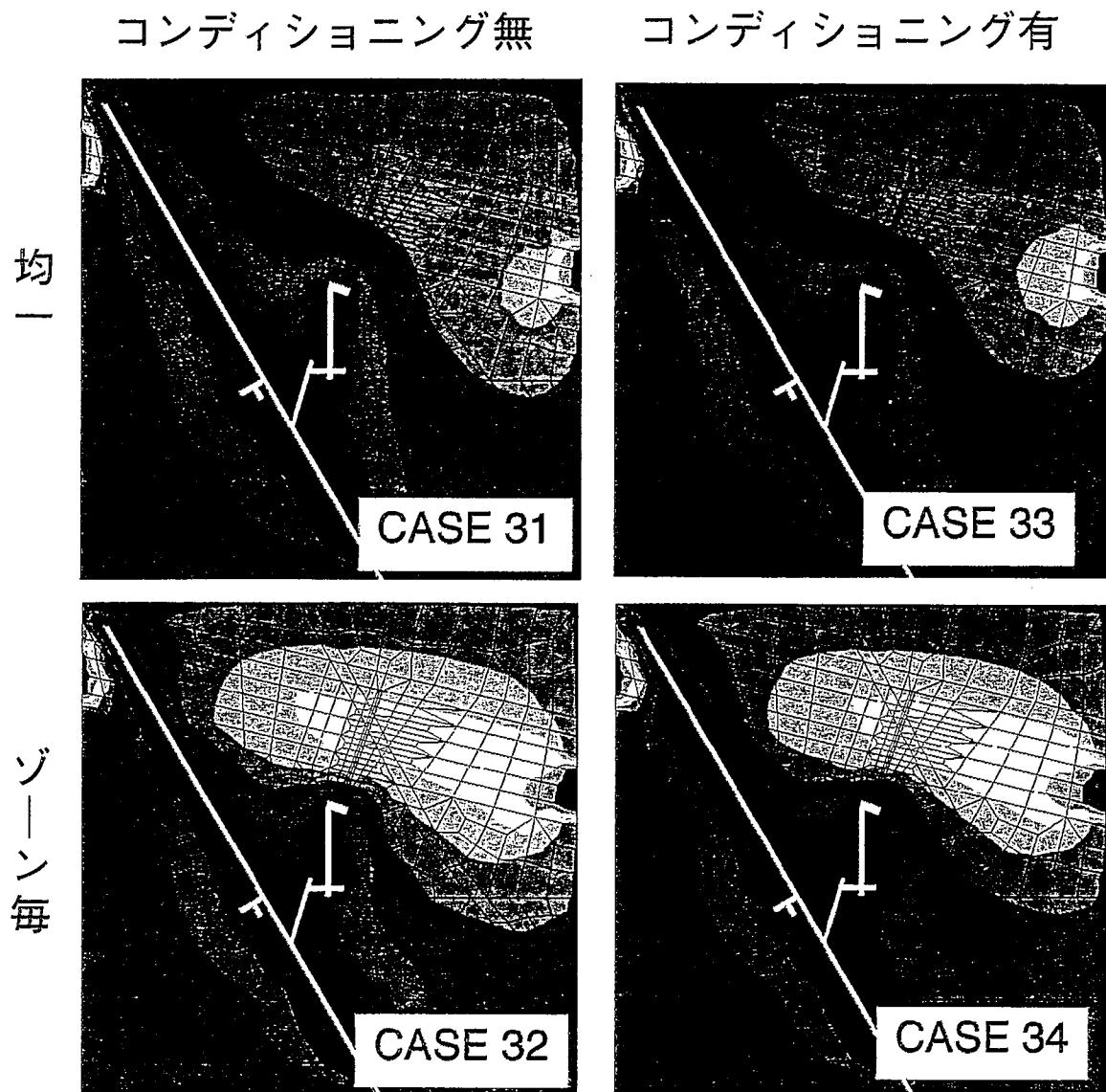
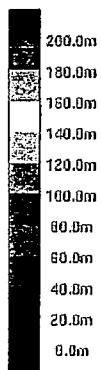
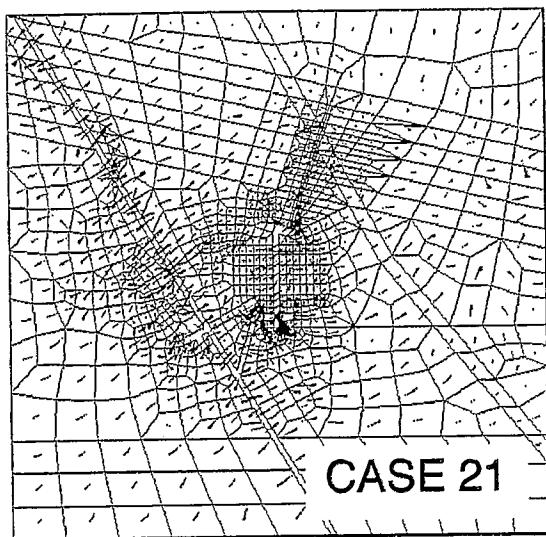


図-7.4.3 順解析結果  
(水圧分布、等価不均質連続体モデル、CASE31～34)



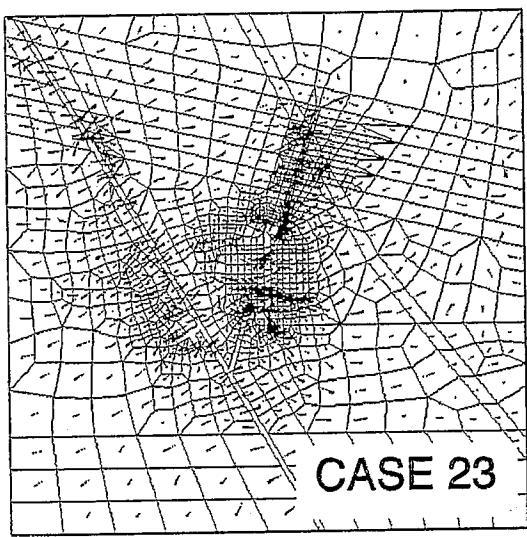
均  
一  
  
不  
均  
一

コンディショニング無

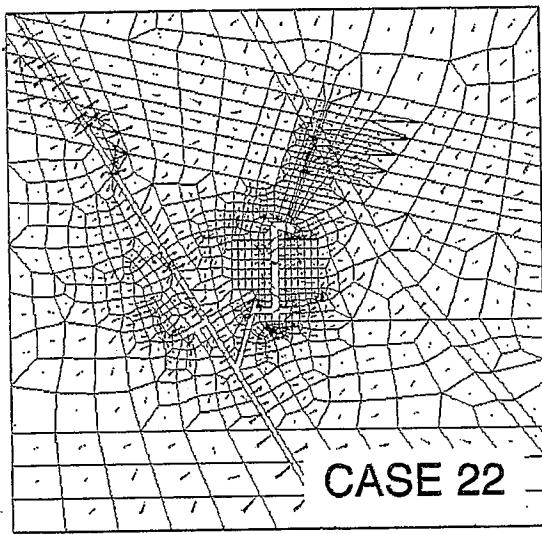


CASE 21

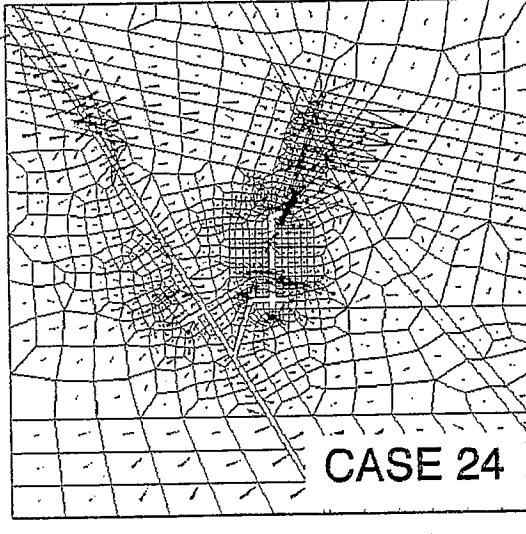
コンディショニング有



CASE 23



CASE 22



CASE 24

図-7.4.4 順解析結果  
(流速ベクトル分布、等価不均質連続体モデル、CASE21~24)

均  
一  
ゾーン毎

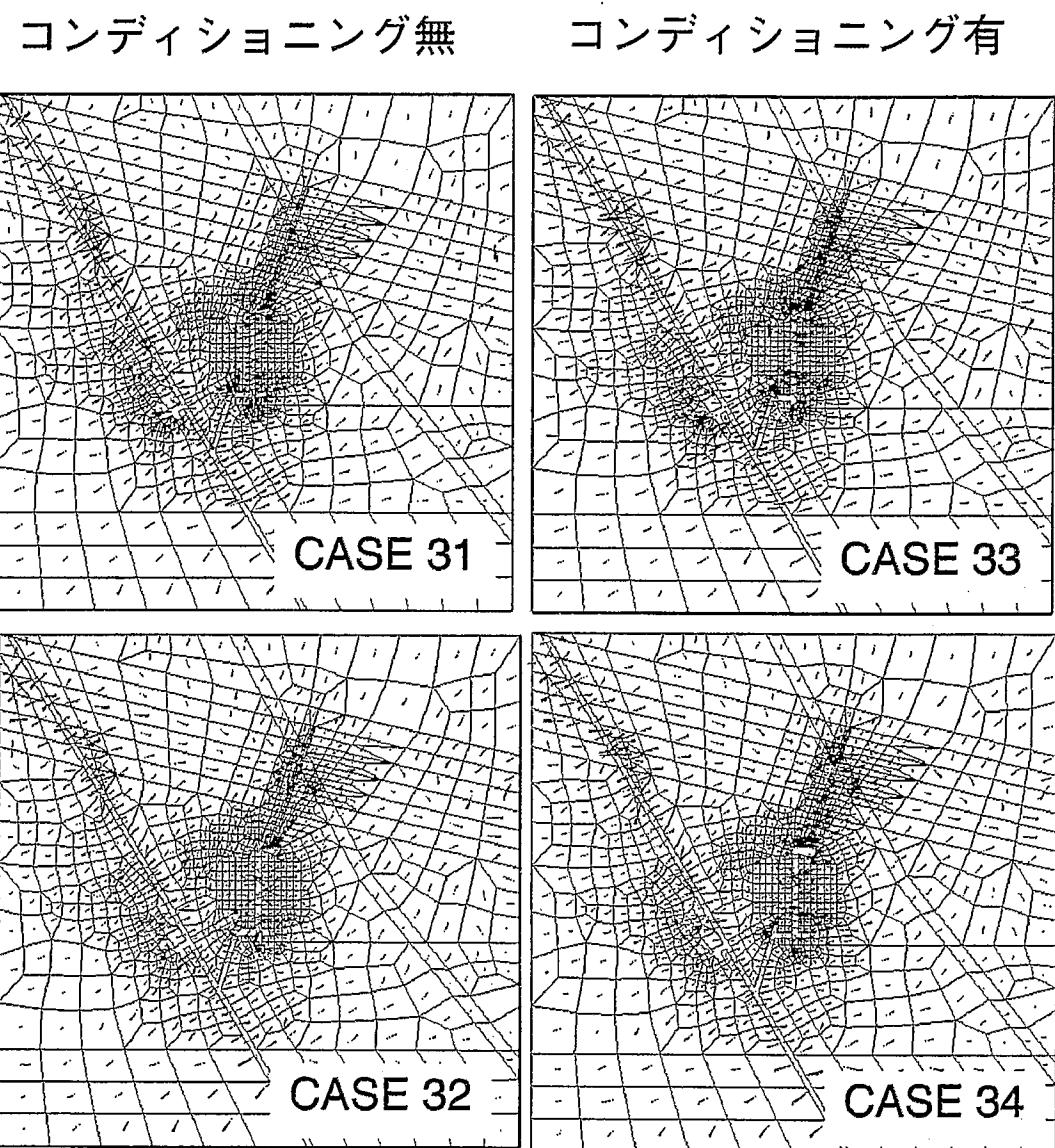
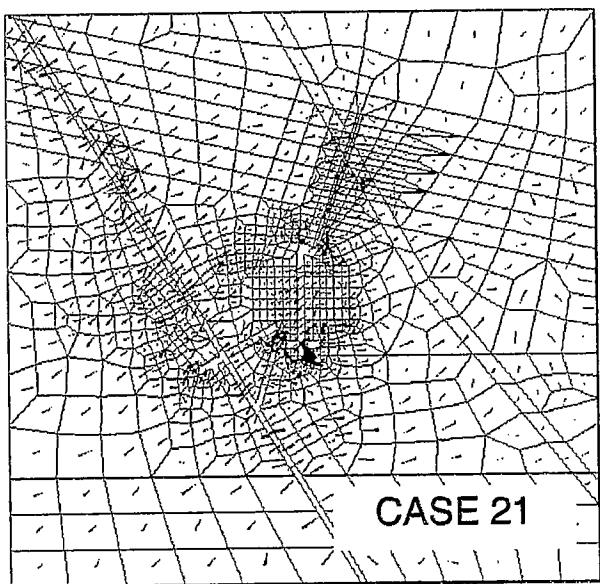


図-7.4.5 順解析結果  
(流速ベクトル分布、等価不均質連続体モデル、CASE31~34)

コンディショニング前



コンディショニング後

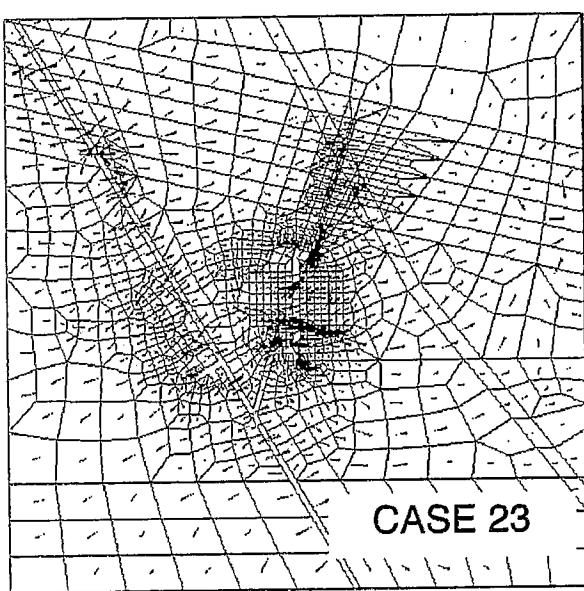


図-7.4.6 コンディショニング前後での流速ベクトル分布の比較

#### 7.4.2 試錐孔内の間隙水圧分布

##### (a) 各解析ケースの結果の比較

ここでは、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について示す。

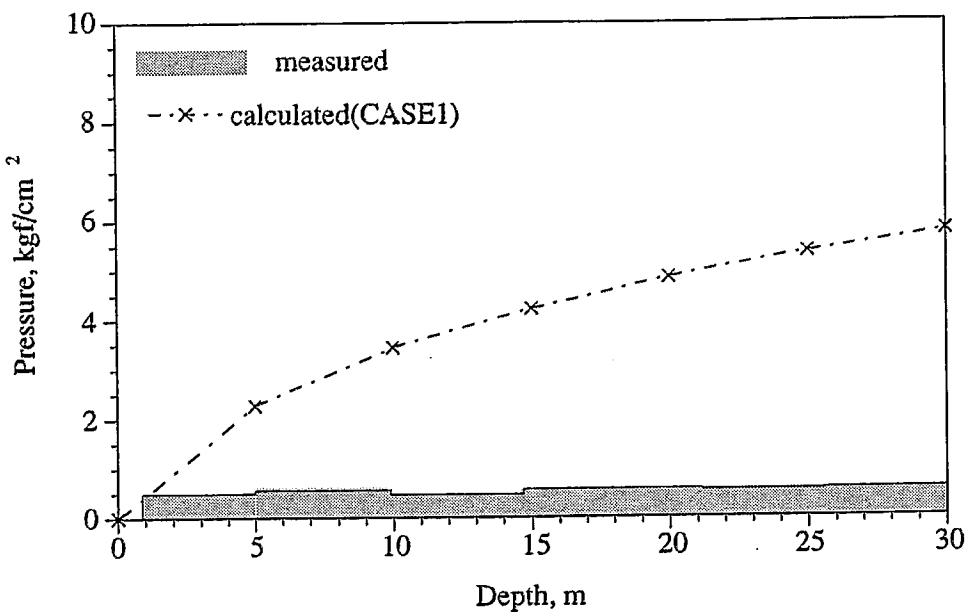
まず、図-7.4.7に割れ目ゾーンモデル（CASE1）の結果を示す。KH-19孔の高水圧をほぼ再現できているが、KD-90坑道周辺のKH-11孔内の水圧が観測値に比べて高くなっている。前年度の結果と同様に、KD-90坑道周辺の水圧低下を表現できていない。

次に等価不均質連続体モデルの結果を図-7.4.8と図-7.4.9に示す。

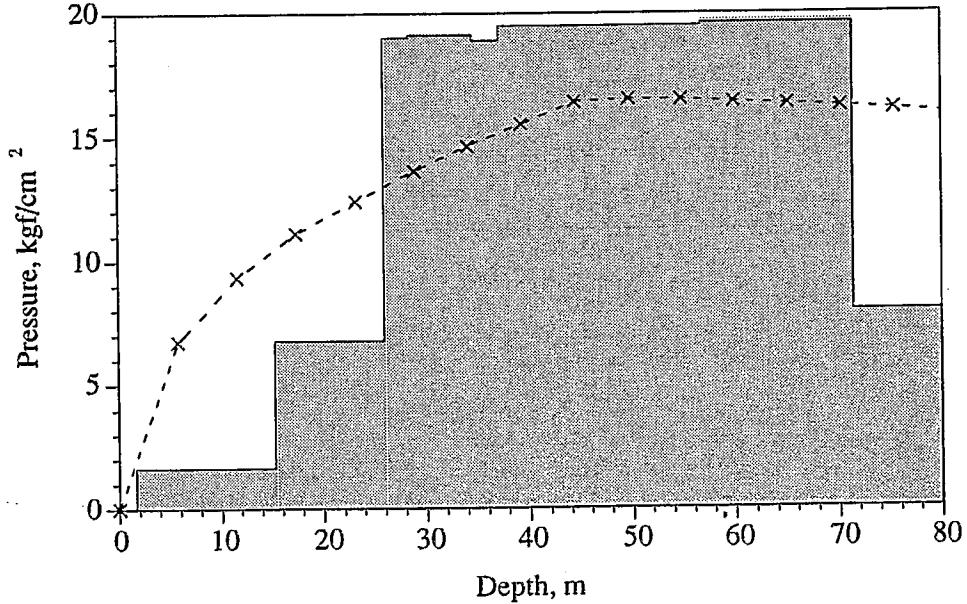
まず、ボーリング孔データから求めた平均亀裂直径 ( $r=9.4m$ ) を用いたCASE21～CASE24の結果（図-7.4.8）では、ゾーニングの有無により違いが見られ、ゾーニングを行ったケース（CASE22とCASE24）ではゾーニングを行わない（CASE21とCASE23）と比べて、観測値に見られるようなKD-90坑道周辺（KH-11孔）と高間隙水圧帯内部（KH-19孔）との水圧のコントラストが大きくなっている。特に、コンディショニングを施したCASE24ではKH-11孔の観測水圧をほぼ再現できている。

次に、坑道のトレース長分布から推定した平均亀裂直径 ( $r=2.0m$ ) を用いたCASE31～34の結果（図-7.4.9）では、各ケースの特徴は、上述のCASE21～CASE24と同様の傾向にあるが、水圧分布のコントラストはCASE21～CASE24より低くなっている。これは、CASE21～24に比べて平均亀裂直径が小さく亀裂密度が大きいため、亀裂分布から求めた透水係数分布が相対的に均一になっているためと考えられる。

割れ目ゾーンモデルと等価不均質連続体モデルの比較として、割れ目ゾーンモデルのCASE1、ならびに等価不均質連続体モデルのうち最も観測値に近いCASE 24の結果を図-7.4.10に併せて示した。同図中、等価不均質連続体モデルについては、亀裂発生の乱数初期値を変えた3つのリアライゼーション（CASE 24a～c）について結果を示すが、いずれも同様の結果が得られた。

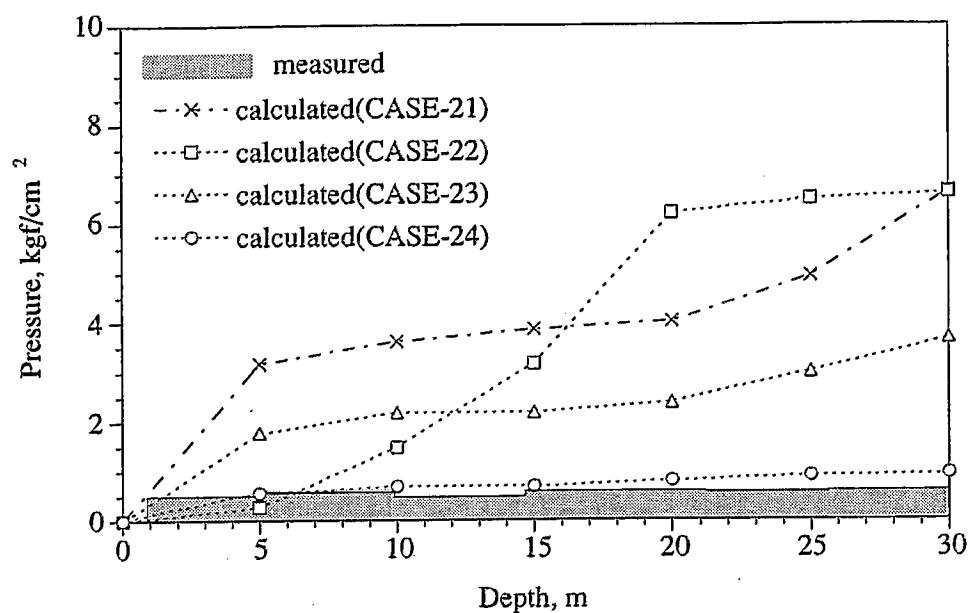


(a) KH-11孔 (KD-90坑道周辺)

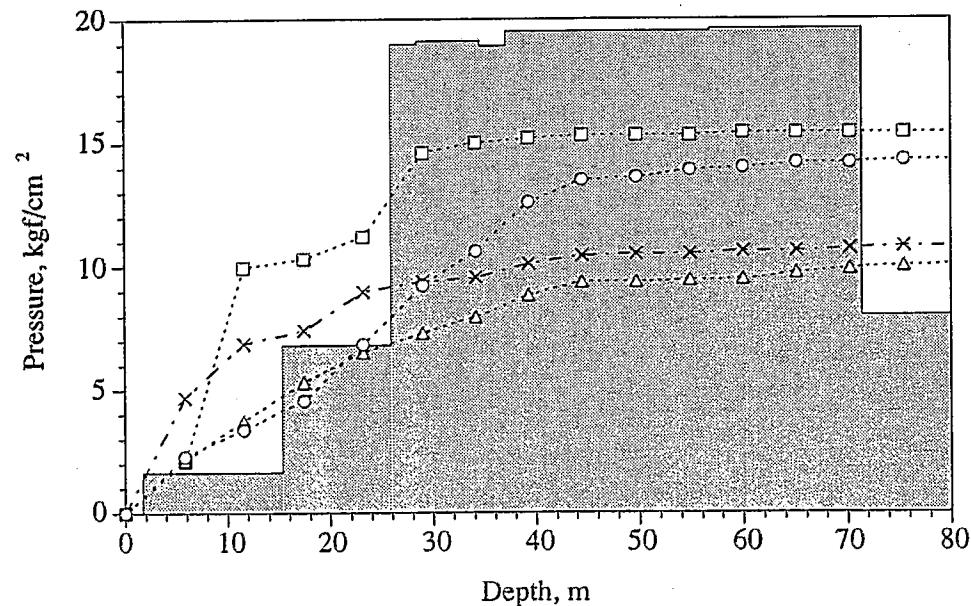


(b) KH-19孔 (高水圧帯内部)

図-7.4.7 間隙水圧の実測値と解析結果  
(割れ目ゾーンモデル、CASE1)

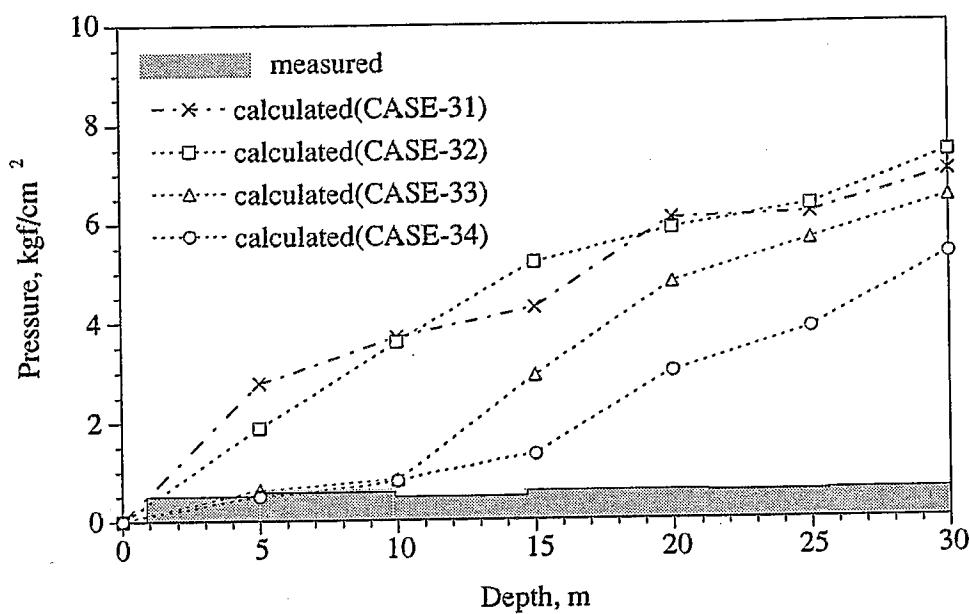


(a) KH-11孔 (KD-90坑道周辺)

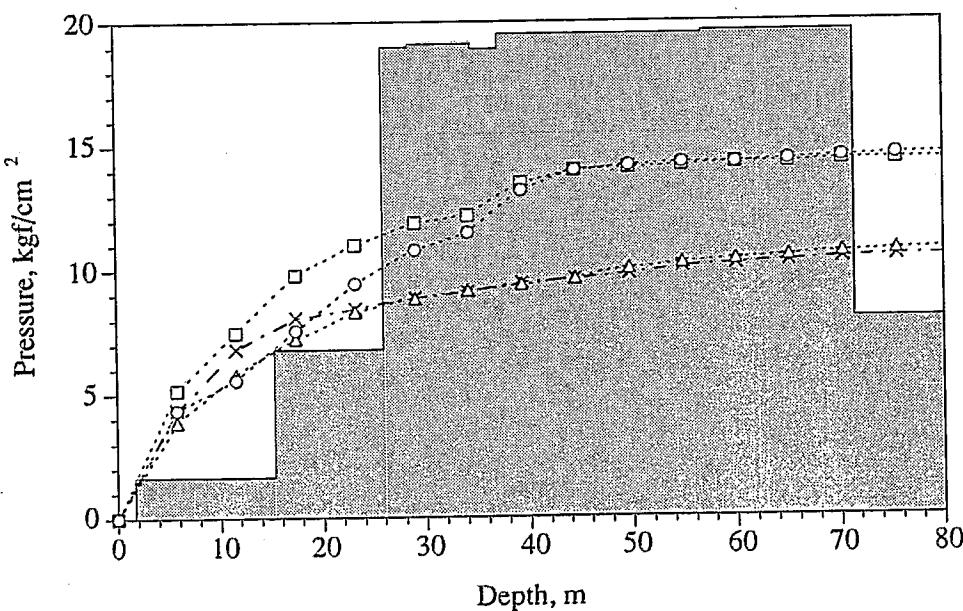


(b) KH-19孔 (高水圧帯内部)

図-7.4.8 間隙水圧の実測値と解析結果  
(等価不均質連続体モデル、CASE21, 22, 23, 24)

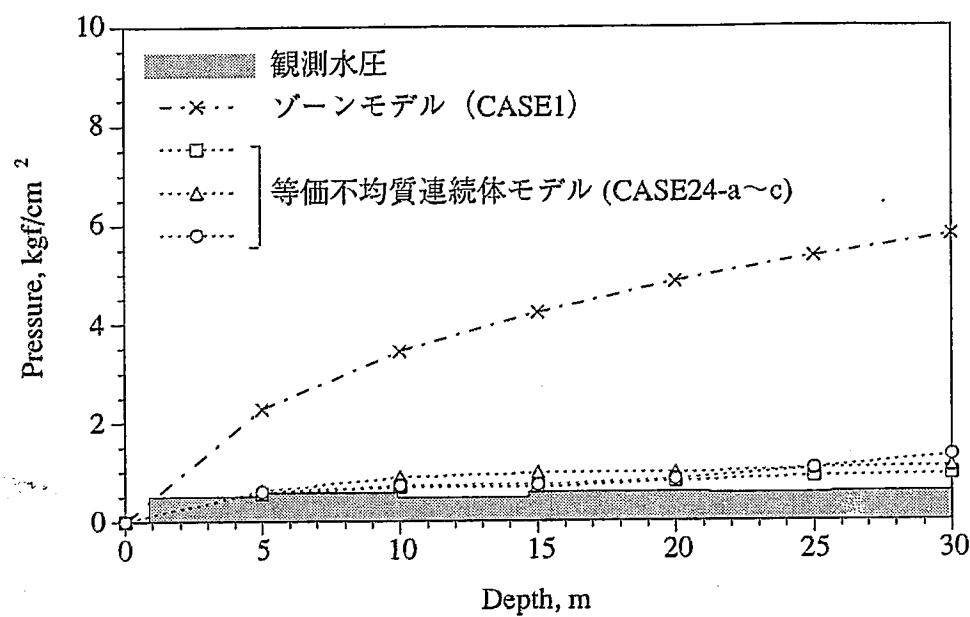


(a) KH-11孔 (KD-90坑道周辺)

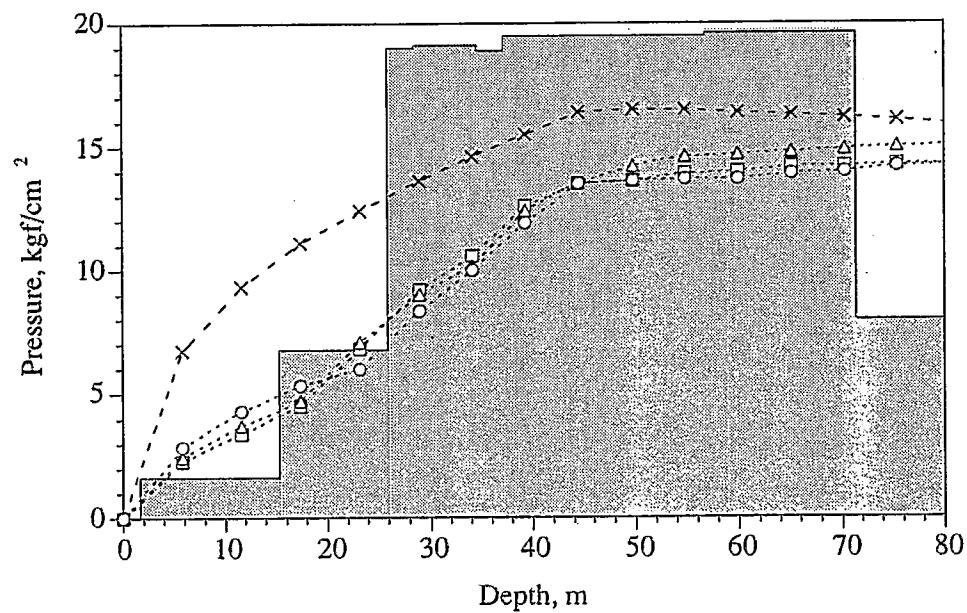


(b) KH-19孔 (高水圧帯内部)

図-7.4.9 間隙水圧の実測値と解析結果  
(等価不均質連続体モデル、CASE31, 32, 33, 34)



(a) KH-11孔 (KD-90坑道周辺)



(b) KH-19孔 (高水圧帯内部)

図-7.4.10 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) )

### (b) 水圧分布の計算結果に関する考察

透水係数の分布の違いは水圧分布の差異として現れており、特に、等価不均質連続体モデルの結果では、局所的な透水係数の不均質性を考慮しない従来モデル（割れ目ゾーンモデル）に比べて、KD-90坑道周辺の広い範囲において水圧低下ゾーンが形成されている事が分かる。KD-90坑道の壁面から東西方向に削孔されたボーリング孔（KH-11孔）内の観測水圧分布と比較すると（図-7.4.10(a)）、等価不均質連続体モデルで得られたような坑道周辺の水圧低下が実際に生じていることが分かる。水圧低下領域が生じる原因は、坑道に交差する開口亀裂からの排水に対して、周辺岩盤から十分な地下水の供給が行なわれないことに起因するものと考えられる。このような、亀裂からの湧水に起因する水圧場は、従来の局所的な透水性の不均一性を考慮しない連続体モデルを用いて表現することは困難である。一方、図-7.4.10(b)に示したように、KD-90坑道から北向きに削孔された高水圧帯を貫通するボーリング孔（KH-19孔）内の水圧分布は、割れ目ゾーンモデルのほうが、高圧部の水圧を良く表現できている。図-7.4.2と図-7.4.3を比較すると、割れ目ゾーンモデルでは、亀裂集中部で均質な透水係数を与えていたため、解析領域内部まで高水圧部が広がっているのに対して、等価不均質連続体モデルでは、透水係数の不均質性により、外部境界で与えた局所的な高水圧が領域内部まで及びにくい状況が見られる。しかし、高水圧帯の境界上に水圧観測点がないため、両解析結果の妥当性の定量的な評価は困難である。

各解析ケースの結果を定量的に比較するために、次式により水圧の相対誤差 $\sigma_{\text{err}}$ を算定した。

$$\sigma_{\text{err}}^2 = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{P_{\text{obs}} - P_{\text{cal}}}{P_{\text{obs}}} \right)^2$$

ここに、 $P_{\text{obs}}$ ：観測水圧、 $P_{\text{cal}}$ ：計算水圧、 $n$ ：観測節点数である。表-7.4.1と図-7.4.8にその結果を示す。CASE24が最も $\sigma_{\text{err}}$ が小さいことから、次節で述べる逆解析のうち、等価不均質連続体モデルのケースではCASE24の透水係数分布を初期モデルとして採用することにした。

表-7.4.1 孔内水圧の相対誤差

	全孔	KD90坑道周辺	南北孔	東西孔	垂直孔	アクセス坑道周辺
CASE 1	6.37	8.64	13.83	6.33	1.75	2.55
CASE 21	6.52	9.08	14.55	6.62	2.01	1.56
CASE 22	4.86	6.42	9.07	6.12	1.29	2.47
CASE 23	3.34	4.54	6.99	3.70	0.90	1.31
CASE 24	1.29	1.20	2.03	0.72	0.2	1.37
CASE 31	7.30	10.23	16.56	7.25	1.94	1.42
CASE 32	6.13	8.52	12.70	7.40	1.96	1.64
CASE 33	6.61	9.22	15.59	5.46	1.58	1.54
CASE 34	3.83	5.09	7.62	4.38	1.29	1.83

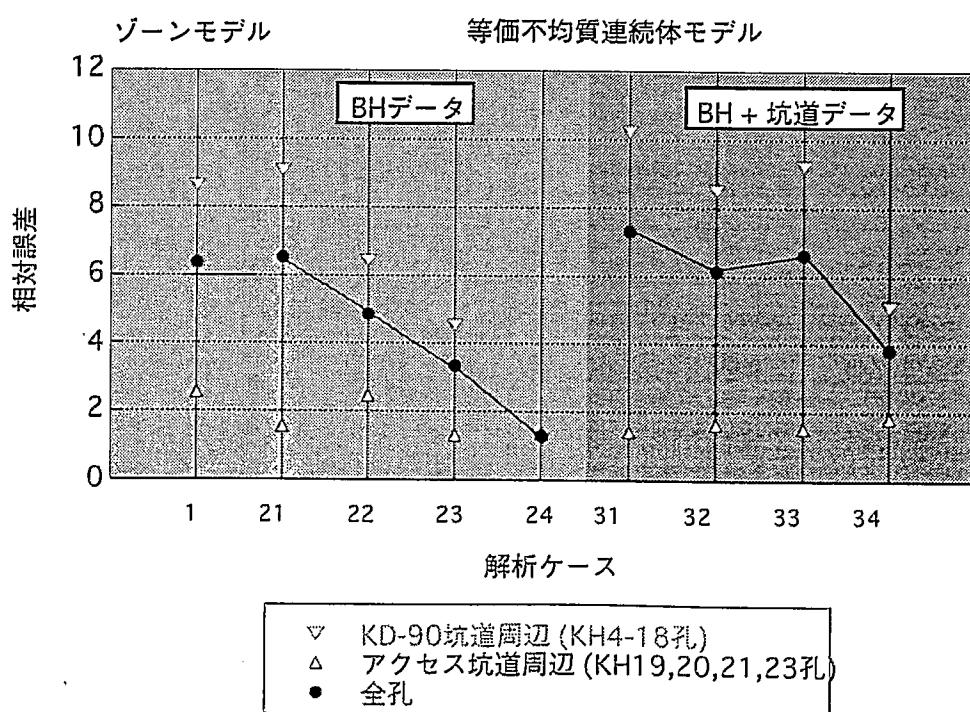


図-7.4.11 孔内水圧の相対誤差

## 8 逆解析による3次元透水係数分布の推定

### 8.1 逆解析手法

逆解析のフローを図-8.1.1に示す。逆解析で最小化する目的関数としては、

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

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。

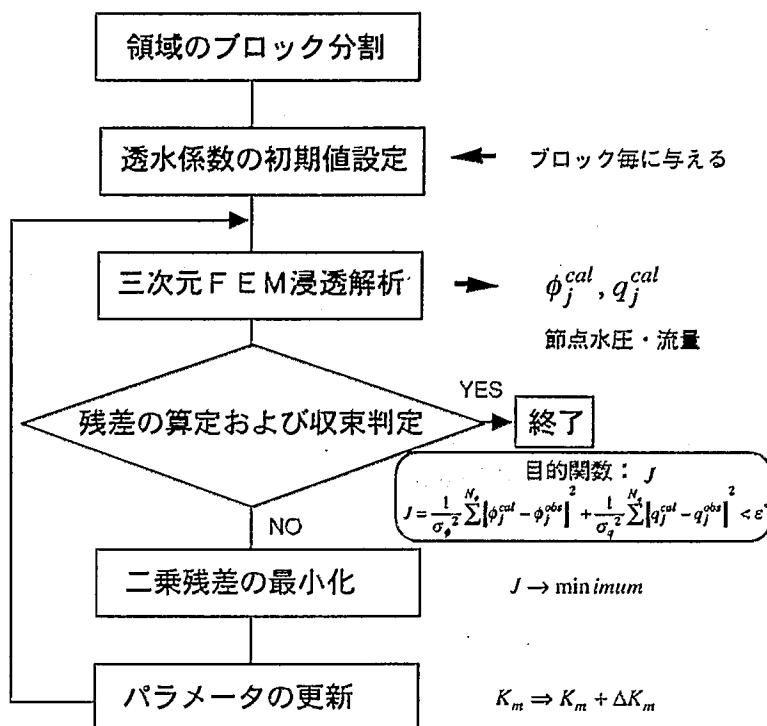


図-8.1.1 逆解析フロー

## 8.2 逆解析の初期モデル

逆解析では、割れ目ゾーンモデルと等価不均質連続体モデルについて各々1ケースを行い、両者を比較した。割れ目ゾーンモデルでは、未知数が少なく解を求めやすいので、あえて一般部の透水係数を割れ目ゾーン部より高くした初期値を用いた。等価不均質連続体モデルでは観測水圧の相対誤差が最も小さいCASE24の透水係数分布を用いた。ただし、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 $10^{-3} \sim 10^{-8}$ cm/sの間の6段階（対数）で要素をグルーピングし、各じゲループの透水係数を未知数とした（図-8.2.1の材料グループ501～512）。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。

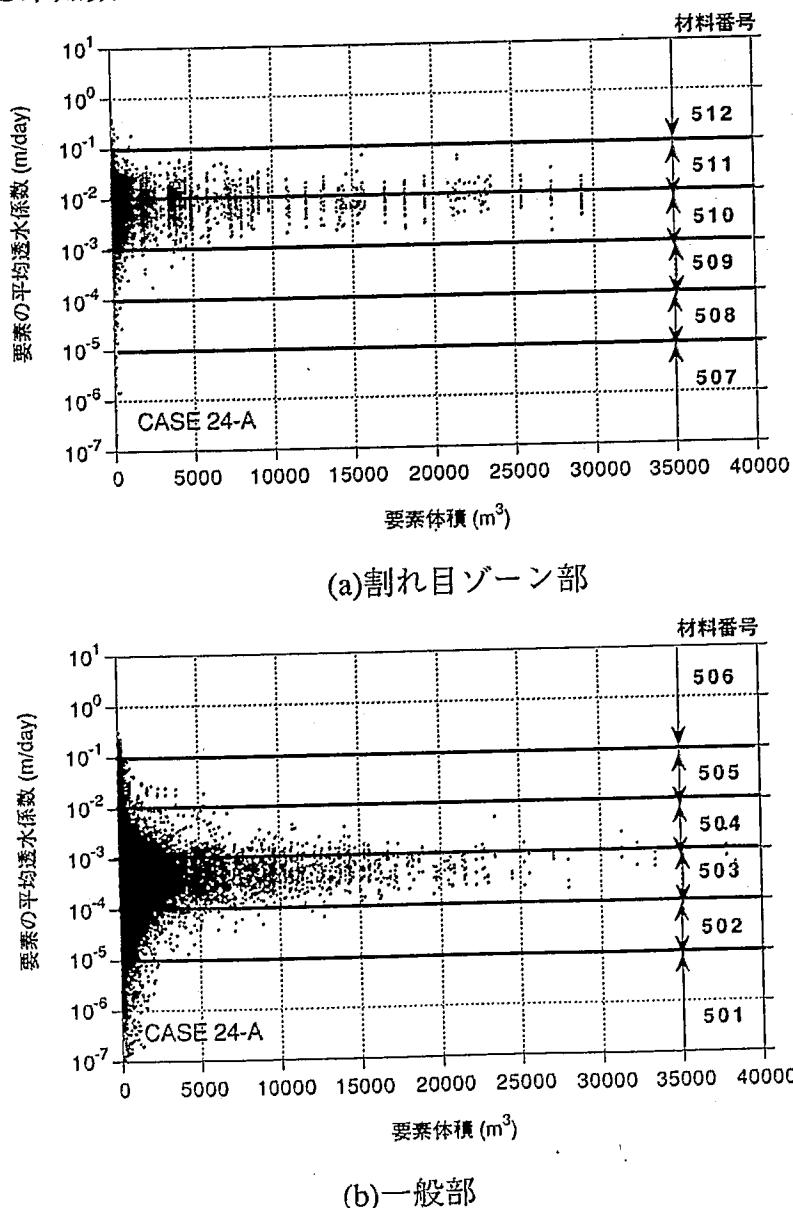


図-8.2.1 要素透水係数と材料グループ番号

### 8.3 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つの堰における流量観測データ（堰No.1とNo.3、図-8.3.2）と亀裂からの滴水量データ（図-8.3.1）を用いた。亀裂からの滴水量の分布（図-8.3.2）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-8.3.1に示す区間に振り分けることにした。このようにして設定した区間流量を図-8.3.2中の実線で示す。実際の逆解析では、坑道の区間流量を各節点に振り分けた。すなわち、区間流量の観測値をQ、区間に含まれるi番目の節点流量をqiとすれば、次の条件を満足するようにした。

$$Q = \sum q_i$$

表-8.3.1 坑道区間と湧水量の設定

	区間範囲 (m)	区間流量(m <sup>3</sup> /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-4,6,8,10～21, 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。

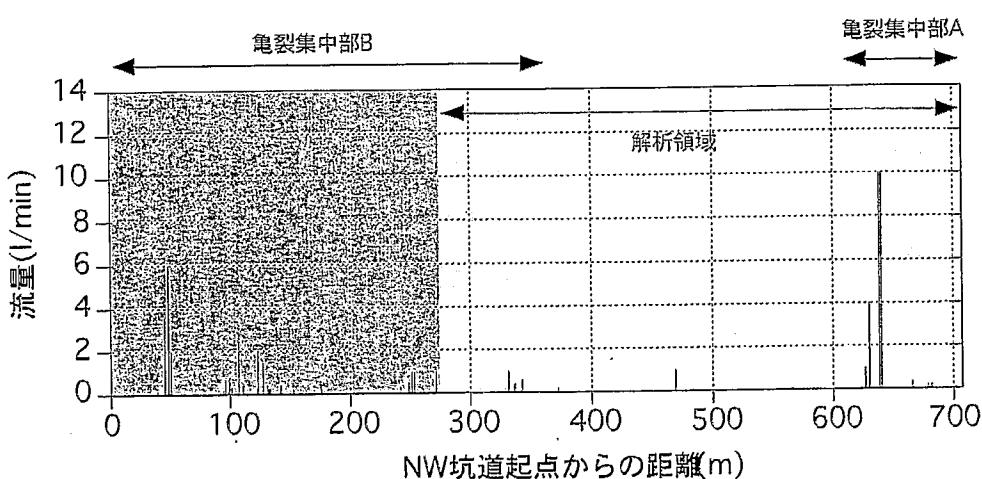


図-8.3.1 亀裂滴水量の分布（NW坑道）

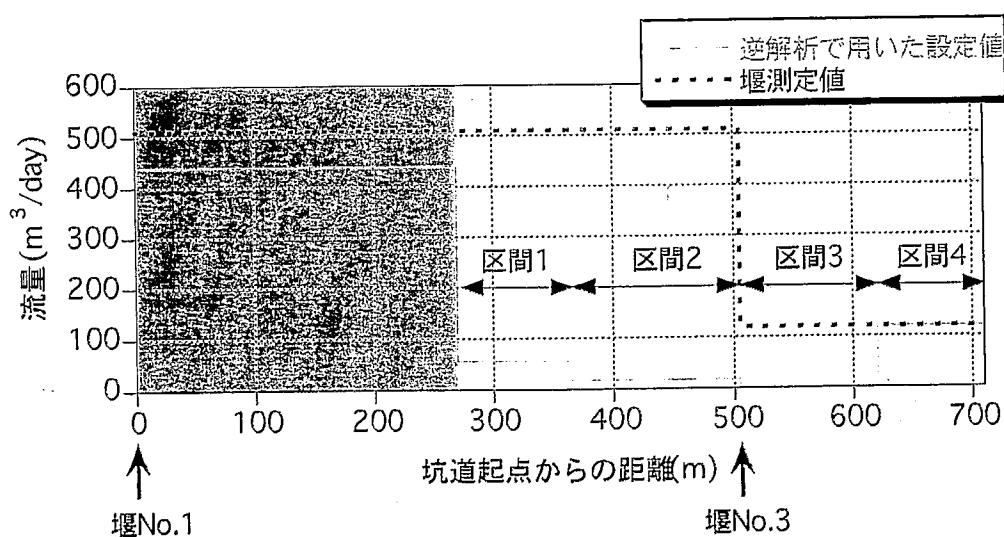


図-8.3.2 NW坑道の堰流量と逆解析の設定流量

## 8.4 逆解析結果

### 8.4.1 透水係数の変化

#### (1) 割れ目ゾーンモデル (CASE1)

割れ目ゾーンモデル (CASE1) の逆解析では一般部と割れ目ゾーン部の2つの透水係数を未知数とした。逆解析の繰り返し計算に伴うx, y, z軸方向の透水係数の変化を図-8.4.1に示す（ただし、5ステップ毎の値のみ表示）。今回は透水異方性を固定（y方向のみ1オーダー低い）しているため、同じように値は動いている。

このケースでは、透水係数の初期値として、一般部の透水係数を割れ目ゾーン部より大きく与えたにも関わらず、流量・水圧の観測データ（例えば、NW坑道の割れ目ゾーン部における多量の湧水）を反映して、最初の5ステップ目で逆転しているのが分かる。変化が有る程度落ちついた50ステップ時点における透水係数値を表-4.1.16に示す。

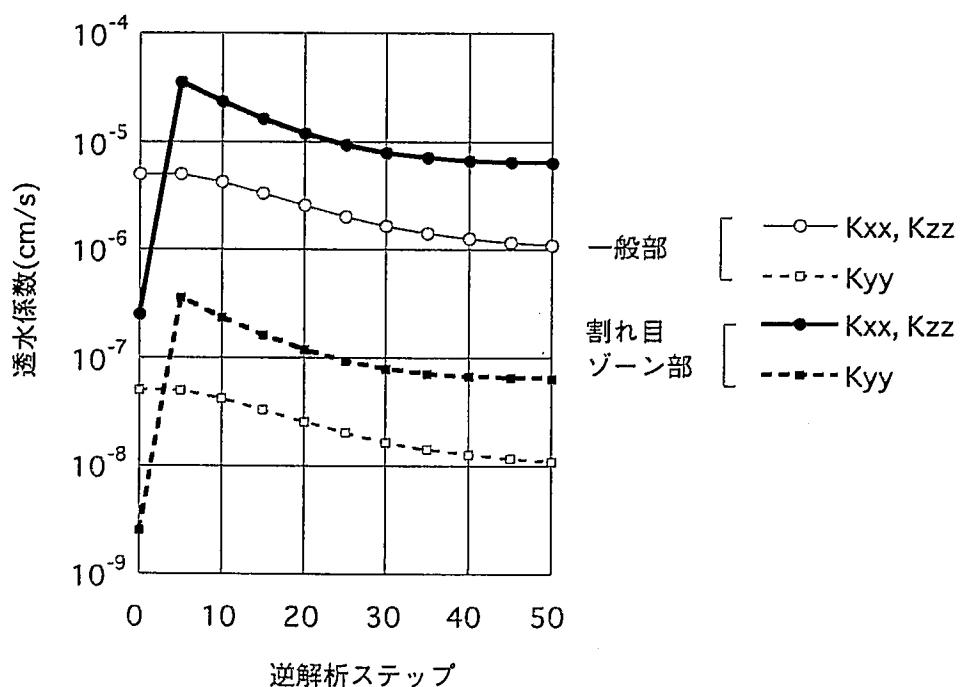


図-8.4.1 逆解析ステップに伴う透水係数変化  
(割れ目ゾーンモデル, CASE1)

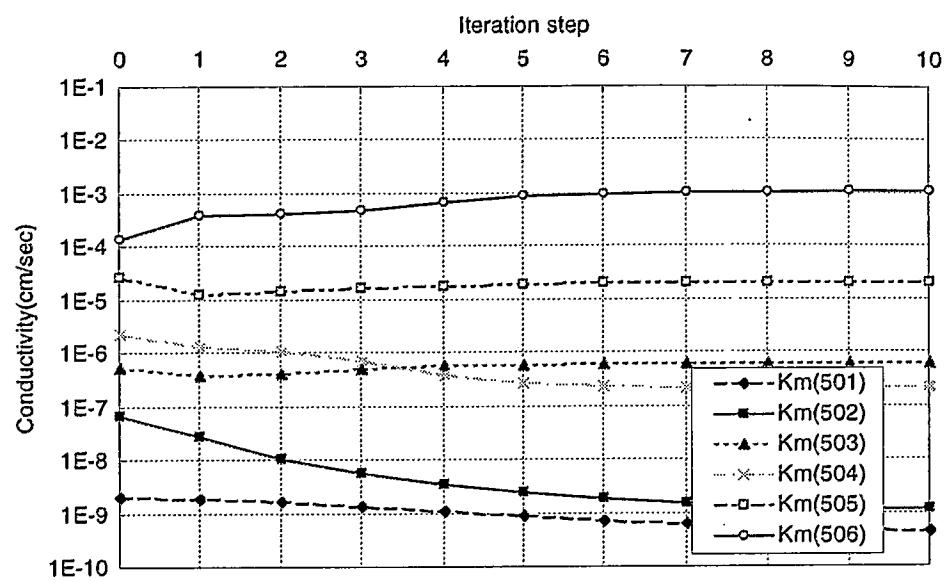
表-8.4.1 逆解析による透水係数 (割れ目ゾーンモデル)

	x, z方向透水係数	y方向透水係数
一般部	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-8}$
割れ目ゾーン部	$6.4 \times 10^{-6}$	$6.4 \times 10^{-8}$

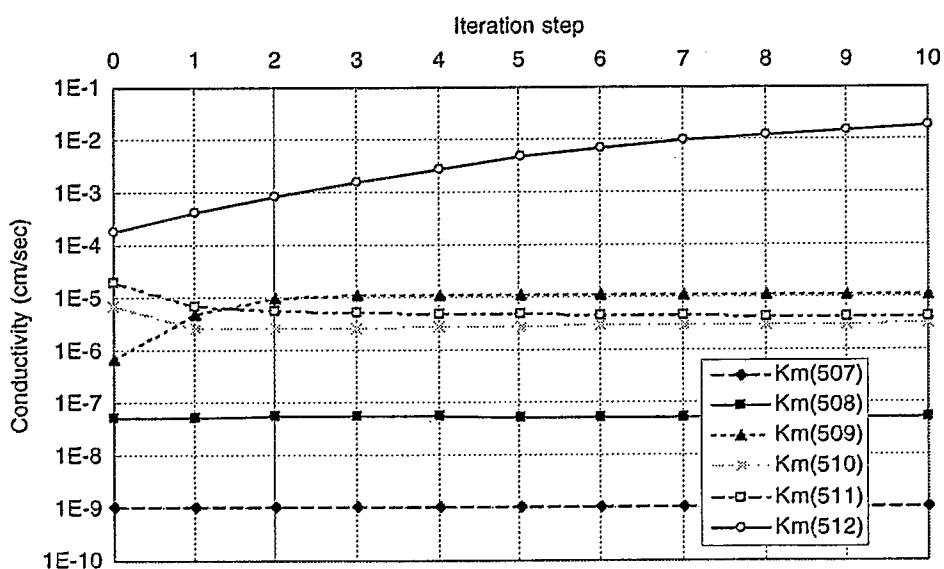
## (2) 等価不均質連続体モデル (CASE24)

前節の図-8.2.1で示したように、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 $5000\text{m}^3$ 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。大きな体積の要素の殆どは次の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。

CASE24の逆解析に伴う透水係数の変化を図-8.4.2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ので、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。



(a) 一般部



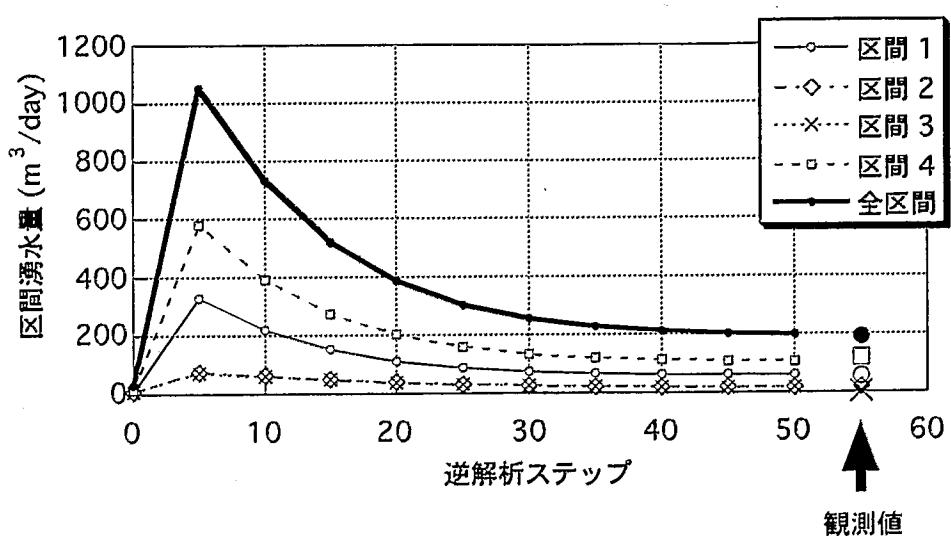
(b) 割れ目ゾーン部

図-8.4.2 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, CASE24)

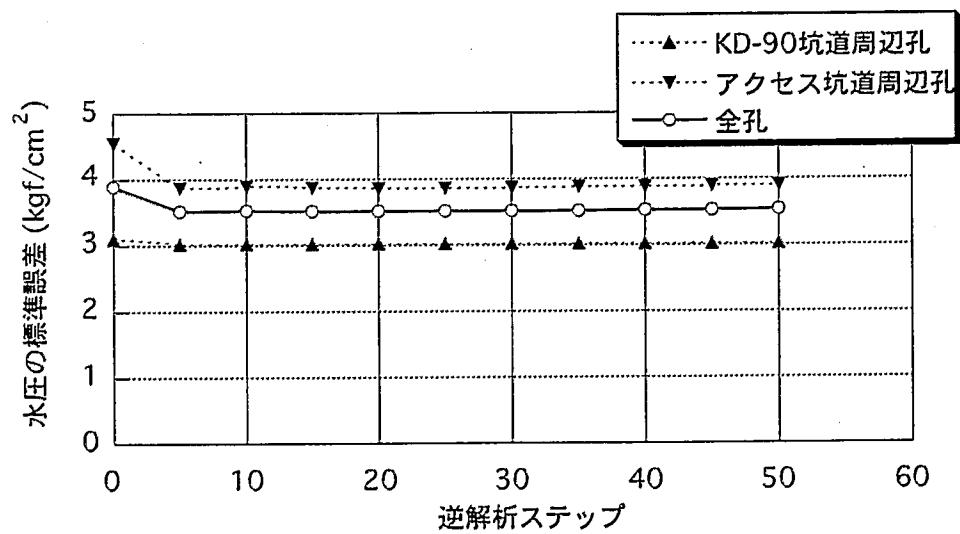
#### 8.4.2 坑道区間湧水量と孔内水圧の変化

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-8.4.3と図-8.4.4の(b)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が難しかったものと考えられる。

一方、坑道内湧水量については、割れ目ゾーンモデル、等価不均質連続体モデルとも、逆解析による大きな改善が見られた。図-8.4.3と図-8.4.4の(a)は、割れ目ゾーンモデルと等価不均質連続体モデルの逆解析の、繰り返し計算に伴うNW坑道内湧水量の変化を示したものであるが、4つの湧水測定区間とも、解析値はほぼ実測湧水量と一致している。しかし、NW坑道沿いの節点流量分布（図-8.4.5(b)）と、坑道壁面の滴水量の測定結果（図-8.4.5(a)）を比較すると、等価不均質連続体モデルが実測の湧水量分布をより細かく表現できていることが分かる。

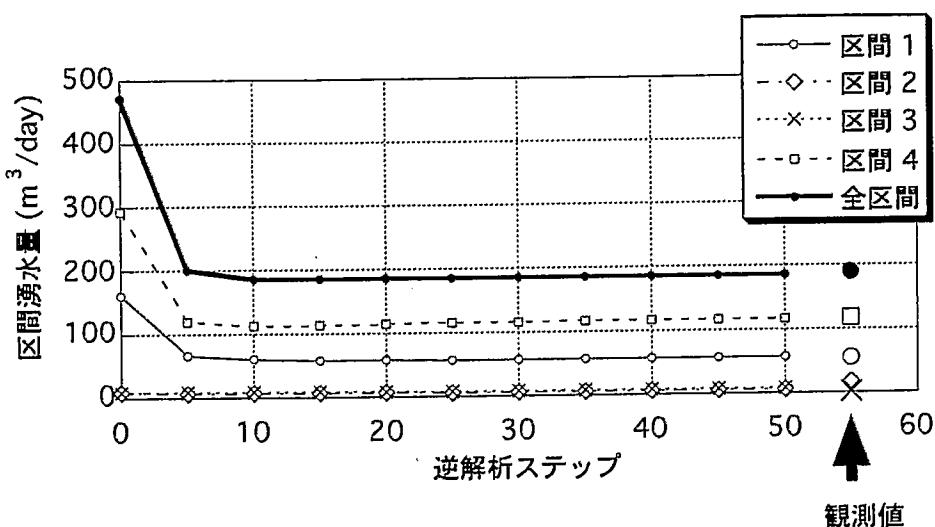


(a) 区間湧水量の変化

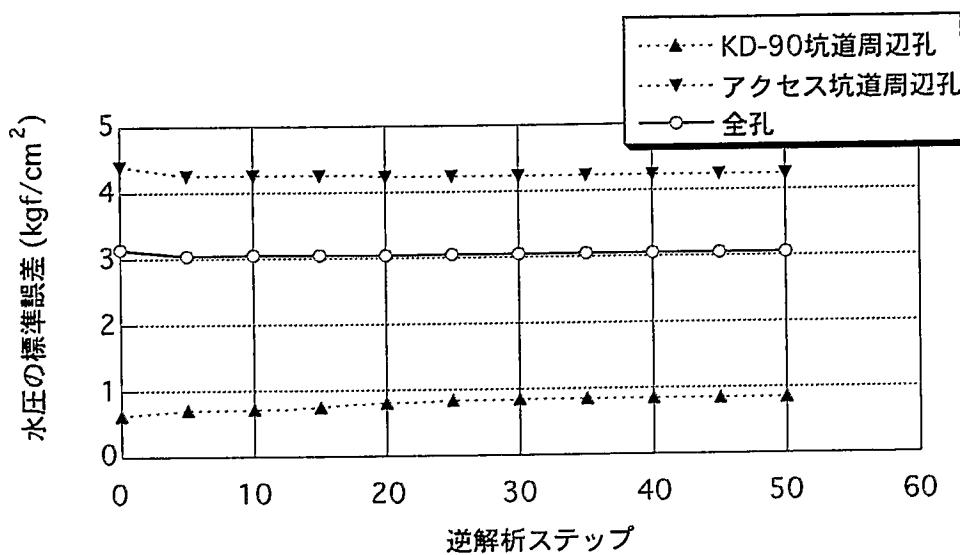


(b) 孔内水圧の標準誤差の変化

図-8.4.3 逆解析の更新過程に伴う、湧水量・水圧の変化  
(割れ目ゾーンモデル、CASE1)

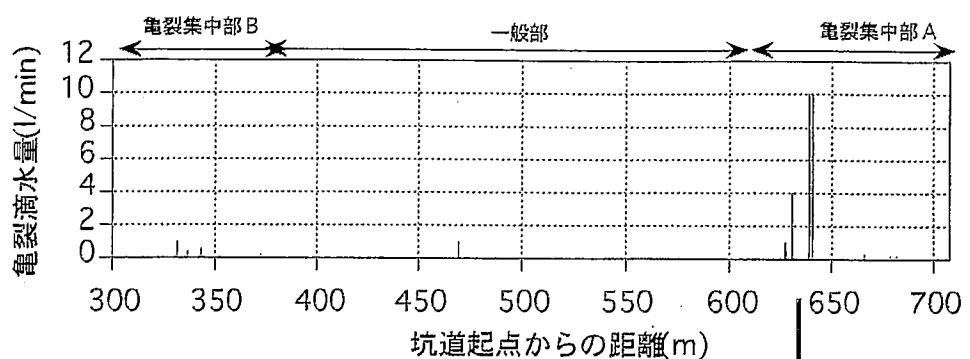


(a) 区間湧水量の変化

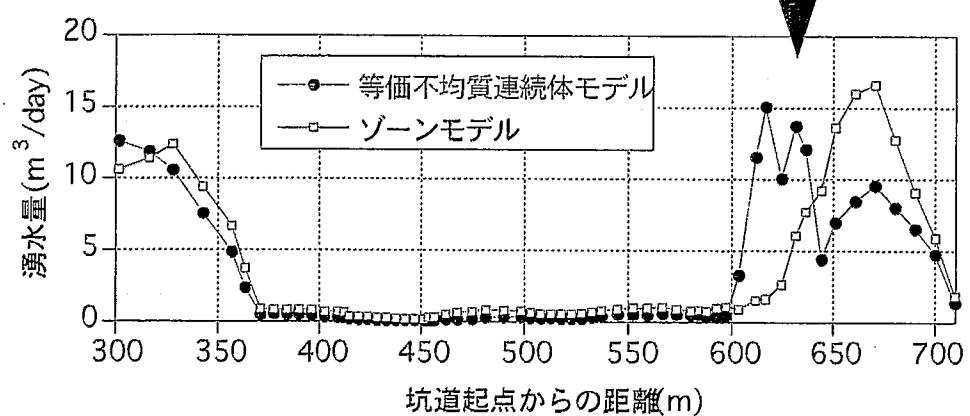


(b) 孔内水圧の標準誤差の変化

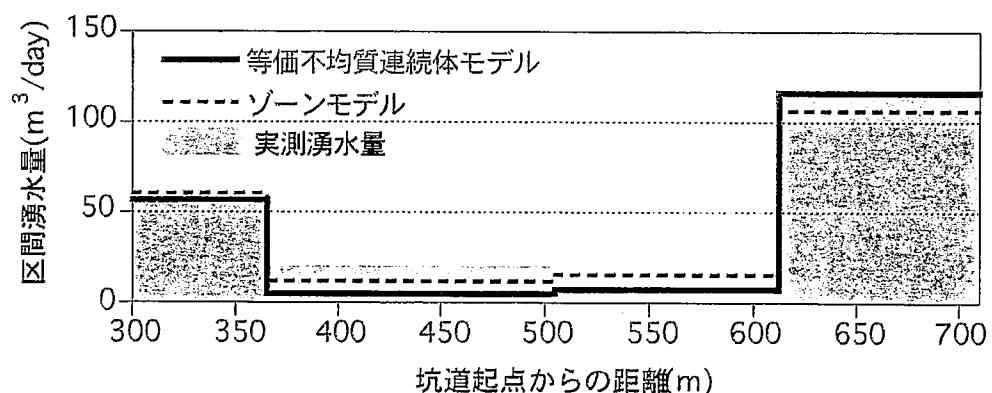
図-8.4.4 逆解析の更新過程に伴う、湧水量・水圧の変化  
(等価不均質連続体モデル、CASE24)



(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-8.4.5 NW坑道湧水量  
(ゾーンモデルと等価不均質連続体モデルの比較)

## 9 まとめと考察

### 9.1 解析結果のまとめ

#### (1) 各モデルの特徴

今回の解析で用いた割れ目ゾーンモデル、等価不均質連続体モデルとともに、平成6年度の解析に用いた均質モデル、異方性モデルを含めて、解析結果から判明した各モデルの特徴を以下に述べる。

まず、平成6年度の解析に用いた均質等方性モデル、均質異方性モデルについて述べる。解析領域内の透水係数を全て均質に与えた均質モデルでは、透水試験結果から得られた透水係数を使用することにより、総湧水量はオーダー的に妥当な値が得られたが、圧力分布、流量とも境界条件に依存する解析結果となった。ゾーン毎に異なる異方性を与えた異方性モデルを用いることにより、境界条件によらない地下水流动の卓越方向を表現できたものの、上記2つのモデルでは、透水係数を均質に与えていることから、不連續性岩盤特有の割れ目分布に起因する不均一な流れを表現することが難しいものと考えられる。

そこで、今年度においては、まず、解析領域を亀裂集中部とその他の領域（2つのゾーン）に分割し、前者の透水係数を高く設定してマクロな不均一性を考慮したモデル（割れ目ゾーンモデル）による解析を行った。このモデルでは、均質モデルに比較して、観測された水圧、流量のゾーン毎の違いを再現できたが、各ゾーン内部では均質異方体であり、ゾーン内部での水圧や流量分布の不均一性の再現には限界がある。

従来の連続体モデルに対して、今回新しく導入した等価不均質連続体モデルを用いることにより、従来のモデルで表現しきれなかった不均質な水理場（透水性、水圧、流量等）を再現できた。すなわち、上記の連続体モデルと異なり、平均的な透水係数・異方性の情報だけでなく、原位置の亀裂分布や透水係数の”分布”の情報を反映することができ、特に今回の解析結果によれば、決定論的に亀裂情報を与える（コンディショニング）ことにより、NW坑道内の湧水分布やKD-90坑道に沿った水圧分布の低下などの水理的特徴をうまく説明しうることが分かった。

#### (2) モデル化にあたって得られた知見

今回の一連の解析により、原位置の調査・試験データをより多く反映することにより、解析結果はより良く実現象を再現できることが示された。すなわち、実現象の再

現という観点に立てば、望ましい連続体モデル化手法とは、既存の調査・試験データを最大限に反映できる手法である。従来の連続体モデルでは、原位置での亀裂観察や透水試験などの貴重なデータが得られていたとしても、それをモデルに反映することが困難であったが、等価不均質連続体モデルは、上述したように、多くの原位置情報を取り入れることができ有効的に利用できる。

以下に、浸透解析における各種の原位置データの重要性に関して、モデル化・解析の中で得られた知見を述べる。

#### (亀裂分布データ)

透水係数の異方性、不均質性を評価する上で重要な情報である。特に今回の解析では亀裂位置を決定論的に与える（コンディショニング）ことにより、湧水量分布の実測値との対応が格段に向上する。

#### (透水試験データ)

多点での透水試験により得られる透水係数の「分布」は、水理物性の不均質性を評価する上で重要である。等価不均質連続体モデルにおいては、モデルと透水試験結果とのフィッティングによるキャリブレーションが重要であり、亀裂分布モデルの妥当性の判断材料となりうる。

#### (水圧観測データ)

逆解析や解析結果の検証を行う上で極めて重要である。特に解析領域境界上の地下水位、水圧観測データは不可欠であり、解析結果の信頼性に大きな影響を与える。不連続性岩盤においては、水圧は局所的に不連続に変化しており、解析結果の大域的な信頼性をチェックするには、解析対象領域に応じたスケールでの水圧観測データが重要と考えられる。

#### (坑道湧水量データ)

不均一な地下水流动場の把握を行う上で極めて貴重な情報である。逆解析時には透水係数の絶対値に対して大きく影響する。今回の解析では湧水量測定区間が少なく（2地点）、亀裂分布との比較など、より詳細な検証を行う上で、できるだけ細かな区間に分けた湧水量測定が望まれる。

## 9.2 連続体モデルの適用性と今後の課題

### (1) 連続体モデルの適用性について

不均質等価連続体モデルを用いた一連の解析（順解析）により、釜石鉱山原位置試験場周辺数100m四方のサイトスケールの水理場（水圧、流量等）を定性的に表現することができた。さらには、逆解析によるモデルの改良を行ない、水圧や流量の観測値との定量的な一致を見た。すなわち、本解析手法が、不連続性岩盤特有の不均質な水理場（透水性、水圧、流量等）を定量的に表現できる手法であることが示された。これまで、不連続性岩盤内のサイトスケールの不均質な地下水挙動を、今回のように定量的なレベルで再現した事例は少ない。

しかし、連続体モデルでは次のような点において限界がある。

- ・水理場の表現は、離散化の程度（解析メッシュの大きさ）に依存する。
- ・連続体モデルに共通の仮定は、「岩盤内の空隙は、全て地下水流动径路となり得る。平均化された物性値を用いる。」というものであるが、実際には、透水性割れ目を選択的に流れるため、流动量の把握は可能でも、流动径路や実流速の評価は困難である。

また、これは一般的なモデル構築の問題でもあるが、地質や透水性に関する情報量には限界があり、解析結果の信頼性はモデル作成に用いたデータの質と量（観測精度、測定精度）を越えることはない。

従って、連続体モデルの適用に際しては、目的に応じて、解析領域の大きさ、解像度、データの質と量（測定方法を含めて）を検討する必要がある。

### (2) モデルの改良について

その他、今後検討すべきモデルの改良点を以下に挙げる。

#### (解の信頼性・一意性の検討)

同様な結果を与えるモデルは、透水性分布、境界条件等の組合せにより無数にあり、今回の解析に用いたモデルも、その中の一つのリアライゼーションに過ぎない。特に、不均質等価連続体モデルにおいては、亀裂分布の発生には、確率論的な手法を採用しており、したがって、理想的には、モデル作成→順解析→逆解析の一連の作業を多数回実施し、その中から最適なモデルを採用する必要がある。

#### (異なる境界条件下でのレスポンス)

今回の解析は、固定された境界条件下での解析であり、異なる境界条件下の地下水

挙動の変化を表現できる保障はない。広範囲の水理学的擾乱を与えることは困難であるが、坑道掘削やボーリング削孔等のシミュレーションにより、モデルの検証ができる可能性がある。

#### (非定常挙動の解析)

地下水挙動の非定常的な挙動は、今回対象とした定常的な水理場に比べて、水理学的な連続性（透水性分布）や空隙分布（貯留係数分布）等により敏感である。従って、圧力干渉試験、坑道掘削やボーリング削孔時の非定常的な地下水挙動や、降雨等の地下水涵養の変化に伴う、水圧変動のような非定常的な挙動のシミュレーションがモデルの改良を行なう上で有用であると考えられる。

#### (透水性割れ目の水理地質的評価)

坑道規模以上の拡がりを有する亀裂については、坑道壁面のトレース長から決定するのは、困難である。今回のモデル化では、亀裂分布の発生には、開口亀裂を用いたが、ボーリング孔内の水圧分布や坑道内湧水量分布は、開口亀裂の分布に必ずしも対応していない。透水性割れ目の水理地質的評価をより詳細に行ない、モデルの構築の際に考慮すべき亀裂データの選定基準を、より明確にすることが必要である。

### 9.3 水理地質構造についての考察

#### (1) 地質構造

解析領域内には、2つの東西方向に延びる割れ目ゾーンが存在する。これらの割れ目ゾーンは、地表の沢部の位置、方向と整合性を有しており、ほぼ鉛直方向に分布している。KD90坑道北部の割れ目ゾーンは、沢部からの地下水涵養により高い水圧（水位）を有している可能性が考えられる。

#### (2) 透水係数分布

解析領域内部には、東西方向に卓越方向を有する割れ目が分布しており、これにより透水係数は異方性を呈する。透水係数の大きさは、透水性割れ目の分布に依存し、空間的に不均一な分布を示す。このため、解析領域内において、不均一性な水圧分布、流量分布が生じている。空洞と交差する高透水性割れ目に沿って、岩盤内部まで低水圧ゾーンがひろがっている。

#### (3) 地下水流動

既存坑道（NW坑道、KD90坑道）に向かう地下水流れが主体的である。

割れ目ゾーンと一般部の境界部付近では、大きな動水勾配を呈する。特に、KD90坑道北部では、割れ目ゾーンに沿った高水圧帯が存在し、KD90坑道との間で、急激な水圧変化が生じている（"水理バリア"の説明）。

#### (4) "水理バリア"について

これまでの調査では、地下水の流れを遮断するような水理地質的構造の存在は、確認されていない。また、低透水性ゾーンの存在を考慮しなくとも、「割れ目ゾーン+高間隙水圧境界」により、TASK 3.2エリアで見られるような間隙水圧の急変部の説明が可能である。

## 10 おわりに

2年間にわたる解析研究により、対象解析領域内部の地下水流动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・核燃料開発事業団事業団殿が今後実施される原位置試験の評価に反映していきたい。