

断層の透水異方性に着目したフラクチャーネットワーク 地下水流動解析

GROUNDWATER FLOW ANALYSIS WITH CONSIDERING HYDRAULIC ANISOTROPY OF FAULT ZONE BY USING FRACTURE NETWORK MODEL

森田 豊**・渡辺 邦夫**

Yutaka MORITA, Kunio Watanabe

Groundwater flow around the MIU site of Tono Geoscience Center, JNC was successfully analyzed by using Don-Chan model. The effect of the Hydraulic anisotropy of fault zones on the groundwater flow was investigated. Fracture system developing in the rock mass and sedimentary rocks overlaying the rock mass were properly modeled as a 3-D channel network. Hydraulic conductivity of those channels was estimated on the basis of the results of in-site test. Groundwater flow patterns were calculated with changing the anisotropy feature of fault zone. It was clearly found that the hydraulic anisotropy of fault zones much influence the pattern of groundwater flow and tracer migration. It was conclude that the anisotropy must be well evaluated for the analysis.

Key Word: fracture network, ground water flow analysis, fault, hydraulic anisotropy

1. はじめに

本報は核燃料サイクル開発機構が実施している、複数のモデル化手法を用いた地下水流動解析の不確実性評価^{1),2)}の一つとして、Don-Chan Model(Donen-Saitama Channeling flow model)^{3),4),5),6)}を用いて行った地下水流動解析結果について報告するものである。本研究では核燃料サイクル開発機構より提供された地質や水理試験データを基に対象領域の岩盤の水理地質モデルを構築し解析を行った。特に地下水流動に大きな影響を与えると考えられる断層に着目した検討⁷⁾を行った。断層モデルは、まず既往の調査で確認がなされている月吉断層などを設定し、リニアメント構造より想定した断層モデルを加えた。また断層には透水異方性を考慮し、断層の変動状況でその透水異方性が決定するという仮定を導入している。研究の結果、地下水流動解析の不確実性を軽減させる一方向として、断層の活動履歴など詳細調査の必要性を示すことができたので報告する。

2. 水理地質モデルの構築

2.1 基本的な考え方

Don-Chan Model の適用にあたって、まず岩盤中（特に結晶質岩などの硬岩）に存在する割れ目系を主要割れ目とその他のマイナー割れ目に分ける。ここに主要割れ目とはスウェーデン・エスが地下研究所報告で示

* Package-D Co.

** 埼玉大学 地圏科学研究センター

されたような Master Fracture とそれに派生する Splay Fracture, Step Structure³⁾よりなる割れ目体(帯)を意味し、多くの割れ目の集合体として捉えている。すなわち、主要割れ目モデルは従来の割れ目モデルとは異なり、複数の割れ目で構成されたある透水(量)係数で表現が可能なゾーンと捉えている。このように捉えた主要割れ目はある程度の範囲で連続していると考えることができる⁴⁾。また、断層など大規模な構造も主要割れ目の中の特に発達したものと位置付けられる。これらが三次元岩盤内に分布し、特に複数の主要割れ目が交差し、それらの交差部が高透水性を持つことで三次元的な地下水流動場を形成していると考えられる。さらに主要割れ目の中の流れを面上に規則的に配置するチャンネル網内の流れで表現する。Don-Chan Model の水理地質モデルの構築においては対象岩盤中の主要割れ目(断層)を抽出し、その物性を評価することが大事である。主要割れ目の以外の割れ目をここではマイナーな割れ目として把握する。このマイナー割れ目内の流れのモデル化は、それと等価な規則的なチャンネル内の流れ(以下、規則チャンネル)により表現する。後述の堆積岩・花崗岩風化部もこのモデルにより表現している。

2.2 花崗岩中の主要割れ目の抽出

解析対象領域は、図-1 に示す核燃料サイクル機構・超深地層研究所計画用地(正馬様用地)を中心とした 4km×6km (深さ 3km) の領域である。対象領域の地質概要は白亜紀〜古第三紀に貫入した花崗岩体を基盤岩とし、その上位に第三紀以降の堆積岩類が不整合に被覆している(図-2 の解析モデル領域参照)。既往の調査より、月吉断層が対象領域中で確認されている断層である。これらの地質環境を三次元チャンネル網で表現することになる。

主要割れ目の抽出は大深度ボーリングの情報を基に行った。詳細な抽出方法は本報では割愛するが、基本的には BHTV より得られた割れ目の走行・傾斜情報をステレオネット上に投影し、主要割れ目内の Step Structure の割れ目方向分布のパターンを抽出する。本岩盤の主要割れ目は図-3 に示す 6 つのパターンであることがわかった。それぞれの水理的性質はそれぞれのパターンが該当する位置で実施されている水理試験の結果を基に設定を行った。

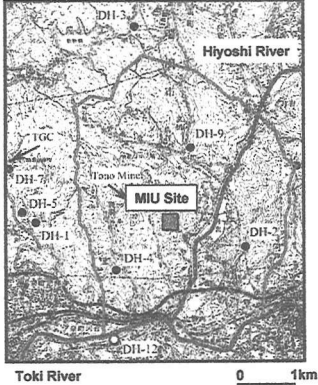


図-1 解析対象領域

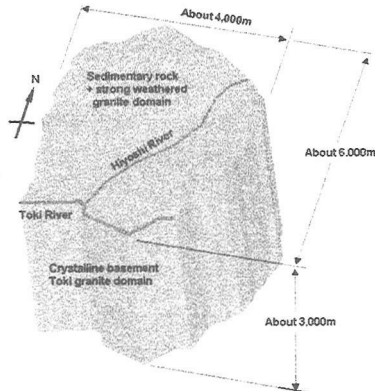


図-2 解析対象領域モデル範囲

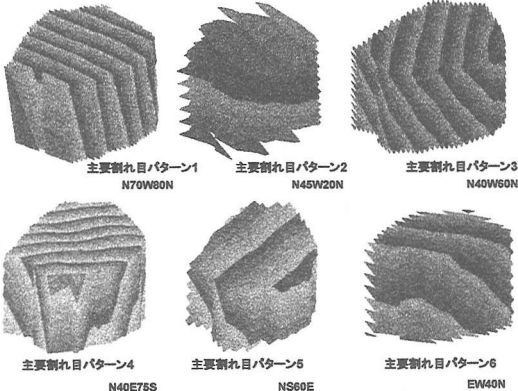


図-3 抽出した主要割れ目パターン

2.3 堆積岩・花崗岩風化部のモデル化

堆積岩は領域全体に対して表層付近のわずかな部分を占める。堆積岩に関してはマイナー割れ目群と同様規則チャンネルで表現した。各チャンネルの透水量係数はそれが代表する堆積岩の体積(チャンネルの断面積)、透水係数から算定した。堆積岩は第三紀、第四紀の堆積岩および堆積層よりなり、それぞれいくつかの層に分割されている。今回は規則チャンネルによりこれらの層を細区分することは困難であるため一括して取り扱うこととした。また、花崗岩の露頭部に見られる風化部についても、堆積岩の平均的な透水性と花崗

岩風化部の透水性に大きな開きが見られないことから、花崗岩風化部についても堆積岩と併せてモデル化を行った。

2.4 断層

前述のように断層モデルは主要割れ目の延長上に位置付けている。ただし、次のような透水異方性を有すると仮定している。図-4に示すように断層構造のせん断面を中心にそれに沿って割れ目の多い破砕部が存在しているモデルを仮定している。せん断面では粘土化が著しいとして、断層を横断する方向に透水性が小さく遮水性を有するとし、周辺の破砕部では透水性が高いモデルとしている。また、周辺の破砕部が Splay Fracture や Step Structure が密に発達した部分であるとすると、それらは断層のせん断（変位）方向と直交方向に発達する⁸⁾。このため、特にせん断方向に直交する方向の透水性が高いものと仮定している。例えば、横ズレ断層の透水異方性は、傾斜方向の透水性が高くなり、逆断層の場合、走向方向の透水性が高くなるような断層モデルを設定した。こういった断層の性質を表現するチャンネルとして図-5に示すように二枚の主要割れ目モデルを設定し、それを横断する方向のチャンネルの透水性を低く設定し遮水性を表現し、その両側に設定した主要割れ目に走向・傾斜方向で異なる透水性を与えることで断層の透水異方性を表現している。

本研究では月吉断層の他に既往のリニアメント調査結果から比較的連続性の高いものを3つ選択し断層とした（図-9 参照）。

2.5 チャンネルネットワークモデル

以上のモデルを重ね合わせてチャンネルネットワークを作り、その中の流れを解析する。まず、堆積岩・花崗岩風化部、マイナー割れ目部を表す規則チャンネルを領域に生成する。これに前述した6つの方向の主要割れ目をチャンネル網で表現する。これに月吉断層、およびリニアメントから想定した断層を加え地下水流動解析を行う。図-6に月吉断層モデルを付加したチャンネルネットワークモデルを示す。

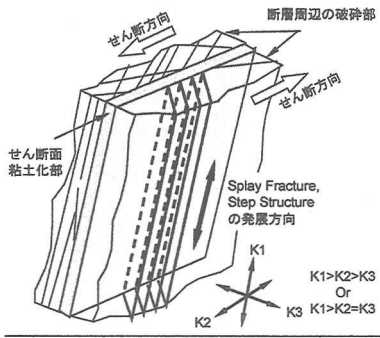


図-4 断層構造の模式図

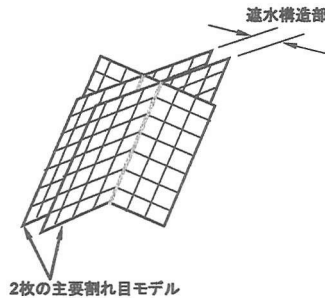


図-5 断層のモデル化

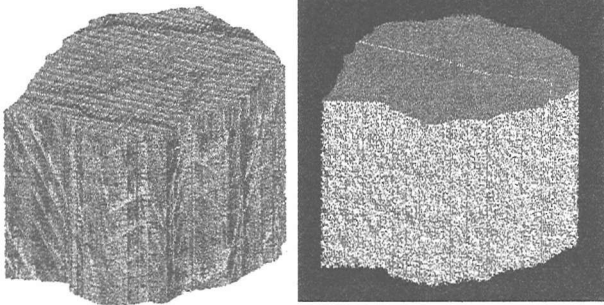


図-6 フラクチャー・チャンネルネットワークモデル

3. 解析条件・解析ケース

解析条件を図-7に示す。解析では図-8に示す指定点(1~24)から投入されたトレーサーが地表に出現するまでの最速経路について比較検討を行い、断層の地下水流動に与える影響評価を行った。最速経路評価はパーティクルトラッキング法を用いた。なお実流速の評価は表-2,3に示す間隙率を用いて、解析されたダルシー流速を除すことにより算定した。

解析ケースは、断層モデルの透水異方性を変化させた8ケースとした。その解析ケースの一覧を表-1に、解析で設定した断層モデルの物性値の一覧を表-2に示す。また、主要割れ目の物性値、および規則チャンネル（堆積岩・花崗岩風化部、マイナー割れ目部）の物性値を表-3に表す。なお、断層モデルの物性値の設定、遮水構造・断層周辺破砕部の幅は、月吉断層のデータを参考に設定した。また、主要割れ目の割れ目幅に関

しては、主要割れ目の抽出検討時に得られるデータをもとに設定を行っている。間隙率の設定に関しては、花崗岩の透水係数と間隙率の関係式を渡辺ら⁶⁾が報告しており、これを参考に設定を行った。



図-7 境界条件

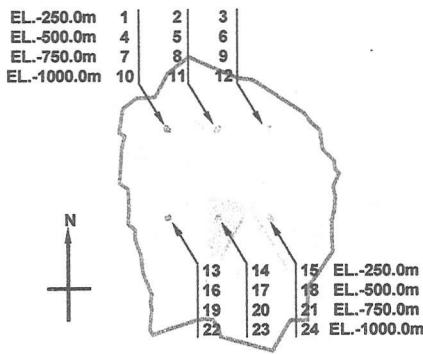


図-8 指定点位置図

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	NE系断層モデル	NW系断層モデル	月吉断層モデル
	A	B,C	D,E,F
Case-1	-	-	Type1
Case-2	Type1	Type1	Type1
Case-3	Type2	Type2	Type1
Case-4	Type3	Type2	Type2
Case-5	-	Type2	Type2
Case-6	Type2	Type2	Type3
Case-7	Type2	Type3	Type2
Case-8	Type2	-	Type2

-不考慮

表-2 断層モデルの物性値一覧

	遮水構造	断層周辺破砕部		備考
		走向方向	傾斜方向	
Type1	1.0×10 ⁻¹⁰ (30%)	1.0×10 ⁻⁶ (4%)	1.0×10 ⁻⁶ (4%)	遮水構造のみ
Type2		1.0×10 ⁻⁸ (1%)	1.0×10 ⁻⁶ (4%)	横ズレ断層タイプ
Type3		1.0×10 ⁻⁶ (4%)	1.0×10 ⁻⁸ (1%)	逆断層タイプ

単位: (m/sec)
*()内は間隙率
遮水構造の幅: 9m, 断層周辺破砕部幅: 30m

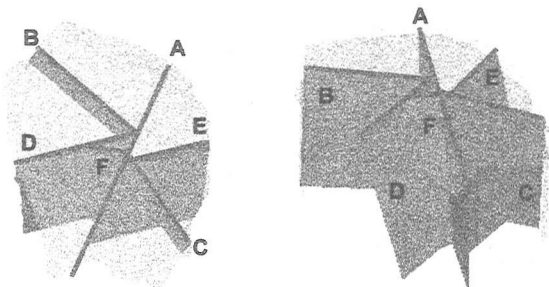


図-9 断層モデル位置図

4. 解析結果

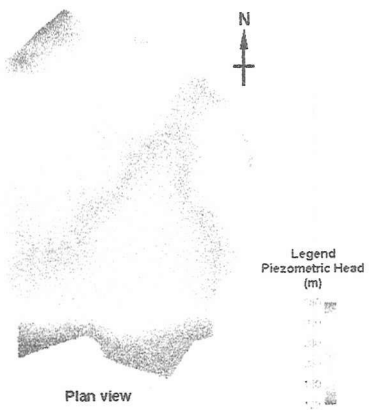
地下水流動解析結果、各ケースを通して共通の性質は次のようなものである。図-10 に全水頭分布の一例を示すが、全体の地下水流動方向は北側から南側の土岐川（図-2 参照）に向かう方向であるということ。局所的には領域中央付近を北北東～南南西に流れる日吉川（領域中の低標高部）に流れが向かっているということがあげられる。これは土岐川に当たる南側側面をノーフロー境界として、その他の境界条件が地形に沿う形で固定水頭境界と設定されていることによる。

全体にこのような地下水流動状況の中で断層の透水異方性

表-3 主要割れ目および規則チャンネル部物性値一覧

主要割れ目	透水係数 (m/sec)	間隙率 (%)	主要割れ目幅 (m)
パターン1	6.0×10 ⁻⁷	3.0	5.2
パターン2	7.0×10 ⁻⁸	2.0	9.7
パターン3	2.0×10 ⁻⁷	2.0	3.1
パターン4	4.0×10 ⁻⁷	3.0	3.6
パターン5	4.0×10 ⁻⁶	5.0	2.4
パターン6	4.0×10 ⁻⁷	3.0	4.7

規則チャンネル部	透水係数 (m/sec)	間隙率 (%)
堆積岩・花崗岩風化部	6.0×10 ⁻⁷	3
花崗岩マイナー割れ目	2.0×10 ⁻⁸	1



の影響をしてみる。図-11、図-12 は Case-1~8 について、指定点 (No.1~24) に投入されたトレーサーの最速移行経路長、移行時間の分布を示したものである。横軸に指定点、縦軸に移行経路長、移行時間を取り、実線は各ケースの結果範囲を示し、□はその平均値を示したものである。これより、移行距離、移行時間にケースでかなりの違いが見られる指定点と見られないものがある。移行距離に大きな差が見られるのは、No.2,7,9,11,16,24 があげられる。一方で移行時間に大きな差が見られるのは No.6,19 が特に顕著である。移行時間に差が見られる No.6 に着目し、その理由を考察する。図-13 はトレーサーの最終的な到達点を示しており、図-14 は横軸に移行距離、縦軸に移行時間を取りプロットしたものである。これより、最終の到達点はほぼ同位置に到達し、移行距離もほぼ同じと見られる。しかし移行時間には100年~500年の開きが見られる。この中で Case-2 (約 103 年)、Case-4 (約 505 年) の移行経路の内訳をみてみる。図-15、図-16 は横軸に地下水の移行経路特性、縦軸にその通過数を取ったヒストグラムである。

Case-2,Case-4 を比較すると、断層モデルAを通過する部分は同じ経路を通過しているが、それ以外では通過経路が異なっている。

ケース設定の違いは、Case-2 はすべての断層モデルを Type1 (表-2 参照) に設定したケース、Case-4 は断層モデルAに Type3, B,C,D,E,F に Type2 を設定したモデルであり、断層に与えた透水異方性が流動経路に影響し、結果移行時間に大きな差を生じさせていると結論できる。

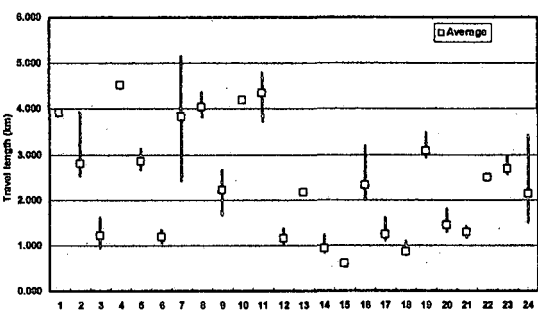


図-11 移行経路長分布

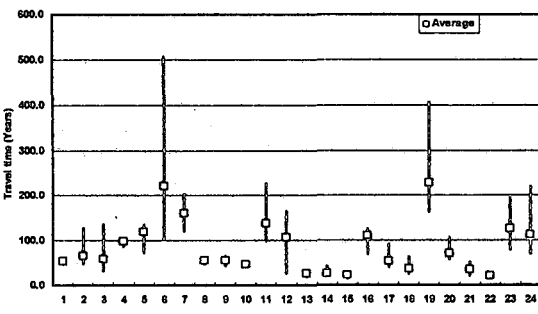


図-12 移行時間分布

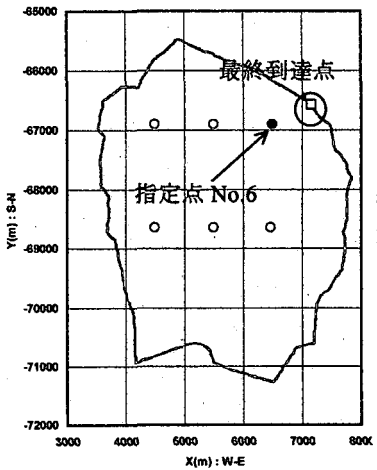


図-13 最終到達点位置(No.6)

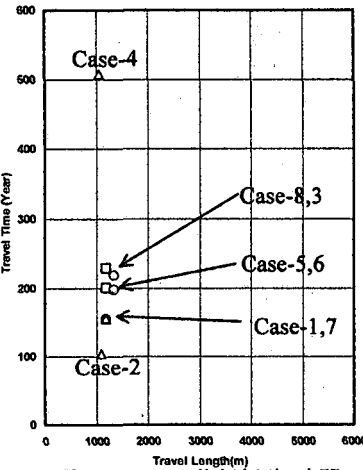


図-14 No.6 移行経路-時間の関係(No.6)

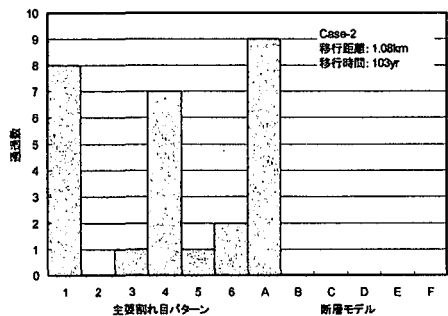


図-15 Case-2 移行経路特性

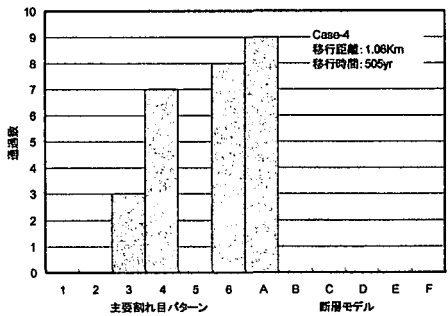


図-16 Case-4 移行経路特性

また、移行距離に差が見られる指定点No.7について図-17,図-18に示すこれらの図から、最終到達点の位置にケースによりかなりの差が認められる。ここでCase-3,6とCase-7を比較してみる。Case-3,6は断層モデルB,CがType2という設定である。Type2は傾斜方向の透水性を高くしたタイプである。このため指定点7を通過した地下水は断層モデルBに至ると傾斜方向の高透水チャンネルを通過し地表にいたる経路をとっている。

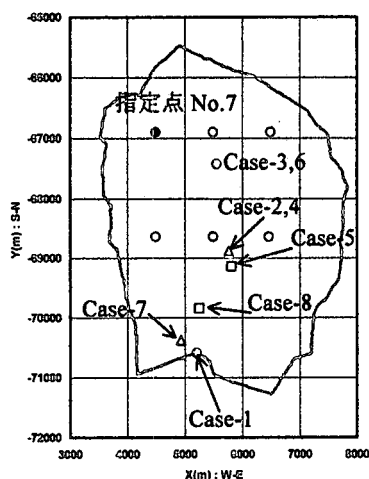


図-17 最終到達点位置(No.7)

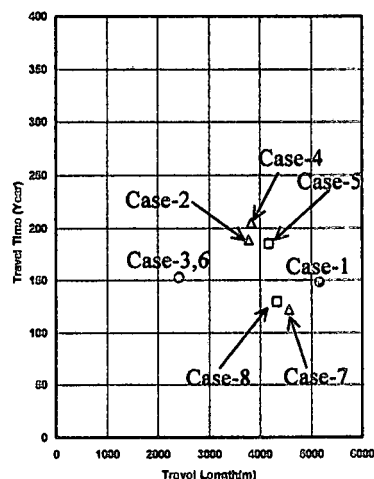


図-18 No.6 移行経路-時間の関係(No.7)

一方、Case-7はB,Cの断層モデルのタイプをType3に設定しており、走向方向の透水性を高く設定している。このため、Case-3,6とは異なる経路をたどり地表へいたっている。その経路は主に主要割れ目モデルのパターン5を通過しており、移行時間はCase-7の方が短くなっている。

また、図-11,12より、No.13,14,15のように移行距離、移行時間ともにケースによる大きな違いが見られないものも存在している。このように、断層モデルの透水異方性を変化させることで、指定点から与えたトレーサーつまり地下水の移行・流動経路、移行時間に影響が現れるという結果が得られた。

以上のような結果から、断層の透水異方性が地下水流動に影響を与えることが明示された。

5. まとめ

今回の解析で断層の透水異方性が地下水流動評価に関する不確実性のひとつの要因であることがわかった。この不確実性を軽減させるためには、断層の水理的性質の把握ばかりでなく、その活動履歴などに関する調査も必要と考える。また、解析とトレーサー試験結果を比較することで不確実性が軽減され、実際に近い地下水流れを表現する断層モデルの構築が可能になると考える。

参考文献

- 1) 澤田淳, 三枝博光, 中野勝志, 大澤英昭: 複数のモデル化手法を用いた地下水流動評価の不確実性について, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2002.
- 2) 澤田淳, 三枝博光, 竹内真司, 中野勝志, 井尻祐二: 水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価(その1) - 複数の概念モデル化手法による不確実性の検討 -, 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp.249-258, 2001.
- 3) 田中達也, 渡辺邦夫, 前川恵輔, 中村直昭, 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発(その1), 応用地質, Vol.35, No.3, pp.22-33, 1995.
- 4) 渡辺邦夫, 田中達也, 内田雅大, 岩崎浩, 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発(その2), 応用地質, Vol.35, No.4, pp.2-12, 1995.
- 5) 杉村淑人, 森田豊, 渡辺邦夫, ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み, 土木学会論文集, No.596/III-41, pp.229-246, 1997.
- 6) Watanabe, K., Sugimura, Y., Morita, Y. & Tanaka, T., Channel network modeling of fracture granite in the Hinachi area, Earthquake proof design and active faults, Elsevier, pp.247-262, 1997.
- 7) 森田豊・渡辺邦夫: 水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価(その4) - 大断層の地下水流動と物質移動に与える影響に着目したフラクチャーネットワーク解析 -, 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム論文集, pp.279-288, 2001.
- 8) Mazurek, M., Bossart, P. & Eliasson, T., Classification and characterization of water-conducting features at Aspo: Results of investigation on the outcrop scale, Aspo laboratory Int. Coop. Rep. 97-01, pp.1-116, 1997.