

亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)
による透水・トレーサー試験
— 2001年度までの成果 —
(研究報告)

2002年3月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複製・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

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)
2002

亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK) による透水・トレーサー試験

—2001 年度までの成果—
(研究報告)

吉野 尚人^{※1} 佐藤 久^{※2}

要 旨

著者らは、地層処分天然バリアの長期性能評価の基礎資料を得るため、亀裂状媒体水理試験設備 (LABoratory test on mass transport in fractured ROCK: 略称 LABROCK) を使用して、透水・トレーサー試験を実施し、亀裂内の透水特性と物質移行特性に関する検討を行った。対象とした亀裂は平行平板岩体と天然亀裂岩体であり、検討の結果、透水特性および物質移行特性に関する多くの知見を得た。本報告書は、2001 年度までに得られたこれらの知見をまとめたものである。

今後 LABROCK では、今回使用した天然岩体亀裂の開口幅測定を実施する予定である。そこで得られた開口幅のデータを基に物質移行解析を実施し、天然岩体亀裂の透水・物質移行特性等を説明できるような亀裂内のモデルを構築することができれば、天然バリアの長期性能評価の基礎資料として本研究は重要な地位を占めると考えている。

※1 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ
※2 検査開発株式会社

Permeability and Tracer Test with using Laboratory Hydrology Testing System
on Mass Transport in Fractured Rock
- Results until 2001 years-

(Research Report)

Naoto Yoshino^{*1} Hisashi SATO^{*2}

Abstract

We have carried out the permeability tests and tracer tests using LABROCK (LABoratory test on mass transport in fractured ROCK) which was developed in order to get basic information relevant to the HLW geological disposal program. We have been focusing on the parallel single fracture and natural single fracture. Much knowledge about permeability and tracer transport was acquired as a result of examinations. This report summarize these knowledge.

In future, we will measure the aperture of natural single fracture. If we will be able to develop the model of natural fracture based on measured aperture distribution and to explain permeability and tracer transport character described in this report, this research will play an important role in the HLW geological disposal program.

※ 1 Repository System Analysis Group ,Waste Isolation Research Division ,Tokai Works

※ 2 Inspection Development Corporation

目 次

1. はじめに	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本報告書の概要	2
2. 亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)の概要	3
2.1 LABROCK の配管	3
2.2 LABROCK で使用する水頭	5
2.3 LABROCK の応力負荷装置	6
3. 透水・トレーサー試験方法とデータの概要	7
3.1 透水試験方法	7
3.2 トレーサー試験方法	7
3.3 本研究で使用されるデータの概要	8
4. 予備試験	11
4.1 平行平板濃度孔無し岩体による透水・トレーサー試験	11
4.1.1 平行平板濃度孔無し岩体の概要	11
4.1.2 試験ケース (平行平板濃度孔無し岩体)	12
4.1.3 試験結果 (平行平板濃度孔無し岩体)	13
4.1.4 考察 (平行平板濃度孔無し岩体)	14
4.1.5 平行平板濃度孔無し岩体での試験結果まとめ	14
4.2 平行平板濃度孔有り岩体による透水・トレーサー試験	17
4.2.1 平行平板濃度孔有り岩体の概要	17
4.2.2 濃度センサーと濃度センサー位置の名称	18
4.2.3 試験方法 (平行平板濃度孔有り岩体)	19
4.2.4 試験岩体内濃度センサーの構造	19
4.2.5 試験ケース (平行平板濃度孔有り岩体)	20
4.2.6 試験結果と考察 (平行平板濃度孔有り岩体)	21
4.2.7 平行平板濃度孔有り岩体での試験結果まとめ	25
5. 天然亀裂岩体を使用した透水・トレーサー試験	26
5.1 天然亀裂岩体の概要	26
5.2 試験ケース (天然亀裂岩体)	27
5.3 試験結果 (平行平板濃度孔有り岩体)	28
5.4 考察 (天然亀裂岩体)	36
5.4.1 透水特性に関する考察	36
5.4.2 物質移行特性に関する考察	38

5.4.3	水理学的開口幅と物質移行開口幅	40
5.4.4	亀裂の不均質性の概略評価	41
5.5	天然亀裂岩体を使用した透水・トレーサー試験結果のまとめ	44
6.	応力依存性試験	45
6.1	応力依存性試験の概要	45
6.2	試験ケース（応力依存性試験）	46
6.3	試験結果（応力依存性試験）	47
6.4	考察（応力依存性試験）	48
6.4.1	垂直応力と変位の関係	48
6.4.2	垂直応力と透水量係数の関係	49
6.4.3	垂直応力と開口幅（水理学的・物質移行）の関係	50
6.4.4	垂直応力と縦方向分散長の関係	52
6.4.5	初期開口幅と亀裂表面特性因子の推定	53
6.5	応力依存性試験のまとめ	54
7.	おわりに	55
	・参考文献	56

表 目 次

表 4.1.2-1	試験ケース（平行平板濃度孔無し岩体）	12
表 4.1.3-1	試験結果（平行平板濃度孔無し岩体）	13
表 4.2.2-1	濃度センサーの名称	18
表 4.2.5-1	試験ケース（平行平板濃度孔有り岩体）	20
表 5.2-1	試験ケース（天然亀裂岩体）	27
表 5.3-1	透水試験結果（注水ポート水頭値）	28
表 5.3-2	透水試験結果（排水ポート水頭値）	28
表 5.3-3	透水試験結果（排水側流量）	28
表 5.3-4	透水試験結果（注水側流量）	29
表 5.3-5	レーザー流速算出結果（天然亀裂岩体）	30
表 5.3-6	縦方向分散長の算出結果（天然亀裂岩体）	30
表 5.3-7	試験結果まとめ（天然亀裂岩体）	30
表 6.2-1	試験ケース（応力依存性試験）	46
表 6.3-1	応力依存性試験結果	47
表 6.4.5-1	推定された亀裂表面特性因子と初期開口幅	54

目 次

図 2.1-1	LABROCK 配管図	4
図 2.2-1	本研究で使用される水頭の名称	5
図 2.3-1	応力負荷装置の概略	6
図 4.1.1-1	平行平板濃度孔無し岩体の概略図	11
図 4.1.4-1	動水勾配と流量の関係 (平行平板濃度孔無し岩体)	15
図 4.1.4-2	動水勾配と透水量係数の関係 (平行平板濃度孔無し岩体)	15
図 4.1.4-3	動水勾配とトレーサー流速の関係 (平行平板濃度孔無し岩体)	15
図 4.1.4-4	動水勾配と水理的開口幅の関係 (平行平板濃度孔無し岩体)	16
図 4.1.4-5	動水勾配と物質移行開口幅の関係 (平行平板濃度孔無し岩体)	16
図 4.1.4-6	動水勾配と縦方向分散長の関係 (平行平板濃度孔無し岩体)	16
図 4.2.1-1	平行平板濃度孔有り岩体の概略図	17
図 4.2.2-1	濃度センサー位置の名称	18
図 4.2.4-1	試験岩体内濃度センサーの構造模式図	19
図 4.2.5-1	対象亀裂と試験岩体内濃度センサー窓の位置関係の模式図	20
図 4.2.6-1(a)	破過曲線(Case-A)	22
図 4.2.6-1(b)	破過曲線(Case-B)	22
図 4.2.6-1(c)	破過曲線(Case-C)	22
図 4.2.6-1(d)	破過曲線(Case-D)	23
図 4.2.6-1(e)	破過曲線(Case-E)	23
図 4.2.6-1(f)	破過曲線(Case-F)	23
図 4.2.6-2	対象箇所(内部 5)での破過曲線	24
図 4.2.6-3	破過曲線 (濃度センサー設置位置による違い) (Case-B, Case-B+, case-B-)	24
図 5.1-1	天然亀裂岩体の概略図	26
図 5.1-2	濃度孔配置図	26
図 5.3-1	排水側水頭差の比と排水側流量の比	31
図 5.3-2(a)	破過曲線(A-11)	32
図 5.3-2(b)	破過曲線(A-15)	32
図 5.3-2(c)	破過曲線(A-19)	32
図 5.3-2(d)	破過曲線(A-23)	33
図 5.3-2(e)	破過曲線(A-27)	33
図 5.3-2(f)	破過曲線(A-31)	33
図 5.3-3(a)	Ogata-Banks 式フィッティング結果(A-11)	34

図 5.3-3(b)	Ogata-Banks 式フィッティング結果(A-15)	34
図 5.3-3(c)	Ogata-Banks 式フィッティング結果(A-19)	34
図 5.3-3(d)	Ogata-Banks 式フィッティング結果(A-23)	35
図 5.3-3(e)	Ogata-Banks 式フィッティング結果(A-27)	35
図 5.3-3(f)	Ogata-Banks 式フィッティング結果(A-31)	35
図 5.4.1-1	動水勾配と流量の関係 (天然亀裂岩体)	37
図 5.4.1-2	動水勾配と透水量係数の関係 (天然亀裂岩体)	37
図 5.4.1-3	動水勾配と水理的開口幅の関係 (天然亀裂岩体)	37
図 5.4.2-1	動水勾配とトレーサー流速の関係 (天然亀裂岩体)	39
図 5.4.2-2	動水勾配と物質移行開口幅の関係 (天然亀裂岩体)	39
図 5.4.2-3	動水勾配と縦方向分散長の関係 (天然亀裂岩体)	39
図 5.4.3-1	水理的開口幅と物質移行開口幅の関係 (天然亀裂岩体)	40
図 5.4.4-1	排水ポート別の定常時のマスフラックス (天然亀裂岩体)	42
図 5.4.4-2	排水ポート別の定常時の濃度 (天然亀裂岩体)	42
図 5.4.4-3	天然亀裂岩体の試験体内部の濃度状態 (定常状態)	43
図 6.1-1	応力依存性試験手順	45
図 6.4.1-1	垂直応力と変位の関係 (応力依存性試験)	48
図 6.4.2-1	垂直応力と透水量係数の関係 (応力依存性試験)	49
図 6.4.3-1	垂直応力と水理的開口幅の関係 (応力依存性試験)	51
図 6.4.3-2	垂直応力と物質移行開口幅の関係 (応力依存性試験)	51
図 6.4.4-1	垂直応力と縦方向分散長の関係 (応力依存性試験)	52

1. はじめに

1.1 本研究の背景と目的

高レベル放射性廃棄物を花崗岩などの不連続面の卓越した岩盤内に処分する場合には、核種は主として岩盤内の単一亀裂中を移行すると考えられている¹⁾。このため、単一亀裂の透水・物質移行特性を把握することは天然バリア性能評価には不可欠の検討事項であるといえる。従来より単一亀裂の水理・物質移行特性については様々な研究がなされている²⁾が、それらの多くは岩石コアを対象としたものが多い。しかし、亀裂中の核種移行は、亀裂内のチャンネルと呼ばれるある特定経路を移行することが知られており、岩石コアを使用した室内試験では大きさの制約から、このチャンネルを包含した試験が困難である場合が多く、亀裂内の不均質なチャンネル構造を表現できなくなると考えられる。その結果、透水・物質移行特性をあらわすパラメータを過大もしくは過小評価すると考えられる。

本研究で使用している試験装置は亀裂状媒体水理試験設備 (**LAB**oratory test on mass transport in fractured **ROCK**: 略称 **LABROCK**) である。これは、単一亀裂を対象とした透水・トレーサー室内実験装置である。**LABROCK** で使用可能な試験岩体の最大寸法は幅 50cm, 流水方向の長さ 50cm であり、単一亀裂内のチャンネルを包含した試験を実施できる可能性が高い。そのため、亀裂内の不均質性を的確に評価でき、単一亀裂の特性をより正確に把握できると考えられる。本研究では、このチャンネルを包括した試験岩体を使用可能である **LABROCK** を使用して、単一亀裂内の水理・物質移行現象を把握することを主目的としている。

本研究では、予備試験として平行平板岩体を使用した透水・トレーサー試験、本試験として天然亀裂岩体を使用した透水・トレーサー試験を実施した。それぞれの試験目的を以下に示す。

①予備試験（平行平板濃度孔無し岩体・平行平板濃度孔有り岩体）

- ・平行平板濃度孔無し岩体

本研究での室内試験装置 (**LABROCK**) の実用性を検証するために、評価の最も簡易な単一亀裂である平行平板を使用した透水・トレーサー試験を実施した。

- ・平行平板濃度孔有り岩体

濃度孔とは、単一亀裂における注水と排水の間の濃度変化を把握するためのセンサーを挿入するために設けられたものである。この濃度孔におけるトレーサー濃度の計測結果の妥当性を検証するために平行平板濃度孔有り岩体でのトレーサー試験を実施した。

②本試験（天然亀裂岩体）

天然亀裂岩体では天然亀裂の透水・物質移行特性の詳細な把握と透水特性の応力依存性の把握を目的とした。これらの問題解明のために以下の試験段階を設定している。

- 第1段階：垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験（天然亀裂岩体を使用した透水・トレーサー試験）

第2段階：垂直応力負荷状態での透水・トレーサー試験（応力依存性試験）

第3段階：レジン材注入法による開口幅測定

2001年度までの研究では、上記第2段階までが終了している。第3段階は2002年度以降に実施する予定であり、本報告書では第2段階までの試験結果を取りまとめる。

1.2 本報告書の概要

本報告書の内容を以下に示す。

1章では本研究の背景と目的および本報告書の概要を記した。

2章では、本研究で使用した水理・物質移行試験装置である **LABROCK** の概要について記述している。

3章では、透水・トレーサー試験方法と取得されるデータの概要について説明している。

4章では予備試験である、平行平板濃度孔無し岩体、平行平板濃度孔有り岩体での試験結果を示しており、**LABROCK** の実用性について検証している。

5章では、天然亀裂岩体を使用した透水・トレーサー試験を実施しており、天然亀裂岩体の透水・物質移行特性に関する考察を行っている。

6章では、天然亀裂岩体の亀裂面に対して垂直な荷重をかけた透水・トレーサー試験（応力依存性試験）を実施しており、垂直応力—透水・物質移行特性の連成問題に関する知見を深めることを試みている。

7章では、本報告書を総括し、今後の課題について触れている。

2. 亀裂状水理試験設備(LABROCK)の概要

2.1 LABROCK の配管

図 2.1-1 に LABROCK の配管図を示す。以下に各箇所を説明する。

・注水と排水について

注水側は注水堰とトレーサー堰，排水側は排水ポットを使用しており，注水側・排水側ともにほぼ定水頭を与えることができる構造となっている。また，水からトレーサーへの切り替えは三方電磁弁により行い，ほぼ瞬時に全てのポートの切り替えが可能となっている。

・ポートについて

各ポートは注水側・排水側ともに 5 つ設けてあり，水抜き孔と濃度センサーを設置できるようになっている。

・流量測定について

流量は排水ポットの重量を電子天秤で計測することで算出される。

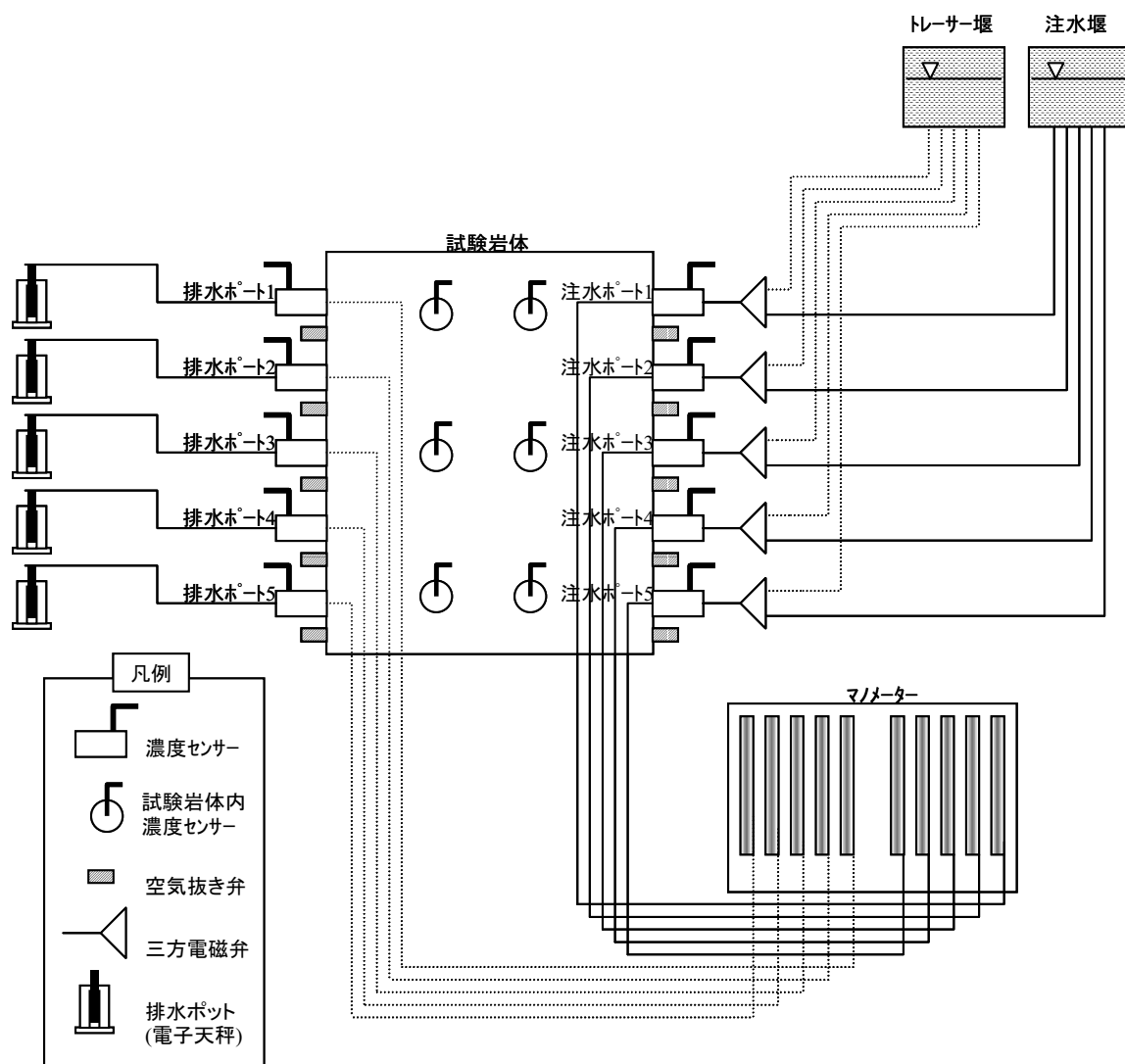


図2.1-1 LABROCK配管図

2.2 LABROCK で使用される水頭

図 2.2-1 に各水頭値の名称を示す。計測される水頭値としては、注水堰水頭値、注水ポート水頭値、排水ポート水頭値、排水ポット水頭値の 4 種類である。なお、設定水頭差、試験体内水頭差を以下のように定義している。

- ・ 設定水頭差 = 注水堰水頭値 - 排水ポット水頭値
- ・ 試験体内水頭差 = 注水ポート水頭値 - 排水ポート水頭値

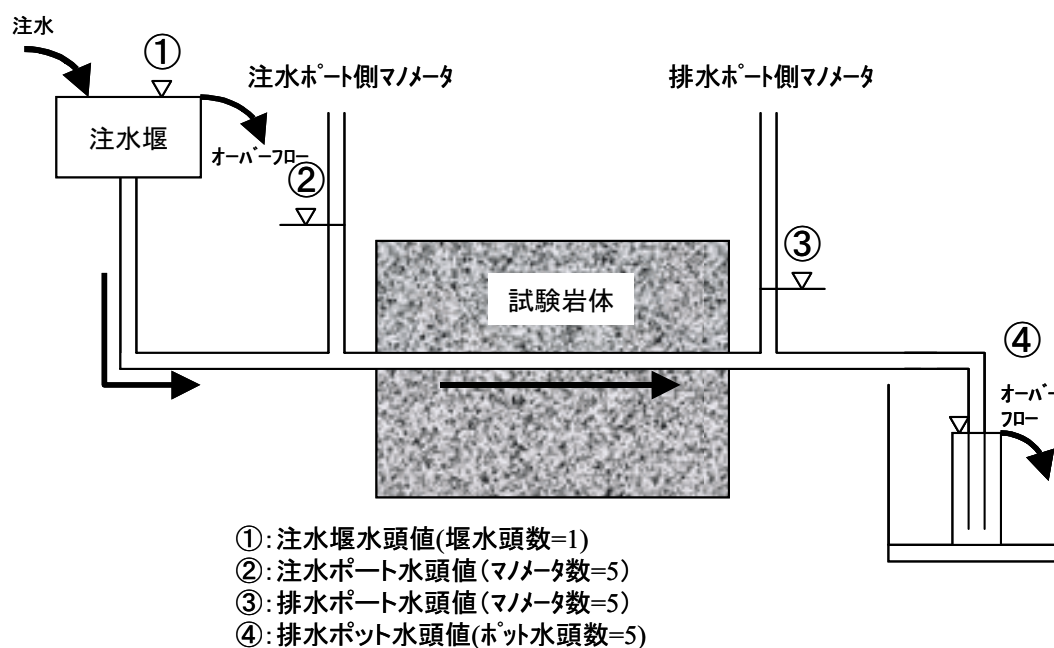


図2.2-1 本研究で使用される水頭の名称

2.3 LABROCK の応力負荷装置

図 2.3-1 に応力負荷装置の概略を示す。LABROCK の応力負荷装置は油圧ジャッキとサーボコントロール式水圧ジャッキに分けられる。まず油圧ジャッキによりある程度の高さまで載荷板を上げ、その後サーボコントロールで制御される水圧ジャッキによって設定した荷重値（最大可能荷重値=196kN）を保持する。

変位計（東京測器：CDP-10）を試験岩体の 4 隅に設置し、計測幅 31cm で変位を測定した。また、使用した変位計の測定精度は 10^{-3}mm となっている。

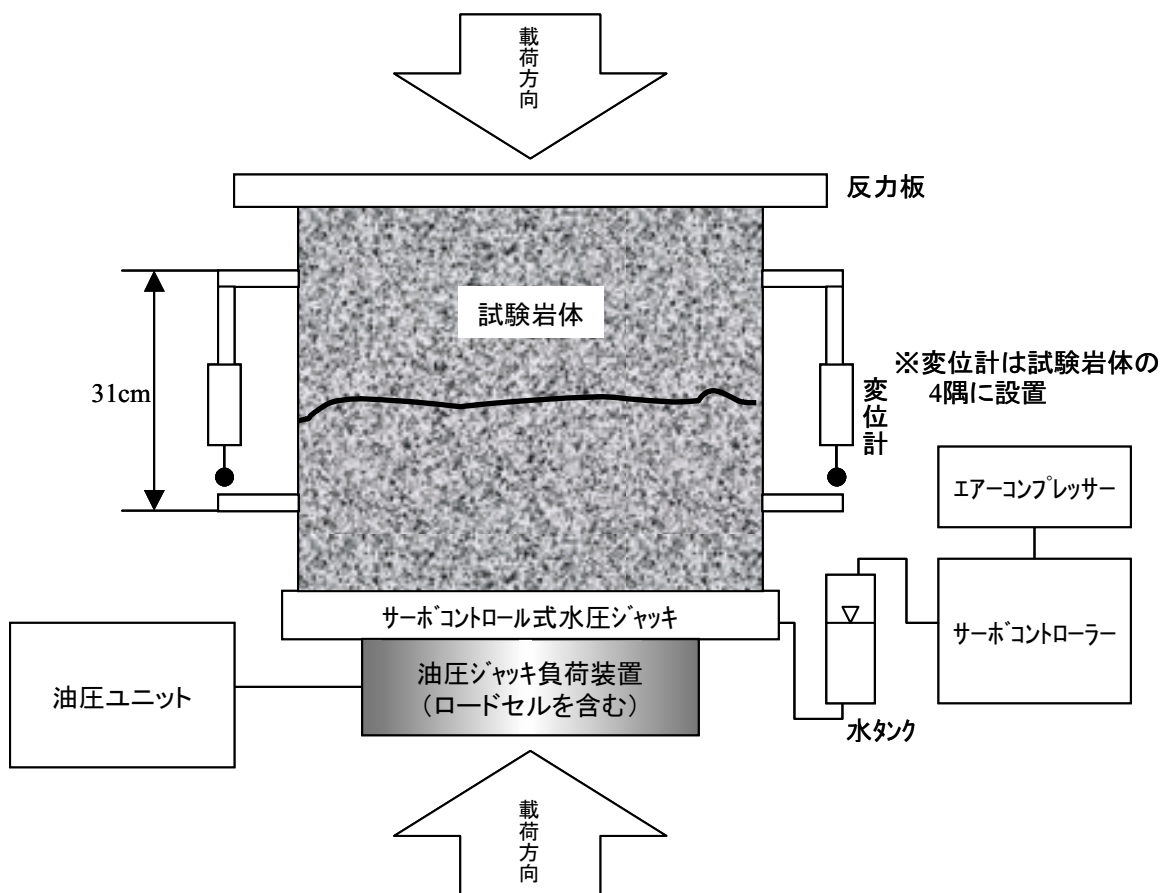


図2.3-1 応力負荷装置の概略

3. 透水・トレーサー試験方法とデータの概要

以下に透水試験とトレーサー試験の試験方法を示す。透水試験とトレーサー試験の方法は別に記しているが、実際には透水試験が終了すると同時にトレーサー試験に移行するため、透水試験とトレーサー試験は両者で一連の試験となっている。

3.1 透水試験方法

透水試験は以下の手順で実施される。

- ①試験岩体内を完全飽和状態にする。
- ②注水側と排水側のマノメータにより試験前の水頭を計測し、両者の水頭が等しいことを確認する。
- ③注水堰を所定の高さまで上げて透水を開始し、排水側の流量の推移を計測することで試験岩体内の流れが定常であることを確認する。
- ④マノメータで注水側と排水側の水頭値を計測する。
- ⑤排水側の流量を計測する。(流量計測は自動計測である)
- ⑥計測に十分な時間が経過した後透水試験を終了し、トレーサー試験へと移行する。

3.2 トレーサー試験方法

トレーサー試験は以下の手順で実施される。以下の手順は透水試験の⑥の後に継続して実施されるものである。なお、本研究では、トレーサーとして塩水(1重量%)を使用している。

- ①三方電磁弁の切り替えにより、トレーサー注入を開始する。
- ②各濃度計で濃度の変化を計測する。(濃度計は自動計測である。)
- ③全ての濃度計で濃度変化が無くなった後にトレーサー注入を停止し、三方電磁弁を切り替えて送水する。
- ④全ての濃度計でトレーサーによる濃度が検出されなくなったことを確認して試験を終了する。

3.3 本研究で使用されるデータの概要

1次データについて以下に列挙する. 各データ後の()内には, そのデータの略号を示す. ただし, 注水ポート*i*の流量($q_{in i}$)は, 直接計測されて得られる値ではなく, その他のデータを使用して算出される値である. これについては5.3において詳述している.

- ・注水ポート*i*の水頭値($h_{in i}$)
- ・排水ポート*j*の水頭値($h_{out j}$)
- ・注水ポート*i*の流量($q_{in i}$)
- ・排水ポート*j*の流量($q_{out j}$)
- ・注水ポート*i*の濃度($C_{in i}$)
- ・排水ポート*j*の濃度($C_{out j}$)
- ・内部センサー*k*の濃度(C_k)
- ・垂直荷重値(P)
- ・変位計*m*の変位(δm)

上記各データから算出される2次データについて以下に列挙する.

①垂直応力 (σ)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.3-1)$$

ただし, A : 垂直荷重面の面積(2500cm^2)である.

②動水勾配(I)

$$I = \frac{\frac{\sum_{j=1}^n h_{out j}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n h_{in i}}{n}}{L} \quad (3.3-2)$$

ただし, n : ポート数, L : 移行経路長 (50cm) である.

③流量 (Q)

$$Q = \sum_{j=1}^n q_{out j} \quad (3.3-3)$$

④注水側のマスフラックス ($q_{mas in}$)

$$q_{mas in} = \sum_{i=1}^n (C_{in i} \cdot q_{in i}) \quad (3.3-4)$$

⑤マスフラックス ($q_{mas out}$)

$$q_{mas out} = \sum_{j=1}^n (C_{out j} \cdot q_{out j}) \quad (3.3-5)$$

⑥平均変位量 (δ)

$$\delta = \frac{\sum_{m=1}^N \delta_m}{N} \quad (3.3-6)$$

ただし、N：変位計の数である。

⑦透水量係数 (Tr)

$$Tr = \frac{Q}{W \cdot I} \quad (3.3-8)$$

ただし、W：亀裂幅である。

⑧トレーサー平均流速 (V)

$$V = \frac{L}{T_{out}(50) - T_{in}(50)} \quad (3.3-7)$$

ただし、 $T_{in}(50)$ ：注入側のマスフラックスが最大値の50%になる時間、 $T_{out}(50)$ ：排水側のマスフラックスが最大値の50%になる時間である。

⑨縦方向分散長 (α)

縦方向分散長は実測の破過曲線を Ogata-Banks の式³⁾で得られる破過曲線にフィッティングさせて求めた。Ogata-Banks の式は式(3.3-9)で表される。

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x - Vt}{2\sqrt{\alpha Vt}} \right) + \exp \left(\frac{x}{\alpha} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x + Vt}{2\sqrt{\alpha Vt}} \right) \right\} \quad (3.3-9)$$

ただし、x：トレーサー投入地点からの距離、t：トレーサー投入開始からの経過時間、 $C(x,t)$ ：距離 x 時間 t での濃度、 C_0 ：トレーサーの初期濃度、V：トレーサー平均流速、 α ：縦方向分散長である。

Ogata-Banks の式では、トレーサー投入地点の濃度は $t > 0$ において常に C_0 であり、トレーサーの出現が瞬時になされている。しかし、室内実験でトレーサーを瞬時に発生させることは厳密には不可能であるため、ここではトレーサー濃度の時間変化を時間ごとに矩形パルスに分割し、各分割区間での微小な領域に Ogata-Banks の式を適用して重ね合わせることで全体の濃度を算出した。重ねあわせの考えに従って拡張した Ogata-Banks の式を式(3.3-10)に示す。

$$C(x,t) = \sum_{s=1}^N \frac{C_s - C_{s-1}}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x - V \left(t - \frac{t_s - t_{s-1}}{2} \right)}{2\sqrt{\alpha V \left(t - \frac{t_s - t_{s-1}}{2} \right)}} \right) + \exp \left(\frac{x}{\alpha} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x + V \left(t - \frac{t_s - t_{s-1}}{2} \right)}{2\sqrt{\alpha V \left(t - \frac{t_s - t_{s-1}}{2} \right)}} \right) \right\} \quad (3.3-10)$$

ただし、 s ：分割番号、 N ：分割数、 C_s ：分割番号 s のトレーサー濃度、 t_s ：分割番号 s のトレーサー投入からの経過時間である。

本研究では、式(3.3-10)の縦方向分散長 (α) を変化させ、破過曲線の観測値と計算値の残差 2 乗和が最小となるときの α を分散長として採用した。

⑩水理学的開口幅(bh)

本研究での水理学的開口幅とは、透水試験から算出される開口幅であり、修正 3 乗則から算出される。修正 3 乗則 4) は式(3.3-11)で表される。

$$\frac{Q}{\Delta h} = \frac{\rho g}{12\mu f} \frac{W}{L} b^3 \quad (3.3-11)$$

ただし、 Q ：流量、 Δh ：水頭差、 ρ ：密度、 g ：重力加速度、 μ ：粘性係数、 f ：亀裂表面特性因子、 W ：亀裂幅、 L ：移行経路長、 b ：開口幅である。式(3.3-11)を開口幅について解くと、水理学的開口幅が得られる。水理学的開口幅 (bh) を式(3.3-12)に示す。

$$bh = \left(\frac{12\mu Q}{\rho g \Delta h / L W} \right)^{\frac{1}{3}} f^{\frac{1}{3}} \quad (3.3-12)$$

⑪物質移行開口幅(bt)

本研究での物質移行開口幅とは、トレーサー試験結果から算出される開口幅である。物質移行開口幅を定義するため、式(3.3-13)が成り立つと仮定する。

$$Q \text{ (流量)} = \text{トレーサー流速} \times \text{断面積} = V \times Wb^* \quad (3.3-13)$$

ただし、 b^* は断面積を表現するための開口幅である。この b^* は水理学的開口幅でも物質移行開口幅でもない。式(3.3-11)中の Q に式(3.3-13)の Q を代入して、式(3.3-11)の右辺の断面積に相当する部分の Wb を便宜的に Wb^* とほぼ等しいと仮定すると式(3.3-14)が得られる。

$$bt = \left(\frac{12\mu V}{\rho g \Delta h / L} \right)^{\frac{1}{2}} f^{\frac{1}{2}} \quad (3.3-14)$$

式(3.3-14)の bt は、透水試験結果に依存せず、トレーサー試験結果のみから算出できる値となっていることがわかる。

なお、式(3.3-12)と式(3.3-14)の中で、 $f=1$ とした場合、それぞれの開口幅は 3 乗則に従った場合の値となる。

4. 予備試験

天然亀裂での透水・トレーサー試験を実施する前に、LABROCKの実用性を把握するために、理想的な平行平板を使用した試験を実施した。この平行平板を使用した試験を予備試験と称する。予備試験の試験岩体は、①平行平板濃度孔無し岩体、②平行平板濃度孔有り岩体の2種類である。以下にそれぞれの試験概要及び試験結果を示す。

4.1 平行平板濃度孔無し岩体による透水・トレーサー試験

4.1.1 平行平板濃度孔無し岩体の概要

図 4.1.1-1 に平行平板濃度孔無し岩体の概略図を示す。試験岩体は、花崗岩（福島県稲沢地方産）の直方体ブロック（長さ 50cm、幅 50cm、高さ 15cm）を2枚組み合わせたものを使用した。亀裂面に相当する部分は平行平板を作成するために #2000 の研磨剤により研磨されている。花崗岩ブロックの間には厚さ 1mm のチタン板を挟んでおり、開口幅が約 1mm の平行平板亀裂となっている。

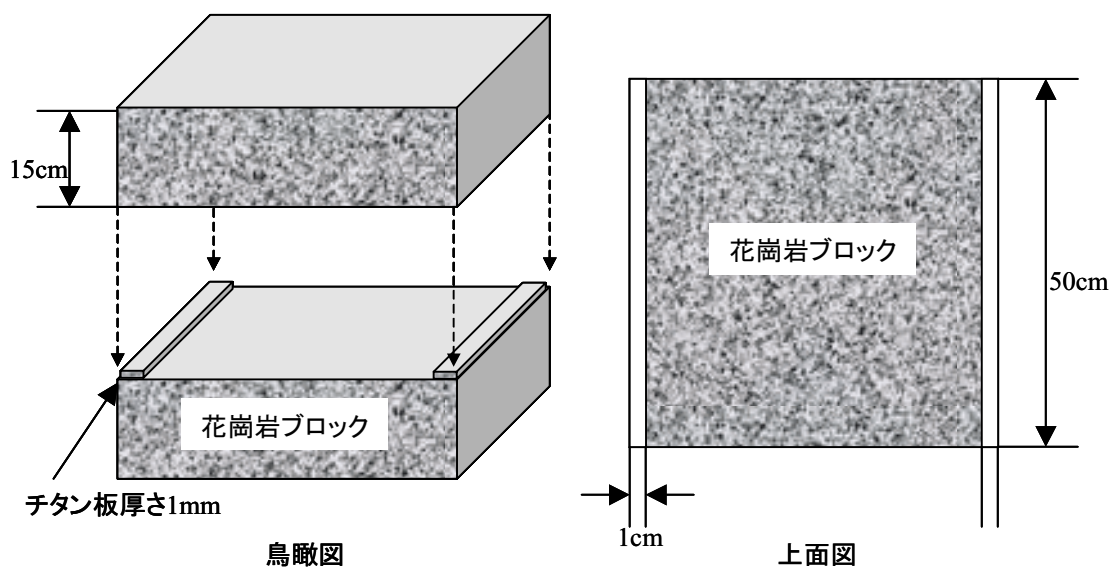


図4.1.1-1 平行平板濃度孔無し岩体の概略図

4.1.2 試験ケース（平行平板濃度孔無し岩体）

表 4.1.2-1 に平行平板濃度孔無し岩体での試験ケースを示す。試験に際しては、取得データの信頼性を確認するために設定水頭差を等しくした試験を2回繰り返した。

表 4.1.2-1 試験ケース（平行平板濃度孔無し岩体）

試験ケース	設定水頭差(cm)	繰り返し数(回)
A-19-1	19	1
A-19-2	19	2
A-23-1	23	1
A-23-2	23	2
A-27-1	27	1
A-27-2	27	2
A-31-1	31	1
A-31-2	31	2

4.1.3 試験結果（平行平板濃度孔無し岩体）

表 4.1.3-1 に平行平板濃度孔無し岩体の試験結果を示す。設定水頭差が等しいケースでは、各値はほぼ等しく、取得データの信頼性は高いと考えられる。

表 4.1.3-1 試験結果（平行平板濃度孔無し岩体）

試験ケース	設定水頭差	試験岩体内水頭差	動水勾配	流量	透水量係数	水理学的開口幅	トレーサー流速	物質移行開口幅	縦方向分散長
	cm	cm	-	cm ³ /sec	cm ² /sec	cm	cm/sec	cm	cm
A-19-1	19	0.88	0.0176	3.38	3.8409	0.0778	0.877	0.0781	5.7
A-19-2	19	0.88	0.0176	3.47	3.9451	0.0785	0.794	0.0743	4.3
A-23-1	23	1.21	0.0242	4.51	3.7273	0.0770	0.980	0.0704	4.6
A-23-2	23	1.18	0.0236	4.61	3.9054	0.0782	0.980	0.0713	4.3
A-27-1	27	1.48	0.0296	5.81	3.9257	0.0783	1.190	0.0702	4.6
A-27-2	27	1.48	0.0296	5.81	3.9223	0.0783	1.110	0.0678	5.6
A-31-1	31	1.78	0.0356	6.79	3.8155	0.0776	1.390	0.0691	4.0
A-31-2	31	1.75	0.0350	6.93	3.9600	0.0786	1.390	0.0697	5.8

4.1.4 考察（平行平板濃度孔無し岩体）

図 4.1.4-1 に動水勾配と流量の関係を示す。同図より、動水勾配と流量は比例関係にあることがわかる。つまり、ダルシー則が成立し、修正 3 乗則が適用可能であることを示している。図 4.1.4-2 に動水勾配と透水量係数の関係を示す。透水量係数は約 $4(\text{cm}^2/\text{sec})$ であり、動水勾配に関係のない値となっている。このことから、ダルシー則が適用可能であると考えられる。図 4.1.4-3 には、動水勾配とトレーサー流速の関係を示す。トレーサー流速も流量と同様に動水勾配とほぼ比例関係にあることがわかる。

図 4.1.4-4 には動水勾配と水理的開口幅の関係を示す。水理的開口幅は動水勾配に関係なく、約 $0.08(\text{cm})=0.8\text{mm}$ である。図 4.1.4-5 には動水勾配と物質移行開口幅の関係を示す。動水勾配が最も低いケースで若干物質移行開口幅が大きくなっているが、これは試験体内水頭差が小さくなったことで単位水頭差あたりの流速($V/\Delta h$)の値に測定誤差が多く含まれたためではないかと考えられる。しかし、物質移行開口幅は概ね動水勾配に関係無く約 $0.07(\text{cm})=0.7\text{mm}$ であると考えられる。

以上より、試験岩体の開口幅設定は約 1mm であることを考慮すると、水理的開口幅、物質移行開口幅ともにほぼ設定した開口幅に等しいと考えられる。また、物質移行開口幅は、水理的開口幅よりも若干小さくなっている。一般に、水理的開口幅と物質移行開口幅の大小関係は流れに沿った亀裂内の開口幅変化と流れに直交する亀裂内の開口幅変化の大小関係に起因していると考えられている⁵⁾。完全な平行平板であれば水理的開口幅と物質移行開口幅は等しくなるはずであるが、今回の試験では両者に若干の違いがあった。試験誤差とも考えられるため断定は出来ないが、試験体の亀裂には若干の起伏があるものと考えられる。しかし、設定開口幅を水理的開口幅と物質移行開口幅でほぼ推定できたことから LABROCK での透水試験は実用性が高いと考えられる。

図 4.1.4-6 に、動水勾配と縦方向分散長の関係を示す。縦方向分散長は、約 $4\sim 6\text{cm}$ であり、移行経路長 (50cm) の約 $1/10$ であることが確認された。縦方向分散長を数 cm 程度の範囲で推定できたことから、LABROCK で得られた破過曲線は信頼性が高いと考えられる。

4.1.5 平行平板濃度孔無し岩体での試験結果まとめ

ここでは、設定開口幅約 1mm の平行平板を使用した透水・トレーサー試験を実施した。その結果、透水試験とトレーサー試験から求められる水理的開口幅と物質移行開口幅は設定した開口幅とほぼ等しいことなどから LABROCK が実用に供し得ることを確認した。

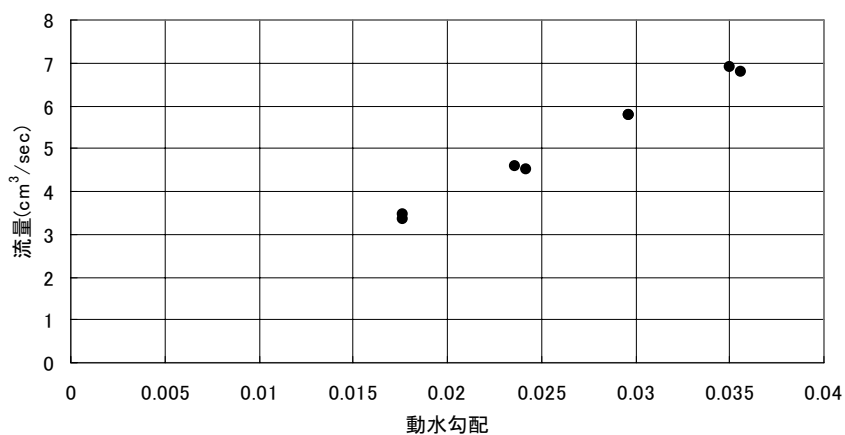


図4.1.4-1 動水勾配と流量の関係(平行平板濃度孔無し岩体)

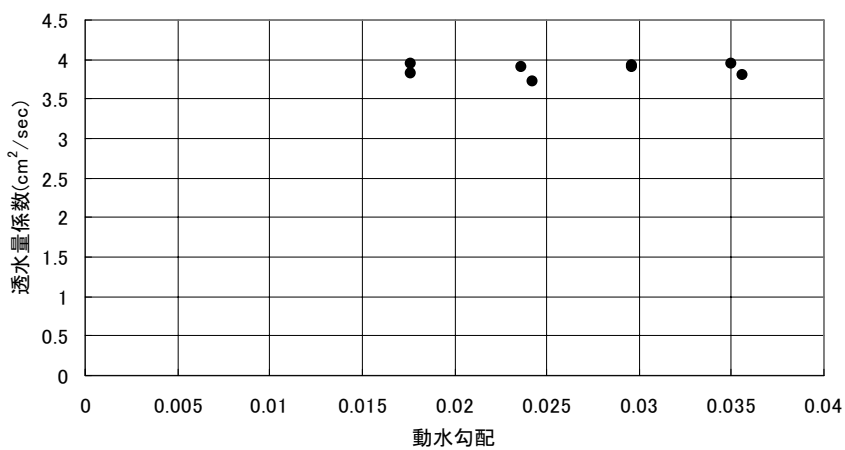


図4.1.4-2 動水勾配と透水量係数の関係(平行平板濃度孔無し岩体)

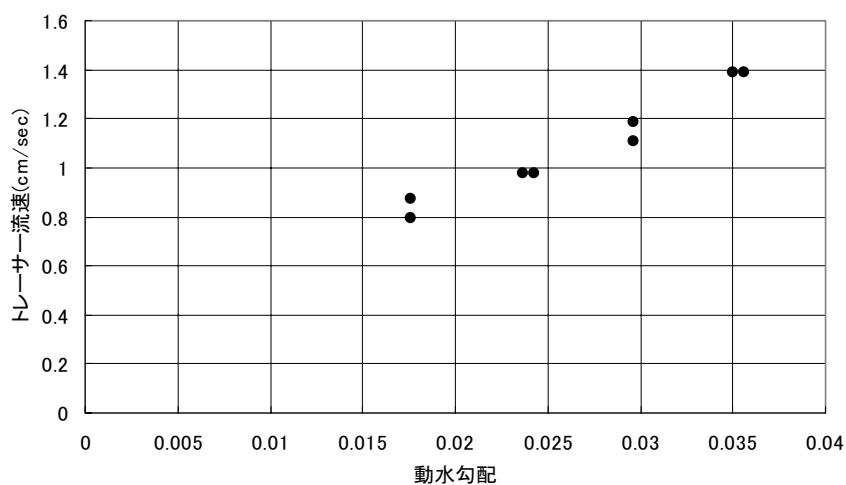


図4.1.4-3 動水勾配とトレーサー流速の関係(平行平板濃度孔無し岩体)

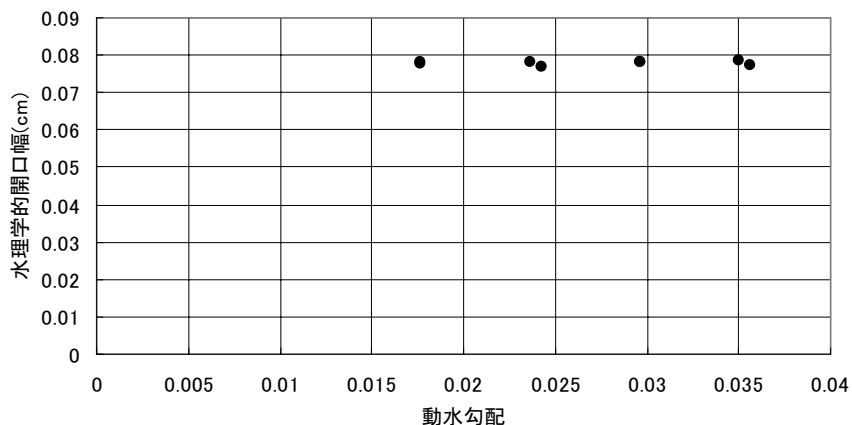


図4.1.4-4 動水勾配と水理学的開口幅の関係(平行平板濃度孔無し岩体)

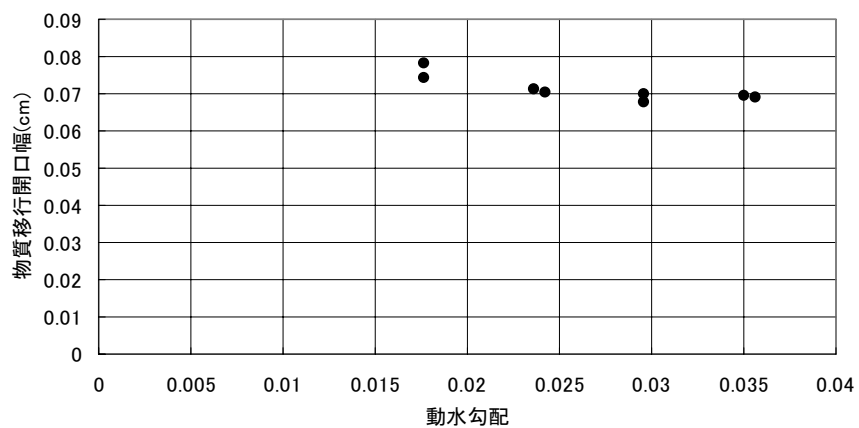


図4.1.4-5 動水勾配と物質移行開口幅の関係(平行平板濃度孔無し岩体)

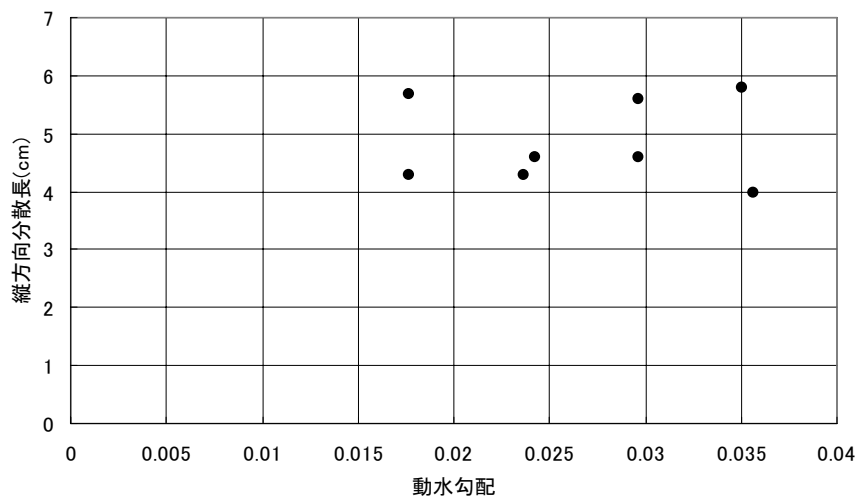


図4.1.4-6 動水勾配と縦方向分散長の関係(平行平板濃度孔無し岩体)

4.2 平行平板濃度孔有り岩体による透水・トレーサー試験

4.2.1 平行平板濃度孔有り岩体の概要

平行平板濃度孔有り岩体の概略を図 4.2.1-1 に示す。平行平板濃度孔有り岩体は、平行平板濃度孔無し岩体に直径 3cm の濃度孔を削孔して作成した。つまり、試験岩体の寸法等は平行平板濃度孔無し岩体と全く同様である。濃度孔は、全部で7つ設定した。

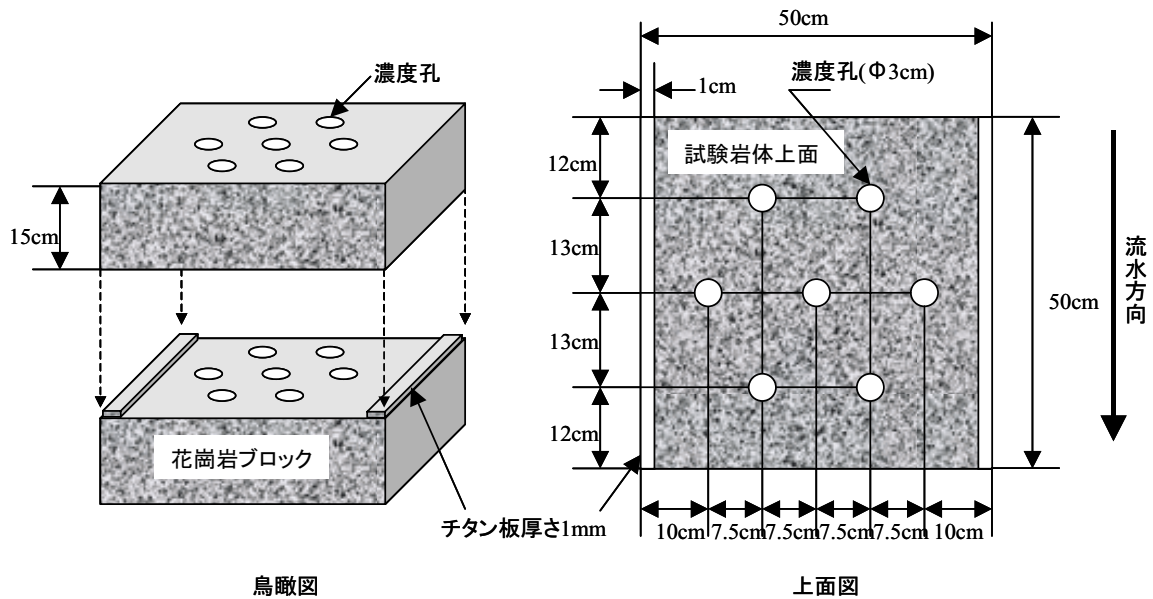


図4.2.1-1 平行平板濃度孔有り岩体の概略図

4.2.2 濃度センサーと濃度センサー位置の名称

濃度センサーの名称を表 4.2.2-1 に示す.

表 4.2.2-1 濃度センサーの名称

	濃度センサーの名称
注水用濃度センサー	I1, I2, I3, I4, I5
試験岩体内濃度センサー	A, B, C, D, E, F, G
排水用濃度センサー	O1, O2, O3, O4, O5

濃度センサー位置の名称は、図 4.2.2-1 のようにした。すなわち、注水 1～5，内部 1～7，排水 1～5 となっている。

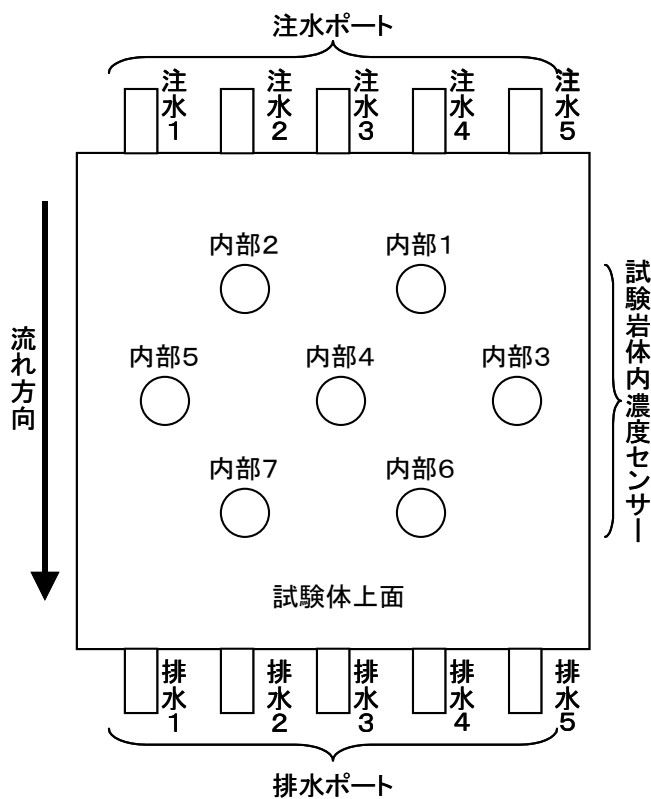


図4.2.2-1 濃度センサー位置の名称

4.2.3 試験方法（平行平板濃度孔有り岩体）

平行平板孔有り岩体での試験目的は、試験岩体内濃度センサーの適用性および設置方法を確認することである。以下に平行平板濃度孔有り岩体でのトレーサー試験方法を示す。

- ①堰を一定の高さ（設定水頭差＝31cm）に固定する。
- ②約5分間全ての注水ポートから透水し、平行平板内に定常な一様流を発生させる。
- ③その後、全ての注水ポートからトレーサーを注入させる。
- ④排水ポートでの濃度が定常的に約1重量%（トレーサーの初期濃度）であることが確認されたらトレーサー注入を停止し、送水する。
- ⑤全ての濃度センサーでの濃度が0重量%になったことを確認し、試験を終了する。

4.2.4 試験岩体内濃度センサーの構造

図 4.2.4-1 に試験岩体内濃度センサーの構造模式図を示す。試験岩体内濃度センサーの濃度検知部分の空積は約 3cm³である。

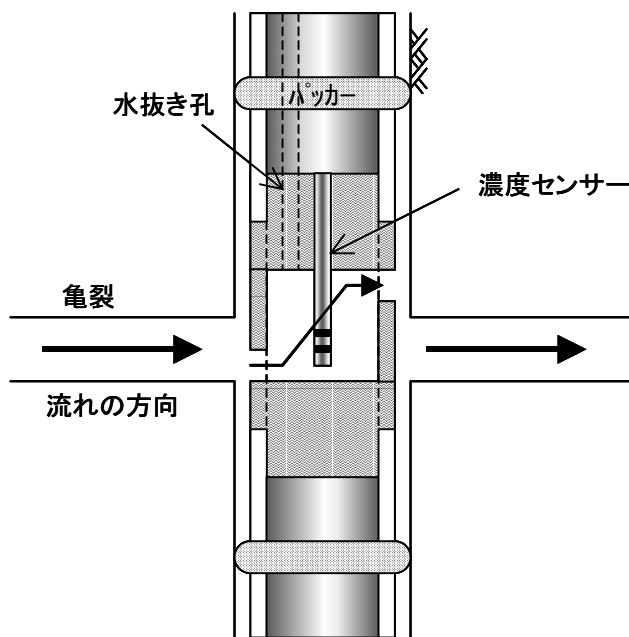


図4.2.4-1 試験岩体内濃度センサーの構造模式図

4.2.5 試験ケース（平行平板濃度孔有り岩体）

試験岩体内濃度センサーの性能把握のため、岩体内部の同一箇所にも各濃度センサーを交互に据え付け、その濃度変化の同一性を確認することで性能を把握することを試みた。試験対象箇所は内部 5 であり、その箇所にも濃度センサーA~F を据え付けて比較検討することにした。表 4.2.5-1 に試験ケースを示す。なお、対象箇所である内部 5 の選定理由は、試験岩体の流水方向に対してちょうど中央にあり、比較検討の容易な箇所と考えたためである。また、CASE-A~CASE-F までは、センサー窓のほぼ中央に対象亀裂が配置されるように設置深度を設定しているが、CASE-B+ と CASE-B- は、センサー窓の中央が対象亀裂の上下 1cm に位置するように設定されている。これは、センサーの設置深度と対象亀裂の関係が測定結果に及ぼす影響を把握するために実施したものである。図 4.2.5-1 に、CASE-B, CASE-B+, CASE-B- での対象亀裂位置とセンサー窓の位置関係を示す。

表 4.2.5-1 試験ケース（平行平板濃度孔有り岩体）

ケース名	濃度センサー	対象箇所	亀裂位置
CASE-A	A	内部 5	中央
CASE-B	B	内部 5	中央
CASE-C	C	内部 5	中央
CASE-D	D	内部 5	中央
CASE-E	E	内部 5	中央
CASE-F	F	内部 5	中央
CASE-B+	B	内部 5	上 1cm
CASE-B-	B	内部 5	下 1cm

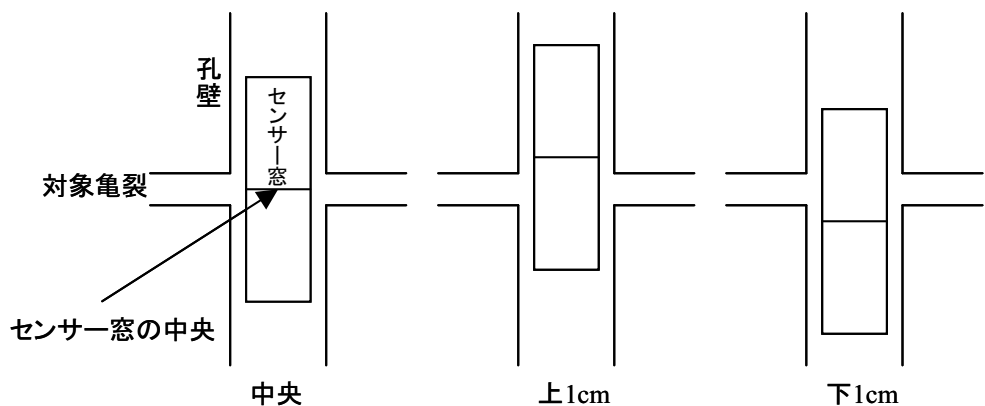


図4.2.5-1 対象亀裂と試験岩体内濃度センサー窓の位置関係の模式図

4.2.6 試験結果と考察（平行平板濃度孔有り岩体）

図 4.2.6-1 に各ケースでの破過曲線を示す。なお，ここでは注水 1，内部 5，排水 1 の箇所での試験結果のみを示している。同図より，内部 5 において濃度 0.5% の時間は注水と排水の時間のほぼ中央に位置しており，濃度センサーはほぼ良好な検知感度を有していることがわかる。

図 4.2.6-2 に注水 1 の濃度検知開始時間を 0 としたときの対象箇所（内部 5）での破過曲線を各濃度センサー別に示す。なお，ここでは Case-A～Case-F の結果を使用している。同図より各センサーはほぼ同様な曲線を描いており，センサーの個体差がほとんどないことがわかる。ただし，Case-F の曲線はその他の曲線と若干傾向が異なり，濃度上昇が早くなっている。これは，センサー内の構造に起因する誤差であると考えられる。そのため，以降の検討では試験岩体内濃度センサーのデータは定常時のもののみを使用することにした。非定常時のデータを使用する場合には試験岩体内濃度センサーの改良が必要となる。

図 4.2.6-3 に，Case-B，Case-B+，Case-B- の測定結果を示す。ここでは濃度センサー B を使用してセンサーの設置深度の違いによる測定結果の差異を把握しようとしている。同図より，上 1cm と中央の結果はほぼ同一の結果であるが，下 1cm は異なった結果となっている。これは，センサー内部での水の滞留によりセンサー空隙内の水がトレーサーに置換されにくかったことが原因であると考えられ，センサーの設置に際しては，対象亀裂に対してやや上方に設置することが望ましいと推測できる。

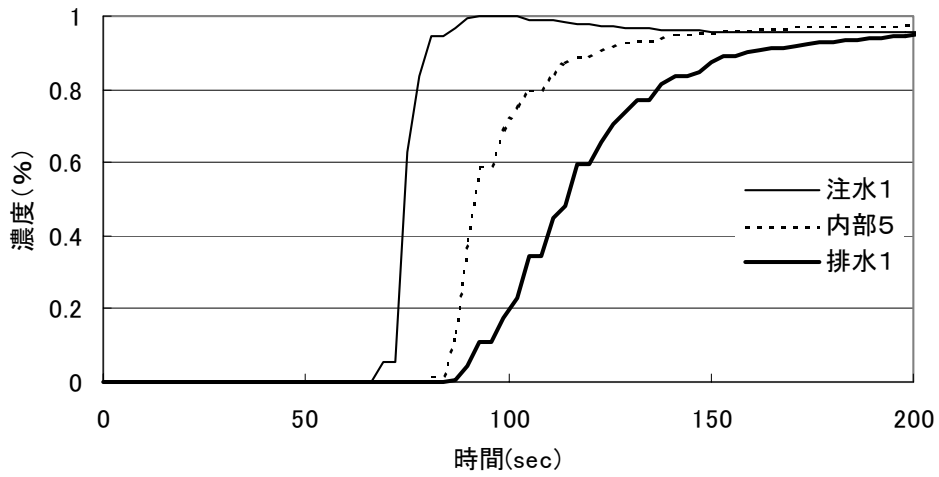


図4.2.6-1(a) 破過曲線(Case-A)

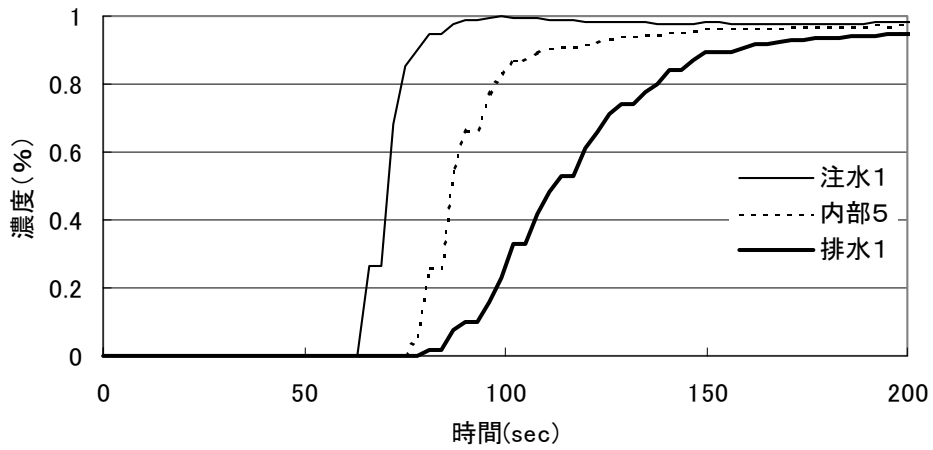


図4.2.6-1(b) 破過曲線(Case-B)

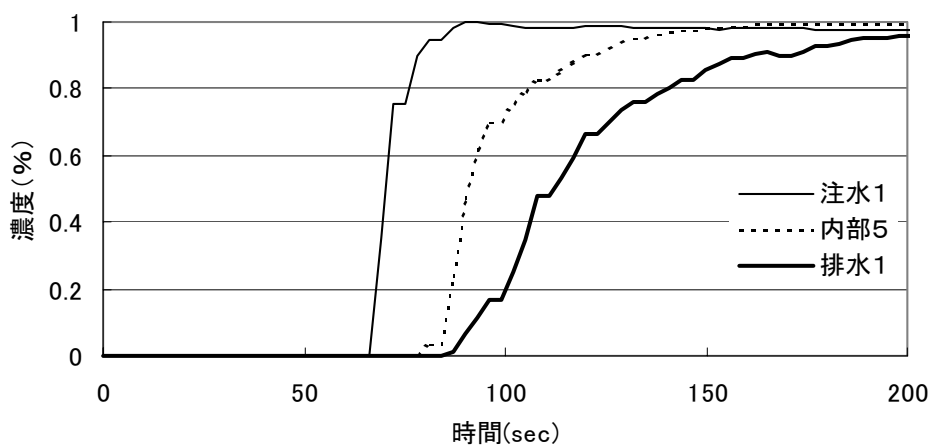


図4.2.6-1(c) 破過曲線(Case-C)

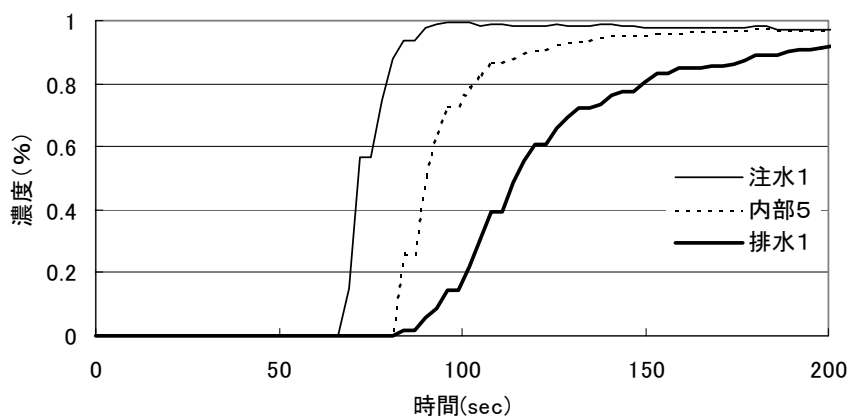


図4.2.6-1(d) 破過曲線(Case-D)

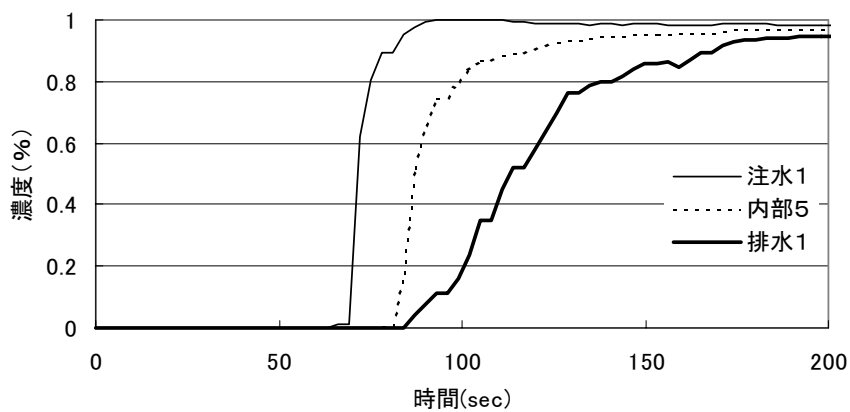


図4.2.6-1(e) 破過曲線(Case-E)

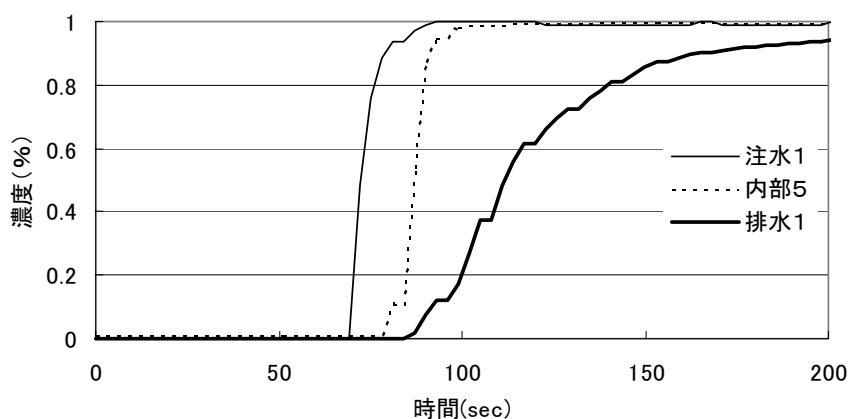


図4.2.6-1(f) 破過曲線(Case-F)

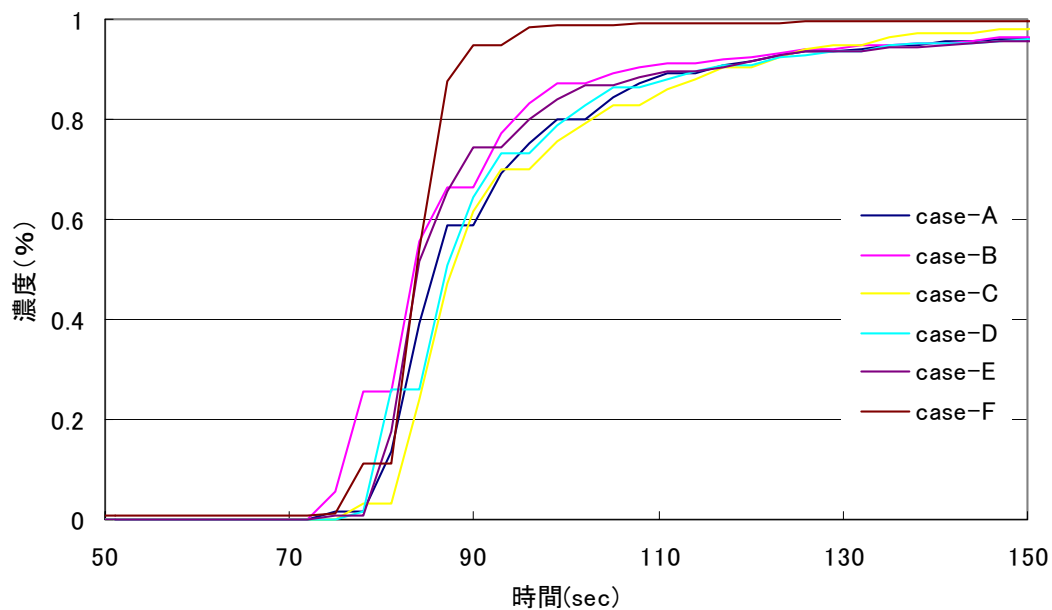


図4.2.6-2 対象箇所(内部5)での破過曲線

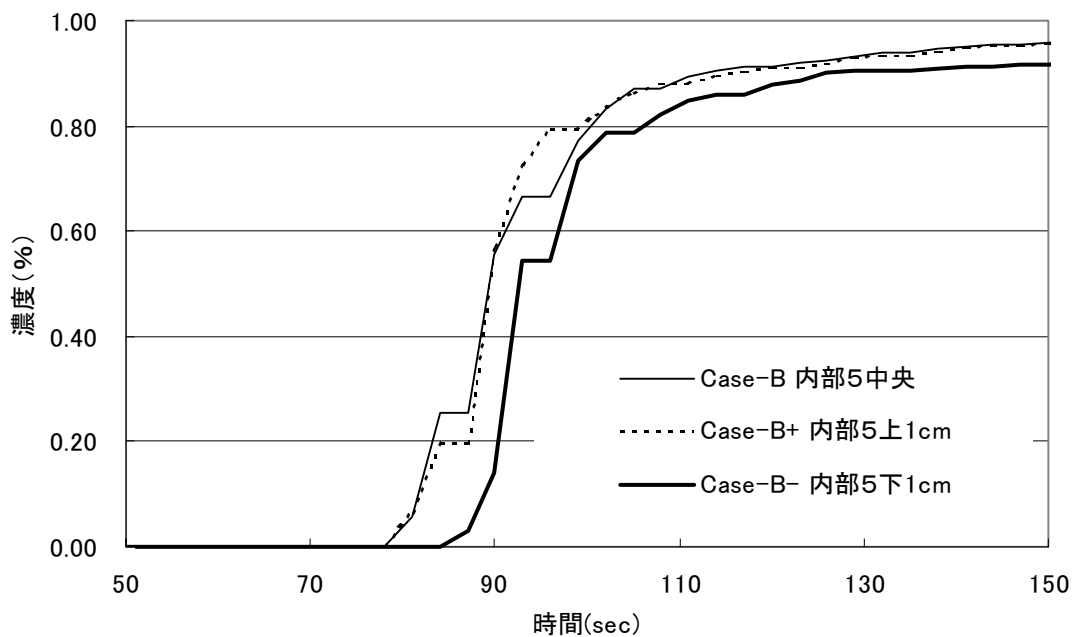


図4.2.6-3 破過曲線(濃度センサー設置位置による違い)
Case-B, Case-B+, Case-B-

4.2.7 平行平板濃度孔有り岩体での試験結果まとめ

平行平板濃度孔有り岩体での試験結果より以下の知見を得た。

- ①濃度センサーの濃度検知感度は良好であることがわかった。
- ②濃度センサーの個体差は無いことがわかった。
- ③濃度センサーの設置深度は対象位亀裂に対してやや上方(0～1cm 程度)に設置することが望ましいことがわかった。

以上より、上記③の事項に留意すれば、濃度センサーの性能は良好であり、実用に供し得ることを確認した。

5. 天然亀裂岩体を使用した透水・トレーサー試験

5.1 天然亀裂岩体の概要

図 5.1-1 に天然亀裂岩体の概略を示す。天然亀裂岩体は釜石鉱山で採取されたもの⁶⁾であり、そのほぼ中央に天然亀裂を有している。天然亀裂岩体内部の濃度を把握するために直径 3cm の濃度孔が6つ穿たれている。濃度孔は試験岩体の表面の微細亀裂観察から、なるべく垂直方向の微細亀裂と交差しないように配置した。図 5.1-2 に濃度孔の配置図を示す。

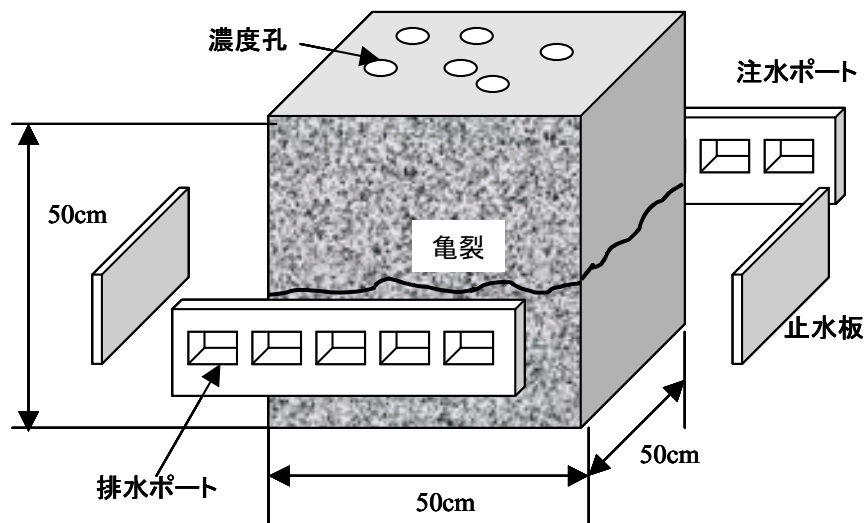


図5.1-1 天然亀裂岩体の概略図

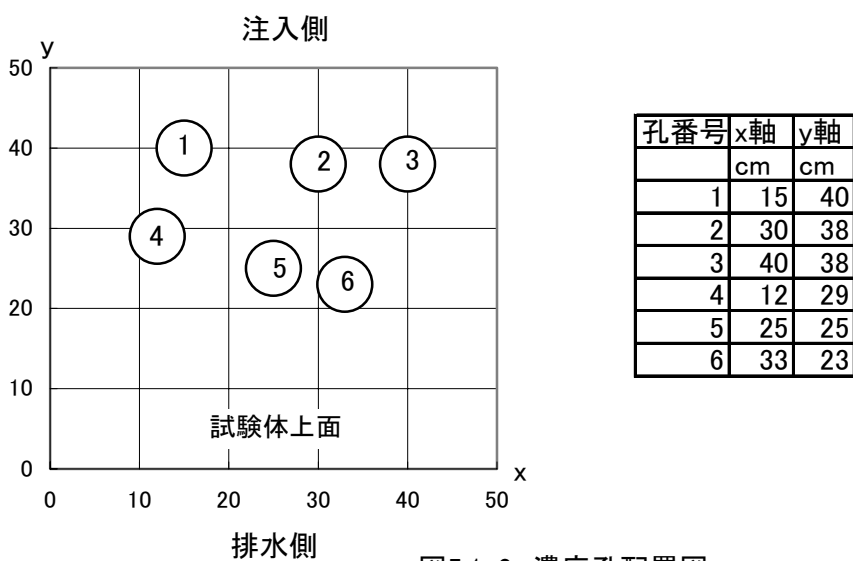


図5.1-2 濃度孔配置図

5.2 試験ケース（天然亀裂岩体）

表 5.2-1 に試験ケースを示す。天然亀裂岩体では、注入堰水頭差および使用トレーサーポートを変化させて試験を実施した。試験ケース A-11～A-31 は、水頭差による試験結果の相違の把握を目的としている。試験ケース B-31-1～B-31-5 は使用トレーサーポートの違いによる岩体内部の不均質性の概略的な把握を目的としている。なお、ここでは前者の試験ケース群を TYPE-A、後者の試験ケース群を TYPE-B として試験種別を設定している。

表 5.2-1 試験ケース（天然亀裂岩体）

ケース名	設定水頭差(cm)	使用したトレーサーポート※1	試験種別※2
A-11	11	1,2,3,4,5	TYPE-A
A-15	15	1,2,3,4,5	
A-19	19	1,2,3,4,5	
A-23	23	1,2,3,4,5	
A-27	27	1,2,3,4,5	
A-31	31	1,2,3,4,5	
B-31-1	31	1	TYPE-B
B-31-2		2	
B-31-3		3	
B-31-4		4	
B-31-5		5	

※1 使用したトレーサーポート：トレーサー試験で使用したポートの番号

※2 試験種別：TYPE-A＝水頭差による試験結果の相違の把握を目的としている。

TYPE-B＝使用トレーサーポートの違いによる岩体内部の不均質性の概略的な把握を目的としている。

5.3 試験結果（天然亀裂岩体）

透水試験結果を表 5.3-1～表 5.3-3 に示す。表 5.3-1 は注水側水頭値，表 5.3-2 は排水側水頭値，表 5.3-3 は排水側流量を表している。水頭値は排水ポットの水頭値を 0 として表記しており，TYPE-A のみを示している。TYPE-B は，透水試験結果としては TYPE-A の一部分に含まれるため省略した。なお，設定水頭差に対して実際の試験体内の水頭差が小さくなっているが，これは試験岩体以外の部分での水頭損失によるものである。

表5.3-1 透水試験結果(注入ポート水頭値)

ケース名	設定水頭差	注水1	注水2	注水3	注水4	注水5	注水平均
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
A-11	11	0.8	1.0	1.2	1.2	1.2	1.1
A-15	15	3.0	3.2	3.5	3.7	3.7	3.4
A-19	19	6.1	6.2	6.5	6.7	6.8	6.5
A-23	23	8.5	8.7	9.3	9.6	9.6	9.1
A-27	27	11.2	11.4	12.2	12.5	12.4	11.9
A-31	31	14.2	14.4	15.3	15.6	15.8	15.1

表5.3-2 透水試験結果(排水ポート水頭値)

ケース名	設定水頭差	排水1	排水2	排水3	排水4	排水5	排水平均
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
A-11	11	0.7	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
A-15	15	1.8	0.9	0.8	0.8	0.8	1.0
A-19	19	3.6	2.0	1.8	1.7	1.7	2.2
A-23	23	5.2	2.5	2.2	2.2	2.2	2.9
A-27	27	6.6	3.0	2.8	2.7	2.7	3.6
A-31	31	8.4	4.1	3.6	3.4	3.4	4.6

表5.3-3 透水試験結果(排水側流量)

ケース名	設定水頭差	排水1	排水2	排水3	排水4	排水5	排水合計
	cm	cm ³ /sec	cm ³ /sec	cm ³ /sec	cm ³ /sec	cm ³ /sec	cm ³ /sec
A-11	11	0.096	0.081	0.084	0.083	0.061	0.081
A-15	15	0.391	0.236	0.217	0.215	0.180	0.248
A-19	19	0.652	0.373	0.338	0.338	0.294	0.399
A-23	23	0.987	0.532	0.473	0.474	0.415	0.576
A-27	27	1.248	0.637	0.566	0.571	0.505	0.705
A-31	31	1.496	0.755	0.671	0.675	0.594	0.838

透水試験結果では，注水側・排水側の水頭値および排水側の流量が把握できたが，注水側の流量は把握できていない。しかし，トレーサー試験の評価では，注水側の流量が把握できていることが望ましい場合があるため，ここでは注水側の流量についてその推定を試みた。

LABROCK では，注水側・排水側ともに定水頭の注水堰および排水ポットを使用しており，注水堰および排水ポットでは定水頭になっていることに着目した。排水側の水頭値および排水ポットの水頭値は測定可能であるため，排水側から排水ポットまでの水頭差の合計に対するポート番号 j の水頭差の比を式(5.3-1)に定義した。

$$\frac{\Delta h_j}{\text{sum}h_j} = \frac{h_{\text{out}j} - h_{\text{pot}j}}{\sum_{j=1}^5 (h_{\text{out}j} - h_{\text{pot}j})} \quad (5.3-1)$$

ただし、 $\Delta h_j / \text{sum}h_j$: 排水側から排水ポットまでの水頭差の合計に対するポート番号 j の水頭差の比、 $h_{\text{out}j}$: 排水側ポート番号 j の水頭値、 $h_{\text{pot}j}$: 排水ポット番号 j の水頭値 (定水頭) である。

排水側総流量に対するポート番号 j の流量の比は式(5.3-2)で定義した。

$$\frac{q_j}{\text{sum}q_j} = \frac{q_{\text{out}j}}{\sum_{j=1}^5 q_{\text{out}j}} \quad (5.3-2)$$

ただし、 $q_j / \text{sum}q_j$: 排水側総流量に対するポート番号 j の流量の比、 $q_{\text{out}j}$: ポート番号 j の排水側流量である。図 5.3-1 に $\Delta h_j / \text{sum}h_j$ と $q_j / \text{sum}q_j$ の関係を示す。排水側ポートから排水ポットまでは各ポートともほぼ等しい長さで附属品が設けられているため、 $\Delta h_j / \text{sum}h_j$ と $q_j / \text{sum}q_j$ は理論的には全く同一の値になることが想定される。同図より両者の関係は、ほぼ同一の値をとっていることがわかる。すなわち、水頭差の比から流量を算出することは可能であると考えられる。

次に、注水堰から注水側ポートまでの水頭差の合計に対するポート番号 i の水頭差の比を式(5.3-3)で定義する。

$$\frac{\Delta h}{\text{sum}h_i} = \frac{h_{\text{seki}i} - h_{\text{in}i}}{\sum_{i=1}^5 (h_{\text{seki}i} - h_{\text{in}i})} \quad (5.3-3)$$

ただし、 $\Delta h / \text{sum}h_i$: 注水堰から注水側ポートまでの水頭差の合計に対するポート番号 i の水頭差の比、 $h_{\text{seki}i}$: 注水堰のポート番号 i の水頭値(定水頭)、 $h_{\text{in}i}$: 注水側ポート番号 i の水頭値である。試験は定常状態で実施されるため、注水側の各ポートの流量と $\Delta h / \text{sum}h_i$ の間には式(5.3-4)の関係があると仮定した。

$$q_{\text{in}i} = \frac{\Delta h_i}{\text{sum}h_i} \times \sum_{i=1}^5 q_{\text{out}j} \quad (5.3-4)$$

ただし、 $q_{\text{in}i}$: 注水側ポート番号 i の流量である。

表 5.3-4 に上記の考えに従って算出した注入側の流量を示す。

表5.3-4 注入側流量

ケース名	設定水頭差	注水1	注水2	注水3	注水4	注水5	注水合計
	cm	cm ³ /sec	cm ³ /sec	cm ³ /sec	cm ³ /sec	cm ³ /sec	cm ³ /sec
A-11	11	0.117	0.091	0.065	0.065	0.065	0.081
A-15	15	0.294	0.272	0.239	0.218	0.218	0.248
A-19	19	0.443	0.431	0.394	0.370	0.357	0.399
A-23	23	0.657	0.632	0.556	0.518	0.518	0.576
A-27	27	0.796	0.772	0.674	0.637	0.649	0.706
A-31	31	0.947	0.922	0.808	0.770	0.745	0.838

本報告では、表 5.3-1～表 5.3-4 の値を使用して各種の考察を実施した。

図 5.3-2 にトレーサー試験結果を示す。また、表 5.3-5 に TYPE-A についてトレーサー流速算出結果を示す。TYPE-B はトレーサーが 1 つのポートのみから注入される試験であるため、ここでは評価しなかった。

表 5.3-5 トレーサー流速算出結果（天然亀裂岩体）

ケース名	流量(cm ³ /sec)	トレーサー流速(cm/sec)
A-11	0.404	0.116
A-15	1.240	0.362
A-19	1.995	0.575
A-23	2.881	0.833
A-27	3.528	0.98
A-31	4.191	1.111

表 5.3-6 に縦方向分散長の算出結果を示す。なお、図 5.3-3 に Ogata-Banks 式とフィッティングした結果を示す。

表 5.3-6 縦方向分散長の算出結果（天然亀裂岩体）

ケース名	流量(cm ³ /sec)	縦方向分散長(cm)
A-11	0.404	21.2
A-15	1.240	16.5
A-19	1.995	16.2
A-23	2.881	19.2
A-27	3.528	17.9
A-31	4.191	19.7

表 5.3-7 に天然亀裂岩体の試験結果をまとめて示す。

表 5.3-7 試験結果まとめ（天然亀裂岩体）

ケース名	設定水頭値	動水勾配	流量	トレーサー流速	縦方向分散長
	cm	-	cm ³ /sec	cm/sec	cm
A-11	11	0.011	0.405	0.116	21.2
A-15	15	0.048	1.239	0.362	16.5
A-19	19	0.086	1.995	0.575	16.2
A-23	23	0.126	2.881	0.833	19.2
A-27	27	0.168	3.527	0.980	17.9
A-31	31	0.210	4.191	1.111	19.7

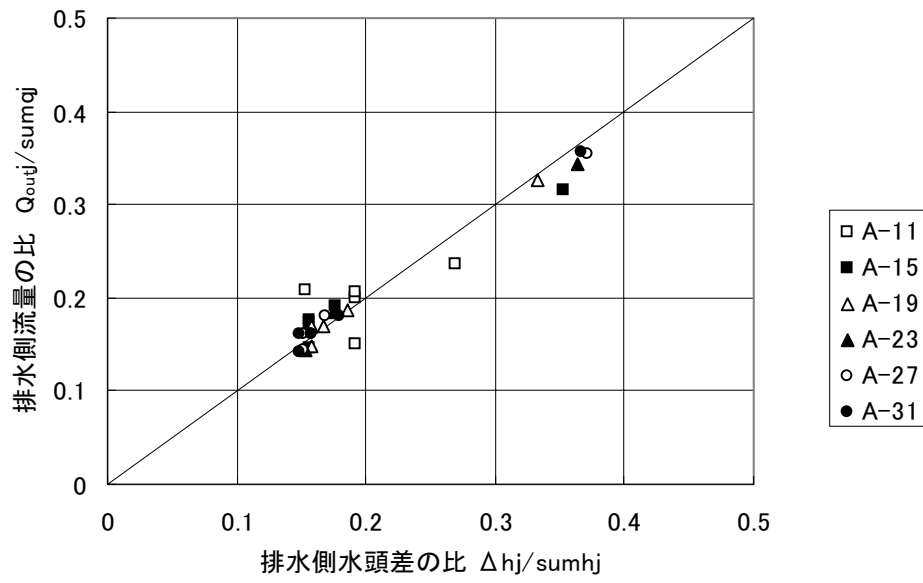
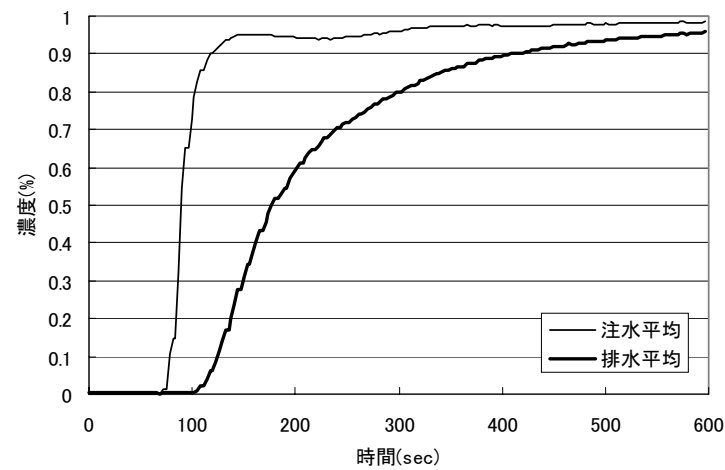
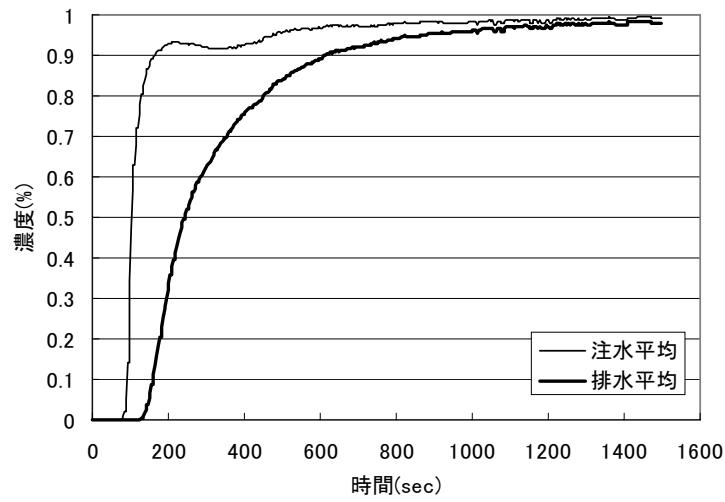
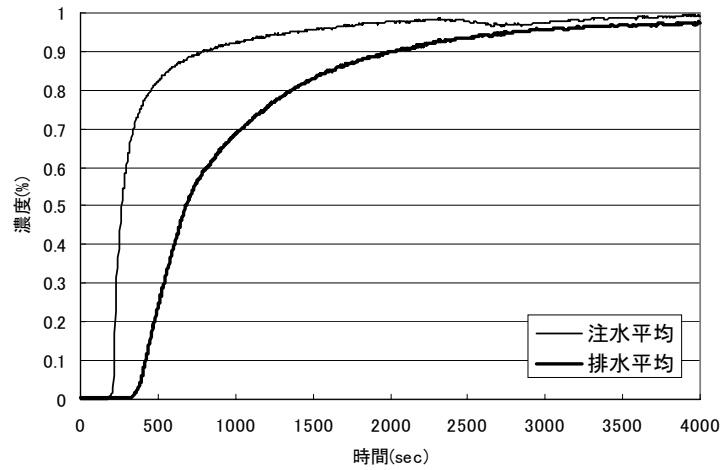


図5.3-1 排水側水頭差の比と排水側流量の比



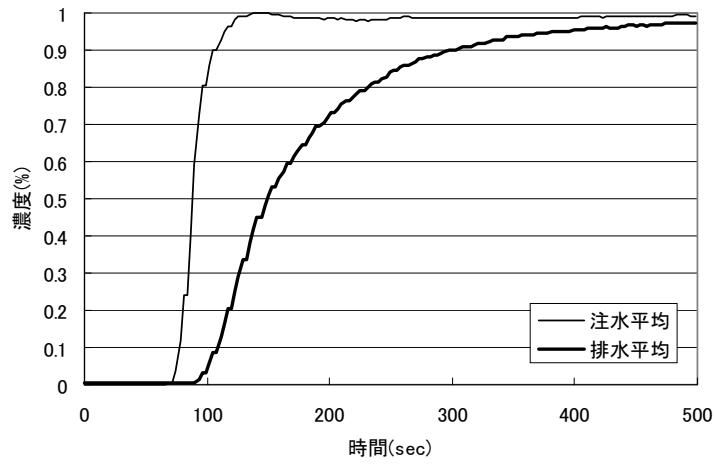


图5.3-2(d) 破過曲線(A-23)

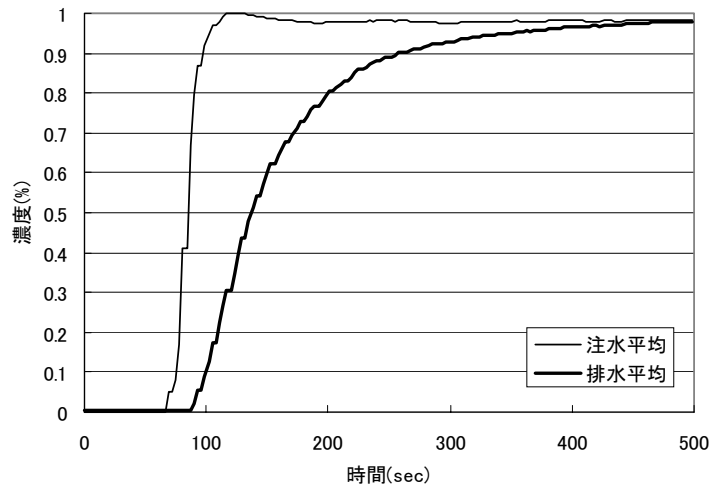


图5.3-2(e) 破過曲線(A-27)

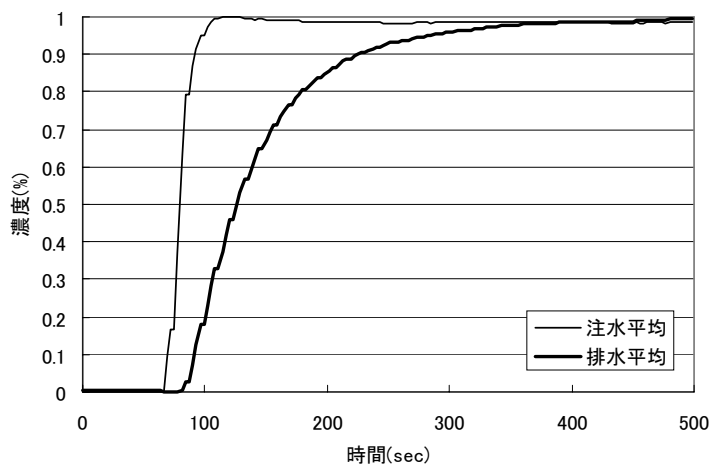


图5.3-2(f) 破過曲線(A-31)

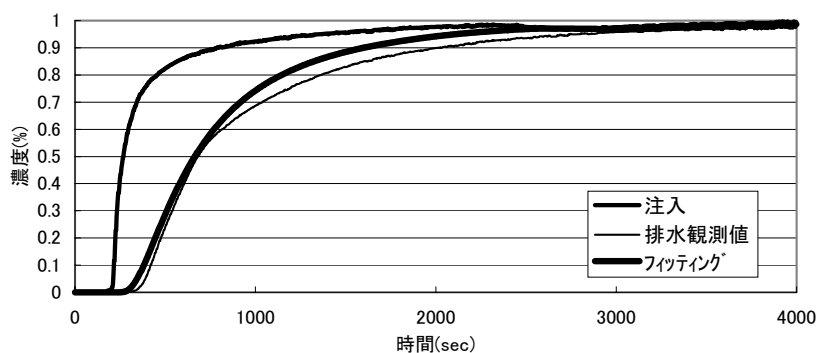


図5.3-3(a) Ogata-Banks式フィッティング結果(A-11)

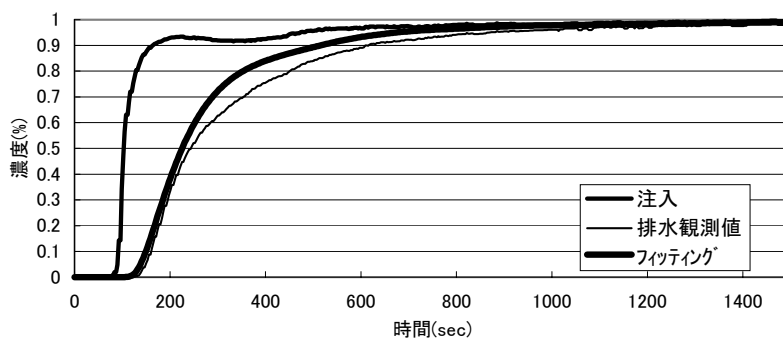


図5.3-3(b) Ogata-Banks式フィッティング結果(A-15)

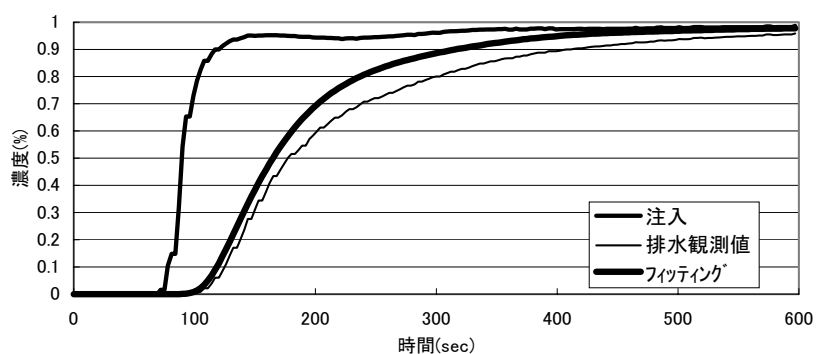


図5.3-3(c) Ogata-Banks式フィッティング結果(A-19)

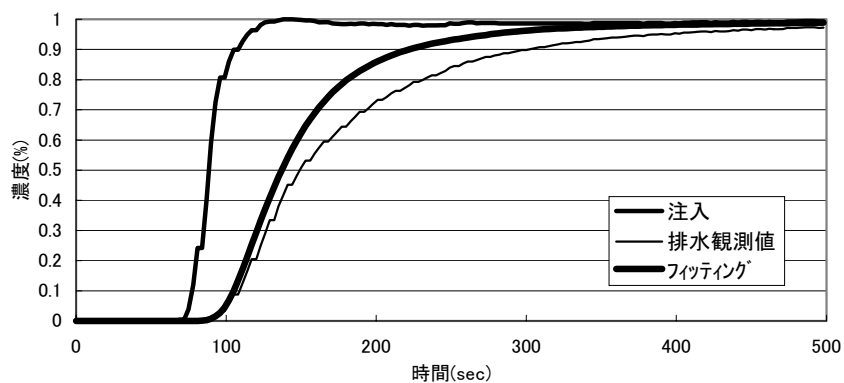


図5.3-3(d) Ogata-Banks式フィッティング結果(A-23)

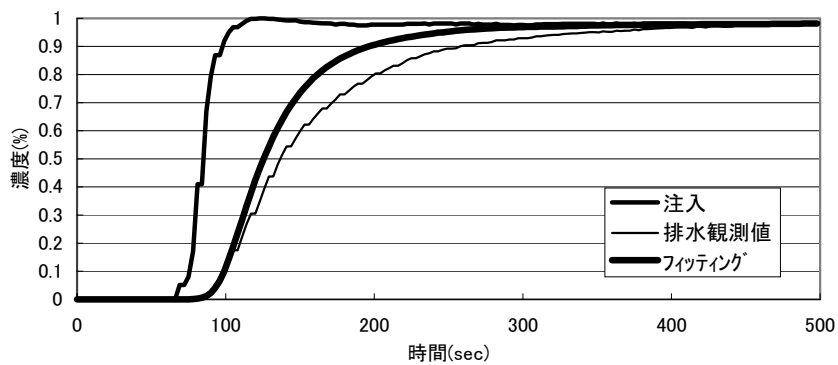


図5.3-3(e) Ogata-Banks式フィッティング結果(A-27)

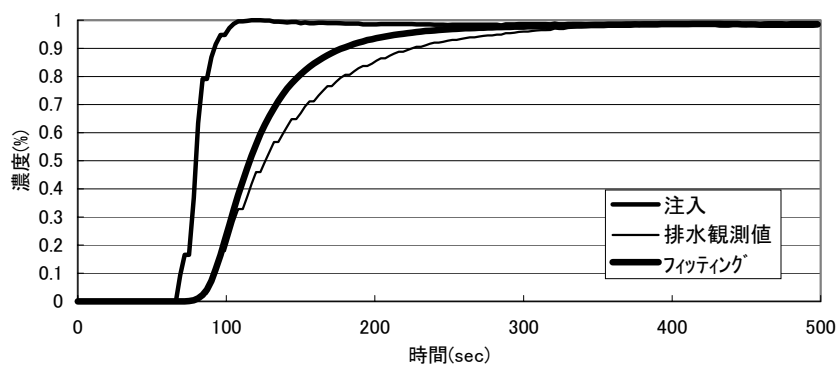


図5.3-3(f) Ogata-Banks式フィッティング結果(A-31)

5.4 考察（天然亀裂岩体）

5.4.1 透水特性に関する考察

図 5.4.1-1 に動水勾配と流量の関係を示す。動水勾配と流量の関係は若干上に凸になっているが、ほぼ比例関係にあることがわかる。すなわち、ダルシー則が成立し、天然亀裂でも平行平板と同様な考察が可能であることを示していると考えられる。今回の試験では、動水勾配が増加し、流量が増加しても亀裂内部の流路の変化は無かったものと推察できる。

図 5.4.1-2 に動水勾配と透水量係数の関係を示す。同図より、透水量係数は $0.4 \sim 0.7(\text{cm}^2/\text{sec})$ であることがわかる。動水勾配の増加に伴い若干透水量係数が減少しているが、その違いは 1 オーダー以内であり、ほぼ一定の値と考えて良いと思われる。

図 5.4.1-3 に動水勾配と水理的開口幅の関係を示す。水理的開口幅は、 $0.35\text{mm} \sim 0.45\text{mm}$ の間にあり、ほぼ一定値となっている。

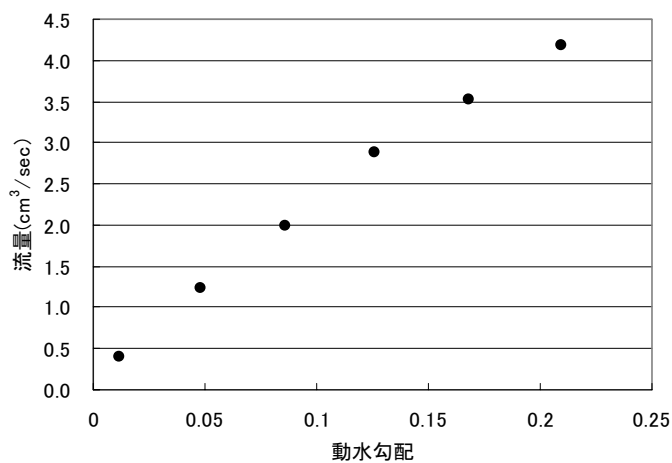


図5.4.1-1 動水勾配と流量の関係(天然亀裂岩体)

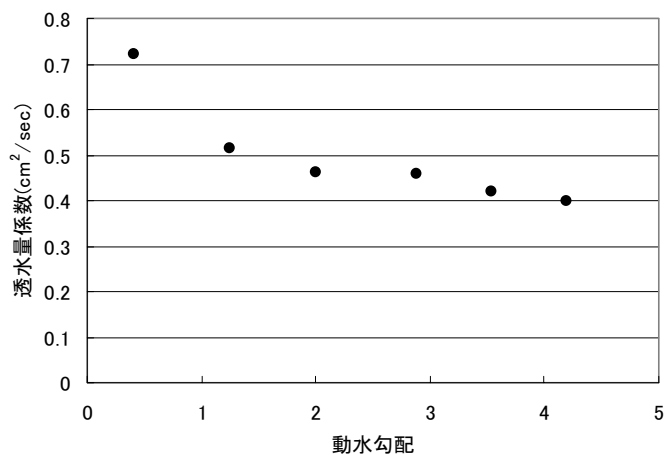


図5.4.1-2 動水勾配と透水量係数の関係(天然亀裂岩体)

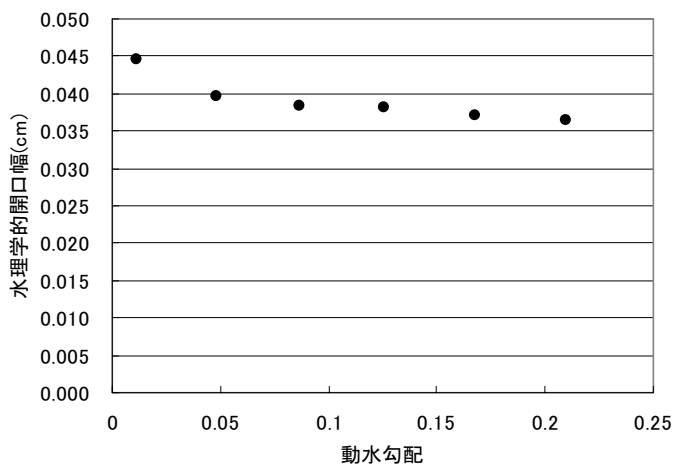


図5.4.1-3 動水勾配と水理学的開口幅の関係(天然亀裂岩体)

5.4.2 物質移行特性に関する考察

図 5.4.2-1 に動水勾配とトレーサー流速の関係を示す。動水勾配とトレーサー流速はほぼ比例関係にあり、動水勾配と流量の関係と同様の傾向にある。すなわち、動水勾配の増加に伴い、トレーサー流速が増加しても移行経路はほぼ変化していないものと推察される。

図 5.4.2-2 に動水勾配と物質移行開口幅の関係を示す。物質移行開口幅は 0.25mm～0.35mm の間にあることがわかる。

図 5.4.2-3 に動水勾配と縦方向分散長の関係を示す。縦方向分散長は、15～20cm となっている。

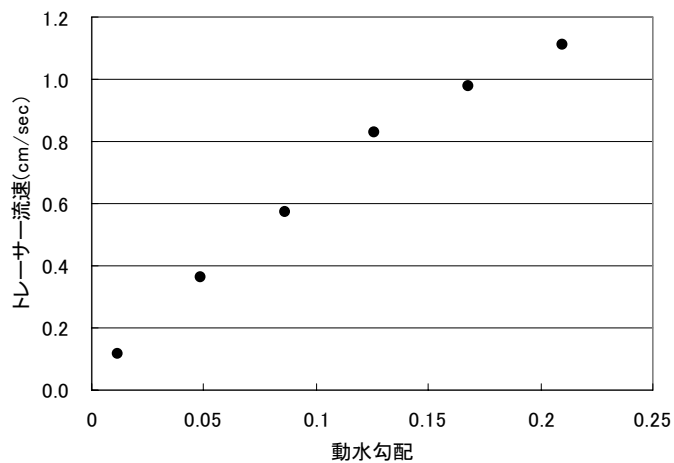


図5.4.2-1 動水勾配とトレーサー流速の関係(天然亀裂岩体)

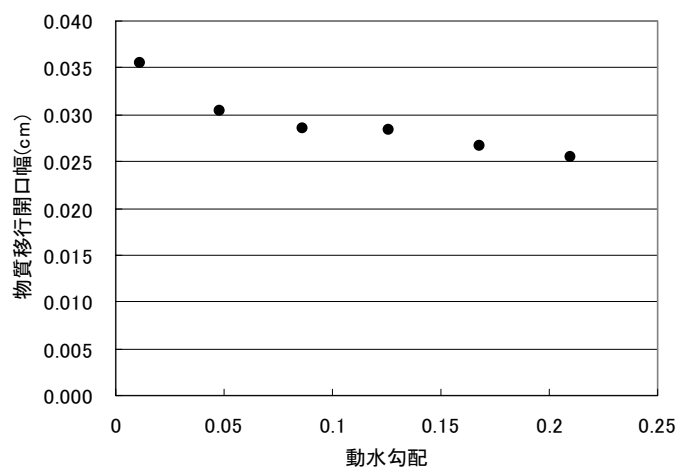


図5.4.2-2 動水勾配と物質移行開口幅の関係(天然亀裂岩体)

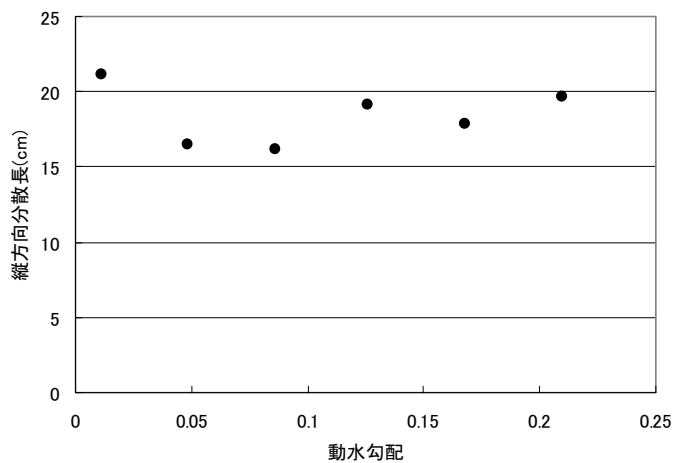


図5.4.2-3 動水勾配と縦方向分散長の関係(天然亀裂岩体)

5.4.3 水理学的開口幅と物質移行開口幅

水理学的開口幅と物質移行開口幅について検討する。ここでは、透水・トレーサー試験結果が3乗則に従うと仮定している。

図 5.4.3-1 に水理学的開口幅と物質移行開口幅の関係を示す。同図では、粘性係数に $0.01(\text{g}/(\text{sec}\cdot\text{cm}))$ 、密度に $1(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、重力加速度に $980(\text{cm}/\text{sec}^2)$ 、移行経路長に $50(\text{cm})$ 、亀裂幅に $50(\text{cm})$ の各定数を与えて、それぞれの開口幅を算出している。同図より両者は相関関係にあることがわかる。つまり、試験岩体の内部構造に変化が無ければ、水理学的開口幅と物質移行開口幅は変換可能であることを示している。また、水理学的開口幅は物質移行開口幅よりも約 0.1mm 程大きくなっていることもわかる。前章でも触れたが、水理学的開口幅(b_h)と物質移行開口幅(b_t)の大小関係は亀裂内の構造に起因するとされている⁵⁾。 $b_t > b_h$ の場合には流れ方向の開口幅変化よりも流れに垂直な方向の開口幅変化の方が大きくなり、 $b_h > b_t$ の場合には流れ方向に垂直な開口幅変化よりも流れ方向の開口幅変化の方が大きくなるとされている。この大小関係は亀裂表面の特性因子にも影響を受けるため断定は出来ないが、今回の試験岩体は、流れ方向に垂直な開口幅変化よりも流れ方向の開口幅変化の方が大きくなっている可能性がある。これについては、今後実施されるレジン材注入法による開口幅測定結果により検証したい。

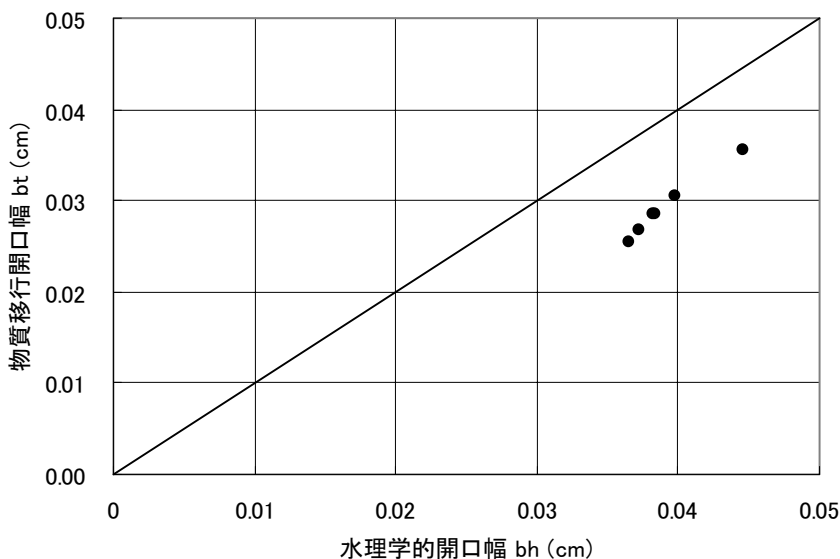


図5.4.3-1 水理学的開口幅と物質移行開口幅の関係 (天然亀裂岩体)

5.4.4 亀裂の不均質性の概略評価

亀裂不均質性の概略評価のために、排水側のトレーサーのマスフラックスに着目して考察する。

図 5.4.4-1 に各注水ポートから注水した時の排水ポート別定常時のマスフラックスを示す。概略的な傾向として、

- ①注水ポート 1 から注入されたトレーサーは、ほとんどが排水ポート 1 から排出されている。
- ②注水ポート 2～4 から注入されたトレーサーは、排水ポート 1～4 にほぼ均等に流れている。
- ③注水ポート 5 から注入されたトレーサーは、ほとんどが排水ポート 5 から排出されている。

ことがわかる。すなわち、トレーサーの流れとしては、①注水ポート 1 から注入した場合、②注水ポート 2～4 から注入した場合、③注水ポート 5 から注入した場合の 3 種類に分類でき、亀裂の不均質性を示唆していると考えられる。

図 5.4.4-2 に排水ポート別の定常時の濃度を示す。マスフラックスは濃度に流量を乗じて算出されるため、本来、図 5.4.4-1 と図 5.4.4-2 の傾向は等しくはない場合があるはずである。しかし、両図を比較すると、ほぼ等しい傾向を有していることがわかる。これは、流量の相違に比べて濃度の相違の比率が大きいためと考えられる。すなわち、マスフラックスの概略的な傾向と濃度の概略的な傾向はほぼ等しいと考えることができる。

試験岩体内濃度センサーでは流量が計測できないため、上記の仮定をもとに濃度での考察を行った。図 5.4.4-3 に定常時の試験岩体内部の濃度状態を示す。図は試験岩体の上面から亀裂を見ている。各円の直径は濃度を表しており、最も大きい円が約 1%濃度を示している。以下に各図から得られる知見を列挙する。

・注水ポート 1 からの注入：

注水ポート 1 から注入されたトレーサーは、ほとんどが排水ポート 1 から排出されている。試験岩体内の濃度孔にはほとんど変化が無く、注水ポート 1 と試験岩体内濃度孔とは連結していない可能性がある。

・注水ポート 2～4 からの注入：

注水ポート 2～4 からの注入では、試験岩体内の濃度変化はほぼ同様の傾向にある。つまり、注水ポート 2～4 から注入されたトレーサーはほぼ同じ経路を流れ、排出されていると考えられる。傾向としては注水ポート 2～4 から注入されたトレーサーは亀裂を上面から見てやや左部分を選択的に流れているように見える。

・注水ポート 5 からの注入：

注水ポート5からの注入では、亀裂を上面から見て右側の内部センサーが大きく反応している。このことより、注水ポート5から注入されたトレーサーは亀裂の中央付近を通過

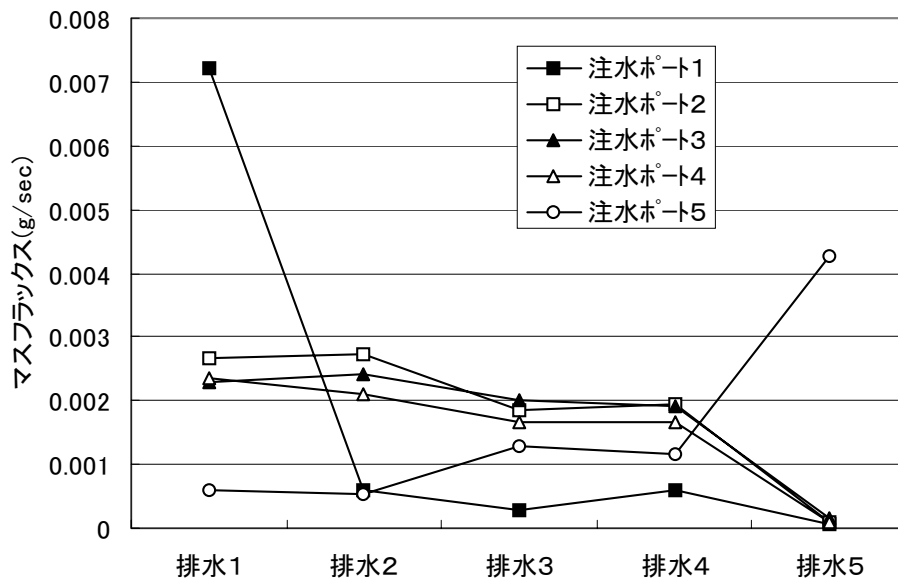


図5.4.4-1 排水ポート別の定常時のマスフラックス(天然亀裂岩体)

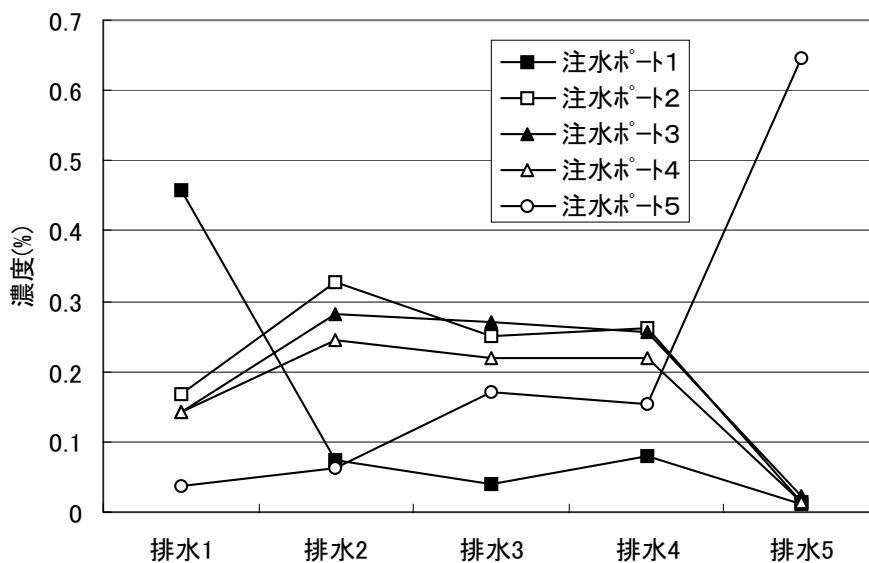


図5.4.4-2 排水ポート別の定常時の濃度(天然亀裂岩体)

し、排水ポート5から排出されていると考えられる。

5.5 天然亀裂岩体を使用した透水・トレーサー試験結果のまとめ

透水特性に関する考察より、天然亀裂でもダルシー則が成立し、透水量係数が約 0.4～0.7(cm²/sec)であることを確認した。水理的開口幅は、0.35mm～0.45mm の間にあった。

物質移行特性に関する考察より、動水勾配とトレーサー流速はほぼ比例関係にあり、物質移行開口幅は 0.25mm～0.35mm の間にあったことを確認した。縦方向分散長は、15～20cm となっていた。

水理的開口幅と物質移行開口幅は、相関関係にあるが、水理的開口幅は物質移行開口幅よりも約 0.1mm 程大きくなっていた。今回の試験岩体は流れ方向に垂直な方向の開口幅変化よりも流れに沿った方向の開口幅変化の方が大きくなっている可能性があった。

亀裂の不均質性の概略評価より、トレーサーの流れとしては①注水ポート 1 から注入した場合、②注水ポート 2～4 から注入した場合、③注水ポート 5 から注入した場合の 3 種類に分類できることを確認した。また、試験岩体内における各ポートから流れたトレーサー流路の概略的な傾向も把握できた。

6. 応力依存性試験

6.1 応力依存性試験の概要

応力依存性試験で使用した試験岩体は、天然亀裂岩体であり、5. で使用したものと全く同じものである。なお、応力依存性試験で使用した変位計の配置等については2.3 応力負荷装置の節に詳述している。図6.1-1 に応力依存性試験の手順を示す。

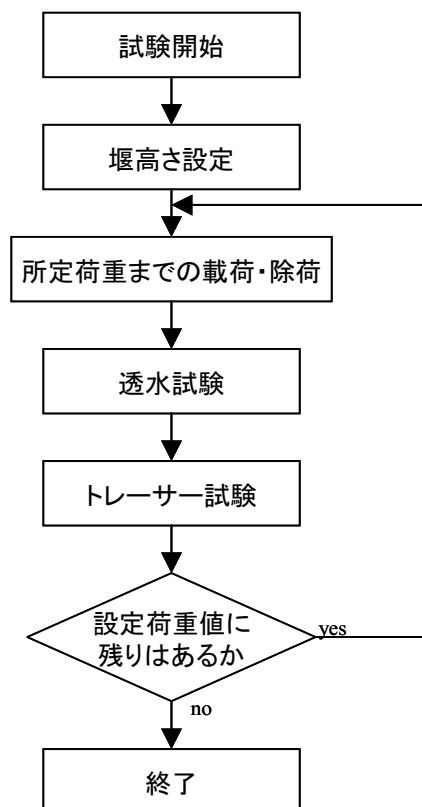


図 6.1-1 応力依存性試験手順

6.2 試験ケース（応力依存性試験）

表 6.2-1 に試験ケースを示す。試験は全て設定水頭値 31cm で行い、各ケース群中の設定荷重値ごとに透水・トレーサー試験を実施した。

表 6.2-1 試験ケース（応力依存性試験）

ケース群	ケース名	設定垂直荷重	設定垂直応力	設定水頭差	荷重状態
		kN	MPa	cm	
S3 群	S3-1	0	0	31	無負荷
	S3-2	29.4	0.118	31	載荷
	S3-3	58.8	0.235	31	載荷
	S3-4	88.2	0.353	31	載荷
	S3-5	58.8	0.235	31	除荷
	S3-6	29.4	0.118	31	除荷
	S3-7	0	0	31	無負荷
S5 群	S5-1	0	0	31	無負荷
	S5-2	49	0.196	31	載荷
	S5-3	98	0.392	31	載荷
	S5-4	147	0.588	31	載荷
	S5-5	98	0.392	31	除荷
	S5-6	49	0.196	31	除荷
	S5-7	0	0	31	無負荷

6.3 試験結果（応力依存性試験）

表 6.3-1 に試験結果を示す。

表 6.3-1 応力依存性試験結果

	垂直応力	動水勾配	流量	平均変位量	平均流速	透水量係数	水理学的開口幅	物質移行開口幅	縦方向分散長
	MPa	-	cm ³ /sec	cm	cm/sec	cm ² /sec	cm	cm	cm
S3-1	0.000	0.1024	3.3846	0.00000	0.75368	0.66105	0.04326	0.00903	16.3
S3-2	0.118	0.1084	3.3474	0.00278	0.76081	0.61760	0.04229	0.00886	17.0
S3-3	0.235	0.1128	3.3244	0.00415	0.80463	0.58943	0.04164	0.00918	17.7
S3-4	0.353	0.1144	3.3108	0.00535	0.79619	0.57881	0.04138	0.00902	17.1
S3-5	0.235	0.1140	3.3452	0.00485	0.75430	0.58687	0.04158	0.00856	17.2
S3-6	0.118	0.1120	3.3765	0.00360	0.75969	0.60294	0.04195	0.00870	17.2
S3-7	0.000	0.1048	3.4580	0.00068	0.75368	0.65992	0.04323	0.00892	16.8
S5-1	0.000	0.1012	3.3470	0.00000	0.71448	0.66146	0.04327	0.00861	15.7
S5-2	0.196	0.1096	3.2798	0.00358	0.77713	0.59850	0.04185	0.00900	15.0
S5-3	0.392	0.1136	3.2278	0.00558	0.73357	0.56827	0.04113	0.00834	16.4
S5-4	0.588	0.1196	3.2279	0.00723	0.79872	0.53978	0.04043	0.00885	15.9
S5-5	0.392	0.1160	3.2646	0.00655	0.76994	0.56286	0.04100	0.00867	15.8
S5-6	0.196	0.1120	3.3102	0.00495	0.76157	0.59111	0.04167	0.00872	15.6
S5-7	0.000	0.1036	3.4202	0.00085	0.71319	0.66027	0.04324	0.00849	15.2

6.4 考察（応力依存性試験）

6.4.1 垂直応力と変位の関係

垂直応力と変位の関係を図 6.4.1-1 に示す。同図よりヒステリシスが認められる。すなわち、岩盤の応力状態と水理特性について検討する際には、応力状態がどのような状態にあるかを考慮する必要があることを示していると考えられる。

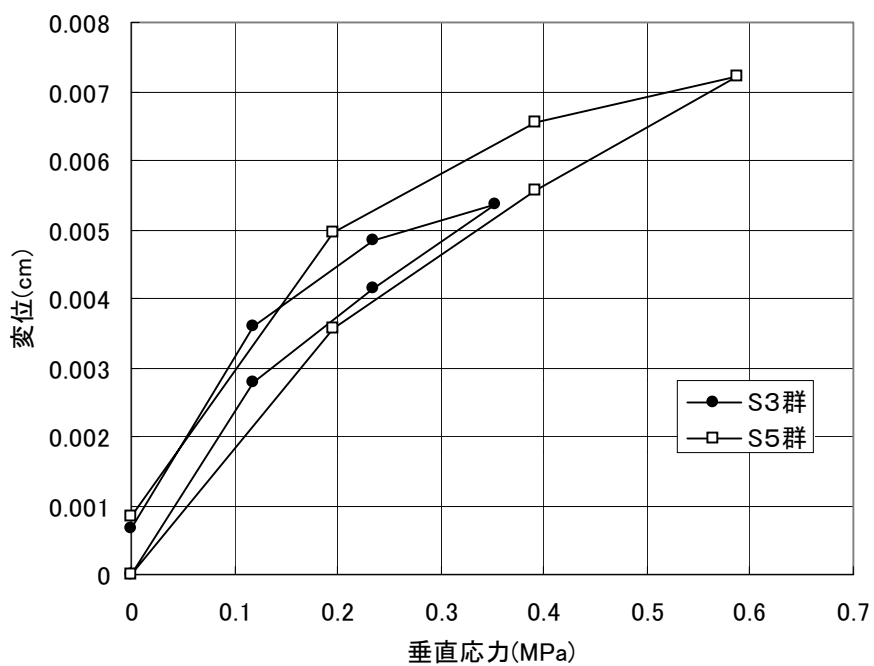


図6.4.1-1 垂直応力と変位の関係(応力依存性試験)

6.4.2 垂直応力と透水量係数の関係

図 6.4.2-1 に垂直応力と透水量係数の関係を示す。垂直応力が大きくなると透水量係数が若干小さくなる傾向にある。これは亀裂内の閉塞により透水性が減少しているためと考えられる。また、それぞれの群では、垂直応力の値が等しければほぼ同じ透水量係数を示している。垂直応力と変位の関係からはヒステリシスが認められたが、内部の透水量係数に影響を及ぼしていないことがわかる。このことより、測定された変位を亀裂内閉塞量と仮定して水理特性を論じることは適当ではないと考えられる。

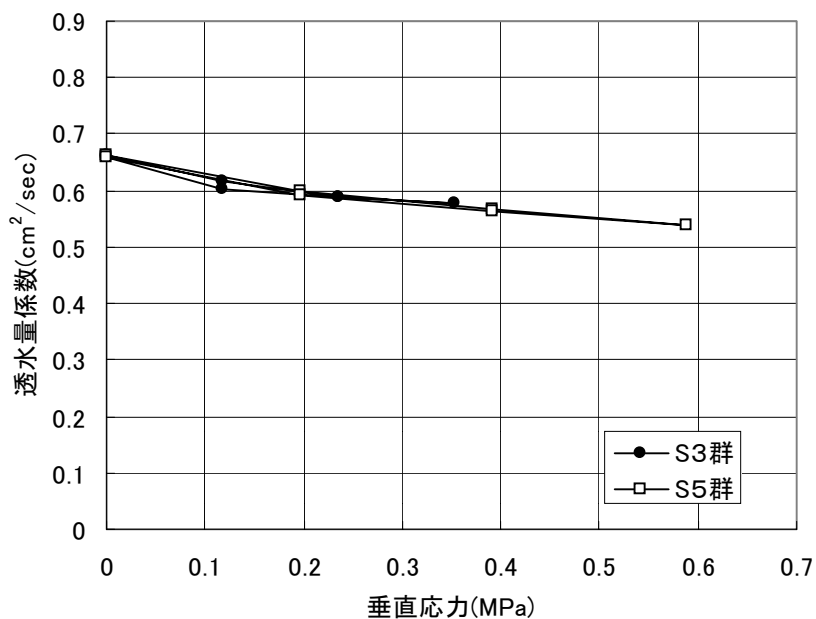


図6.4.2-1 垂直応力と透水量係数の関係(応力依存性試験)

6.4.3 垂直応力と開口幅（水理的・物質移行）の関係

図 6.4.3-1 と図 6.4.3-2 にそれぞれ垂直応力と水理的開口幅，垂直応力と物質移行開口幅の関係を示す。両図の縦軸のスケールは比較を容易にするために同一にしてある。垂直応力の増大とともに水理的開口幅がやや小さくなっており，ほぼ線形の関係にあることがわかる。一方，物質移行開口幅は同定された値のばらつきの範囲において垂直応力の影響は確認できない。

以上より，垂直応力の増大に伴い亀裂が閉塞され，透水性は減少しているが，それはトレーサー流速に大きく影響を及ぼすことはなかったと考えられる。

また 5.4.2 の考察と同様に，水理的開口幅より物質移行開口幅は小さく，その大小関係は今回の垂直応力ではほぼ変化していない。しかし垂直応力の増大が水理的開口幅と物質移行開口幅に与える影響は異なっている。水理的開口幅と物質移行開口幅の大小関係は，流れに平行な開口幅変化と流れに垂直な開口幅変化の比率に関係している⁵⁾ことから，垂直応力の増大に伴い，流れに平行な開口幅変化と流れに垂直な開口幅変化の割合が変化した可能性がある。

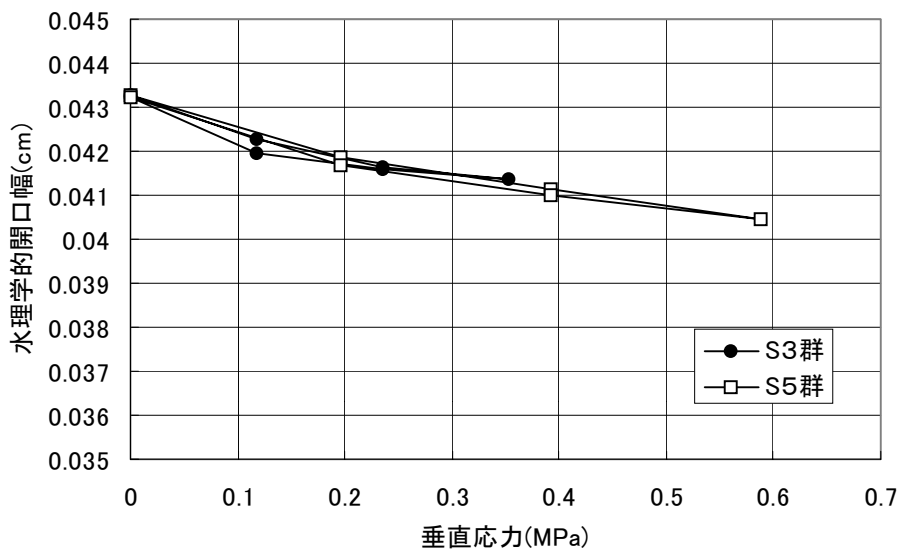


図6.4.3-1 垂直応力と水理学的開口幅の関係(応力依存性試験)

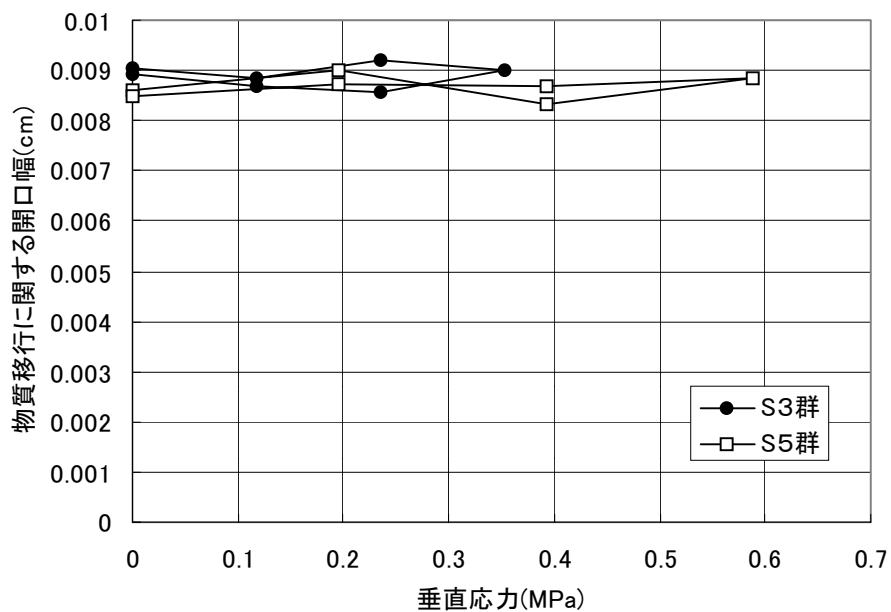


図6.4.3-2 垂直応力と物質移行開口幅の関係(応力依存性試験)

6.4.4 垂直応力と縦方向分散長の関係

図 6.4.4-1 に垂直応力と縦方向分散長の関係を示す。同図より、垂直応力が增大しても、縦方向分散長にはほとんど変化が無いことがわかる。測定精度に問題があるとも考えられるが、垂直応力が增大して亀裂開口幅が減少しても物質移行の分散にはほとんど影響が無いことを表している。

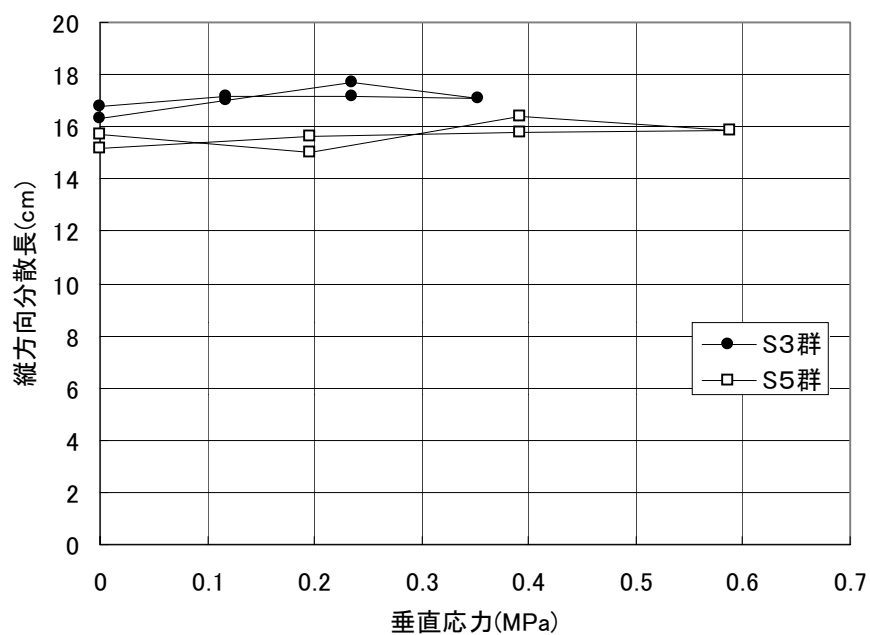


図6.4.4-1 垂直応力と縦方向分散長の関係(応力依存性試験)

6.4.5 初期開口幅と亀裂表面特性因子の推定

ここでは、対象亀裂の初期開口幅と亀裂表面特性因子 (fracture surface characteristic factor) を推定する。修正3乗則より、亀裂閉塞量を考慮すると式(6.4.5-1)が成立する⁴⁾。

$$Q = \frac{\rho g}{12\mu f} (b_0 - d)^3 W \cdot I \quad (6.4.5-1)$$

ただし、 Q ：流量、 ρ ：密度、 g ：重力加速度、 μ ：粘性係数、 f ：亀裂表面特性因子、 b_0 ：初期開口幅、 d ：亀裂閉塞量、 W ：亀裂幅、 I ：動水勾配である。

今、 $d=d_1$ のとき $Q=Q_1, I=I_1$ 、 $d=d_2$ のとき $Q=Q_2, I=I_2$ とすると式(6.4.5-2)、式(6.4.5-3)が成立する。

$$Q_1 = \frac{\rho g}{12\mu f} (b_0 - d_1)^3 W \cdot I_1 \quad (6.4.5-2)$$

$$Q_2 = \frac{\rho g}{12\mu f} (b_0 - d_2)^3 W \cdot I_2 \quad (6.4.5-3)$$

式(6.4.5-2)、式(6.4.5-3)より、式(6.4.5-4)が成り立つ。

$$f = \frac{\rho g W}{12\mu} \frac{(-d_1 + d_2)^3}{\left[\left(\frac{Q_1}{I_1} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Q_2}{I_2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^3} \quad (6.4.5-4)$$

このとき、初期開口幅は式(6.4.5-5)で表される。

$$b_0 = \left(\frac{12\mu f}{\rho g} \frac{Q_1}{W \cdot I_1} \right)^{\frac{1}{3}} + d_1 \quad (6.4.5-5)$$

ここでは、式(6.4.5-4)、式(6.4.5-5)を用いて亀裂表面特性因子と初期開口幅を推定した。なお、推定に際しては、 $d_1=0$ のときの Q_1 として無負荷時のデータを使用した。推定された亀裂表面特性因子と初期開口幅を表 6.4.5-1 に示す。表 6.4.5-1 より、亀裂表面特性因子は約 15~30、初期開口幅は約 1~1.3mm であることがわかる。

表 6.4.5-1 推定された亀裂表面特性因子と初期開口幅

	垂直応力(MPa)	亀裂表面特性因子	初期開口幅(cm)
S3-1	0.000	—	—
S3-2	0.118	23.48	0.1239
S3-3	0.235	16.74	0.1107
S3-4	0.353	23.28	0.1235
S3-5	0.235	23.95	0.1247
S3-6	0.118	20.92	0.1192
S3-7	0.000	—	—
S5-1	0.000	—	—
S5-2	0.196	16.31	0.1097
S5-3	0.392	18.02	0.1134
S5-4	0.588	16.72	0.1106
S5-5	0.392	24.43	0.1255
S5-6	0.196	30.59	0.1353
S5-7	0.000	—	—

6.5 応力依存性試験のまとめ

応力依存性試験より以下の知見が得られた。

- ①垂直応力と変位の関係より、岩盤の応力状態と水理特性について検討する際には、応力状態がどのような状態にあるかを測定する必要があることが判明した。
- ②垂直応力と透水量係数の関係より、測定誤差の影響も考慮する必要があるが、変位から水理特性を論じることは適当ではないことがあると考えられる。
- ③垂直応力と開口幅（水理的・物質移行）の関係より、天然亀裂の場合、透水特性に関係している領域よりも物質移行に関係している領域が極めて小さいと考えられた。
- ④垂直応力が増大しても縦方向分散長はほとんど変化しないことが明らかとなった。ただし、これは測定誤差も考慮した検討が必要となる。
- ⑤亀裂表面特性因子と初期開口幅を推定することが可能となり、亀裂表面特性因子は約 15～30、初期開口幅は約 1～1.3mm であることが判明した。

7. おわりに

LABROCK では天然亀裂の透水・物質移行特性の詳細な把握と垂直応力—透水特性の連成問題の解明を目的として以下の試験段階を設定している。

第1段階：垂直応力無負荷状態での透水・トレーサー試験

第2段階：垂直応力負荷状態での透水・トレーサー試験

第3段階：レジン材注入法による開口幅測定

平成13年度までの研究では、上記第2段階までが終了しており、以下の知見が得られた。

第1段階では、天然岩体亀裂の水理的開口幅、物質移行開口幅、縦方向分散長の値を算出しており、亀裂の不均質性についても概略評価を行った。

第2段階では、垂直応力と透水量係数等の各物性値との関係について明らかとした上で、亀裂表面の特性因子や亀裂の初期開口幅の算出方法を提案した。

第3段階は平成14年度以降に実施する予定であり、今後実施される予定のレジン材による開口幅測定では、亀裂岩体内を出来るだけ詳細に計測し、そこで得られた開口幅のデータは物質移行解析に使用する予定である。計測された開口幅データを基に物質移行解析を実施し、天然岩体亀裂の透水・物質移行特性等を説明できるような亀裂内のモデルを構築することができれば、天然バリアの長期性能評価の基礎資料として本研究は重要な地位を占めると考えている。

・参考文献

- 1)核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊1 わが国の地質環境, III-8～III20, (1999), JNC TN1400 99-021
- 2)Y.W.Tsang and Witherspoon: Hydromechanical Behavior of a Deformable Rock Fracture Subject to Normal Stress, *Journal of Geophysical Research*, Vol.86, No.B10, pp9287-9298,(1981)
- 3)Akio Ogata, R.B.Banks : A solution of difference equation of longitudinal dispersion in porous media, *Geological survey professional paper 411-A*,(1961)
- 4)P.A.Witherspoon, J.S.Y.Wang, K.Iwai, J.E,Gale : Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture, *Water Resources Research*, vol.16,No.6, pp1016-1024,(1980)
- 5)S.E.Silliman : An Interpretation of the differences between aperture estimates derived from hydraulic and tracer in single fracture, *Water Resources Research*, vol.25, No.10, pp2275-2283, (1989)
- 6)核燃料サイクル開発機構：亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)用試験岩体の切り出し・整形, サイクル機構技術報告, (2001), JNC TN8410 2001-015
- 7) 核燃料サイクル開発機構：LABROCK 用透水性キャリブレーション岩体の採取, サイクル機構技術報告, (2001), JNC TN8410 2001-016