

高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験 2

NETBLOCK 試験報告

(技術報告)

2003 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)
2003

高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験 2
-NETBLOCK 試験報告-
(試験報告)

鐵桂一*1)、澤田淳*2)

要旨

高レベル放射性廃棄物などの地層処分の安全性を評価するため、天然バリア内の核種移行解析が行われている。花崗岩などの亀裂性岩盤を対象とした場合の核種移行解析には、個々の亀裂を均質な平行平板や一次元チャンネルで近似したモデルが、一般的に用いられる。しかし実際には、亀裂の分岐や交差などによる亀裂内空隙構造の不均質性が、地下水の流れや核種の移行現象に影響を与えている。したがって、核種移行解析モデルの妥当性や信頼性を示すためには、亀裂交差部の水理的特性を把握する必要がある。

本試験は亀裂交差部に沿った方向の透水特性の把握を目的として、Y字に交差した天然亀裂を持つ花崗岩を用いて透水試験を行った。亀裂内部の評価にはダルシー則より求まる透水量係数を用い、亀裂交差部とそれ以外の場所の透水量係数を比較した。

試験結果より、今回試験に用いた岩体では、亀裂交差部に沿った方向の透水量係数が最も大きいことが分かった。また、注水と排水の位置を変えた透水試験を46ケース行い、データの充実を図ることができた。

*1) 検査開発株式会社

*2) 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

Water permeability test of Rock Specimen with natural fractures
using high viscosity liquid 2
(Testing Document)

Keiichi Tetsu*¹⁾、 Atsushi Sawada*²⁾

Abstract

Nuclide migration analysis in natural barrier is performed to evaluate the safety of geological disposal system of the high-level radioactive wastes. Generally the model which approximated each fractures by the homogeneous parallel plate or the 1-dimensional channel is used for the nuclide migration analysis of host rocks of fractured media, such as granite. However in fact, the heterogeneity has affected the flow in groundwater and the nuclide migration phenomenon in the fracture junctions, fracture intersections etc. Therefore we must grasp the hydraulic characteristics within the fractures intersection, to demonstrate propriety and reliability of the nuclide migration analysis models.

This study conducted the water permeability test using granite with natural Y-type fracture intersection, aiming at the grasp of the permeability characteristics along fractures intersection. The evaluation of rock fracture used transmissivity coefficient which can be found from Darcy's law, and we compared the transmissivity coefficient in the fracture intersection and the other place.

The test result showed that the transmissivity coefficient along fracture intersection was the largest in the rock block. We conducted water permeability test at 46 cases which changed combination of injection and draining, and abundant examination data was collected.

*1) Inspection Development Corporation

*2) Waste Isolation Research Division, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute

目次

1	はじめに	1
2	試験方法	2
2.1	測定原理	2
2.1.1	ダルシー則、三乗則	2
2.1.2	液温と粘性係数の関係	3
2.2	測定手順	4
2.3	使用装置	6
2.4	測定条件	11
2.4.1	亀裂面全体を対象とした透水試験	11
2.4.2	対面するセル間の透水試験	14
2.4.3	亀裂交差部と同一流路長セル間の透水試験	16
3	試験結果	18
3.1	亀裂面全体を対象とした透水試験結果	18
3.2	対面するセル間の透水試験結果	28
3.3	亀裂交差部と同一流路長セル間の透水試験結果	41
4	考察	52
4.1	高粘性流体の液温と粘性係数の関係	52
4.2	透水量係数、亀裂開口幅の計算	54
5	おわりに	64
	参考文献	65
	appendix 高粘性流体透水試験デジタルデータ(Excel ファイル)	

表目次

表 2.4-1	亀裂面全体を対象とした透水試験組み合わせ	11
表 2.4-2	対面するセル間の透水試験組み合わせ	14
表 2.4-3	亀裂交差部と同一流路長セル間の透水試験組み合わせ	16
表 3.1-1	水頭差と流量の傾き(亀裂面全体)	19
表 3.2-1	水頭差と流量の傾き(対面するセル間)	29
表 3.3-1	水頭差と流量の傾き(亀裂交差部と同一流路長セル間)	42
表 4.2-1	水に換算した透水量係数(亀裂面全体)	55
表 4.2-2	水に換算した透水量係数(対面するセル間)	56
表 4.2-3	水に換算した透水量係数(亀裂交差部と同一流路長セル間)	56
表 4.2-4	亀裂開口幅(亀裂面全体)	57
表 4.2-5	亀裂開口幅(対面するセル間)	58
表 4.2-6	亀裂開口幅(亀裂交差部と同一流路長セル間)	58

図目次

図 2.2-1	透水試験概略図	-----	4
図 2.3-1	岩体亀裂展開図	-----	6
図 2.3-2	止水板外観図	-----	7
図 2.3-3	止水板取り付け状況	-----	8
図 2.3-4	各注排水セルと亀裂の位置関係	-----	9
図 2.3-5	主要なセルと亀裂面の関係図	-----	9
図 2.3-6	マノメータ外観図	-----	10
図 2.4-1	透水試験組み合わせ(ケース 1-1,1-2)	-----	12
図 2.4-2	透水試験組み合わせ(ケース 1-3,1-4)	-----	12
図 2.4-3	透水試験組み合わせ(ケース 1-5,1-6)	-----	12
図 2.4-4	透水試験組み合わせ(ケース 1-7,1-8)	-----	13
図 2.4-5	透水試験組み合わせ(ケース 1-9,1-10)	-----	13
図 2.4-6	透水試験組み合わせ(ケース 1-11,1-12)	-----	13
図 2.4-7	透水試験組み合わせ(ケース 2-1,2-2,2-5,2-6,2-9,2-10)	-----	14
図 2.4-8	透水試験組み合わせ(ケース 2-3,2-4,2-7,2-8)	-----	15
図 2.4-9	透水試験組み合わせ(ケース 2-11~2-14)	-----	15
図 2.4-10	透水試験組み合わせ(ケース 2-15~2-18)	-----	15
図 2.4-11	透水試験組み合わせ(ケース 3-1~3-4,3-7,3-8)	-----	16
図 2.4-12	透水試験組み合わせ(ケース 3-5,3-6,3-11,3-12,3-15,3-16)	-----	17
図 2.4-13	透水試験組み合わせ(ケース 3-9,3-10,3-13,3-14)	-----	17
図 3.1-1	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-1)	-----	20
図 3.1-2	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-2)	-----	20
図 3.1-3	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-3)	-----	21
図 3.1-4	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-4)	-----	21
図 3.1-5	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-5)	-----	22
図 3.1-6	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-6)	-----	22
図 3.1-7	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-7)	-----	23
図 3.1-8	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-8)	-----	23
図 3.1-9	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-9)	-----	24
図 3.1-10	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-10)	-----	24
図 3.1-11	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-11)	-----	25
図 3.1-12	注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-12)	-----	25
図 3.1-13	水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-1,1-2)	-----	26

図 3.1-14	水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-3,1-4)	-----	26
図 3.1-15	水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-5,1-6)	-----	26
図 3.1-16	水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-7,1-8)	-----	27
図 3.1-17	水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-9,1-10)	-----	27
図 3.1-18	水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-11,1-12)	-----	27
図 3.2-1	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-1)	-----	30
図 3.2-2	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-2)	-----	30
図 3.2-3	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-3)	-----	31
図 3.2-4	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-4)	-----	31
図 3.2-5	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-5)	-----	32
図 3.2-6	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-6)	-----	32
図 3.2-7	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-7)	-----	33
図 3.2-8	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-8)	-----	33
図 3.2-9	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-9)	-----	34
図 3.2-10	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-10)	-----	34
図 3.2-11	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-11)	-----	35
図 3.2-12	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-12)	-----	35
図 3.2-13	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-13)	-----	36
図 3.2-14	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-14)	-----	36
図 3.2-15	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-15)	-----	37
図 3.2-16	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-16)	-----	37
図 3.2-17	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-17)	-----	38
図 3.2-18	対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-18)	-----	38
図 3.2-19	水頭差と流量の関係(ケース 2-1,2-2,2-5,2-6,2-9,2-10)	-----	39
図 3.2-20	水頭差と流量の関係(ケース 2-3,2-4,2-7,2-8)	-----	39
図 3.2-21	水頭差と流量の関係(ケース 2-11~2-14)	-----	40
図 3.2-22	水頭差と流量の関係(ケース 2-15~2-18)	-----	40
図 3.3-1	亀裂交差部の水頭差と流量の関係(ケース 3-1)	-----	43
図 3.3-2	亀裂交差部の水頭差と流量の関係(ケース 3-2)	-----	43
図 3.3-3	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-3)	----	44
図 3.3-4	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-4)	----	44
図 3.3-5	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-5)	----	45
図 3.3-6	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-6)	----	45
図 3.3-7	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-7)	----	46
図 3.3-8	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-8)	----	46

図 3.3-9	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-9)	----	47
図 3.3-10	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-10)	--	47
図 3.3-11	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-11)	--	48
図 3.3-12	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-12)	--	48
図 3.3-13	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-13)	--	49
図 3.3-14	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-14)	--	49
図 3.3-15	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-15)	--	50
図 3.3-16	亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-16)	--	50
図 3.3-17	水頭差と流量の関係(ケース 3-1 ~ 3-4,3-7,3-8)	-----	51
図 3.3-18	水頭差と流量の関係(ケース 3-5,3-6,3-11,3-12,3-15,3-16)	-----	51
図 3.3-19	水頭差と流量の関係(ケース 3-9,3-10,3-13,3-14)	-----	51
図 4.1-1	高粘性流体(0.2wt%)の温度と粘性係数の関係	-----	52
図 4.2-1	水に換算した透水量係数(ケース 1-1,1-2)	-----	59
図 4.2-2	水に換算した透水量係数(ケース 1-3,1-4)	-----	59
図 4.2-3	水に換算した透水量係数(ケース 1-5,1-6)	-----	59
図 4.2-4	水に換算した透水量係数(ケース 1-7,1-8)	-----	60
図 4.2-5	水に換算した透水量係数(ケース 1-9,1-10)	-----	60
図 4.2-6	水に換算した透水量係数(ケース 1-11,1-12)	-----	60
図 4.2-7	水に換算した透水量係数(ケース 2-1,2-2,2-5,2-6,2-9,2-10)	-----	61
図 4.2-8	水に換算した透水量係数(ケース 2-3,2-4,2-7,2-8)	-----	61
図 4.2-9	水に換算した透水量係数(ケース 2-11 ~ 2-14)	-----	62
図 4.2-10	水に換算した透水量係数(ケース 2-15 ~ 2-18)	-----	62
図 4.2-11	水に換算した透水量係数(ケース 3-1 ~ 3-4,3-7,3-8)	-----	63
図 4.2-12	水に換算した透水量係数(ケース 3-5,3-6,3-11,3-12,3-15,3-16)	-----	63
図 4.2-13	水に換算した透水量係数(ケース 3-9,3-10,3-13,3-14)	-----	63

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価で実施される天然バリア中の核種移行解析においては、対象となる地質媒体の特性を適切に取り扱うことが重要となる。花崗岩などの亀裂性岩盤を対象とした場合の核種移行解析には、個々の亀裂を均質な平行平板や一次元チャンネルで近似したモデルが一般的に用いられる。しかし実際には、巨視的には岩盤中の移行経路として亀裂ネットワークの不均質性が、微視的には亀裂表面形状、充填物、他の亀裂との相互作用(亀裂の分岐や交差等に起因する亀裂内空隙構造の不均質性)が、地下水の流れや核種の移行現象に影響を与えている。したがって上記モデルに代表されるような核種移行解析モデルの妥当性や信頼性を示すためには、亀裂ネットワークの不均質性、亀裂表面形状、充填物、他の亀裂との相互作用などが、地下水の流れや核種の移行現象に与える影響を把握する必要がある。

NETBLOCK ではこれまで、50cm 立方の実岩体(釜石岩体)を用いた透水試験を行ってきた。実岩体は、Y字に交差した天然亀裂を持つ花崗岩である。この実岩体は亀裂開口幅が大きく、水を流した場合、装置で制御可能な試験条件下において岩体亀裂内部で乱流を発生する可能性がある〔1〕。実岩体内部の透水量係数は、ダルシー則より求める。ダルシー則は、流れが層流のときに成立するため、実岩体亀裂内の流体の流れを層流にする必要がある。これまでは、水よりも高粘性の流体を用いて透水試験を行い、透水性が高い実岩体内部で層流状態を達成する試験条件を検討してきた〔2〕。

今回は亀裂交差部に沿った方向の透水特性の把握を目的として、亀裂交差部に沿った方向とそれ以外の方向で透水試験を実施した。試験には、これまで使用してきたものと同一の、透水性の高い実岩体を使用した。また流れの状態を層流とするために、水よりも粘性の高い高粘性流体を使用した。透水試験の結果より、亀裂面全体、対面するセル間、亀裂交差部に沿った方向の透水量係数を評価した。

2 試験方法

2.1 測定原理

岩体亀裂の透水量係数は、ダルシー則を用いて求める。本来ダルシー則は土質媒体を対象とした法則であるが、本報告では亀裂を対象としたものに適用し、透水量係数を求める。また、三乗則より亀裂開口幅を計算する。ダルシー則、三乗則は、流れが層流であるときに成立する〔3〕。

試験で使用する岩体は透水性が高いため、水を使用した場合、装置で制御可能な試験条件下において亀裂内の流れが乱流になる可能性がある〔1〕。そこで、この岩体で層流状態を達成するため、水よりも粘性の高い高粘性流体を使用する〔2〕。高粘性流体は、温度の変化とともに粘性も変化する。亀裂開口幅や水の粘性に換算した透水量係数 T_w を計算する際粘性係数 μ の値が必要であるため、高粘性流体の温度に対する粘度の変化を確認する。

2.1.1 ダルシー則、三乗則

ダルシー則は、流束が動水勾配に比例することを示す。このときの比例係数が透水係数 K (m/s)であり、媒体の水を通す能力を示す。そして透水係数 K と亀裂開口幅 b の積が、透水量係数 T (m²/s)である。

式(2.1-1)にダルシー則を、式(2.1-2)に透水量係数の計算方法を示す。式(2.1-1)のマイナスの記号は慣例である。

$$\frac{Q}{A} = q = K \frac{(h_1 - h_2)}{L} = -K \frac{\partial h}{\partial L} \quad (2.1-1)$$

Q : 流量(m³/s)、 $A=b \times w$: 断面積(m²)、 q : 流速(m/s)、 K : 透水係数(m/s)

h_1 : 注水側の水頭、 h_2 : 排水側の水頭、 $h=h_1-h_2$: 水頭差(m)、 b : 亀裂開口幅(m)

$L=$ L : 流体の流れ方向の長さ(m)、 w : 流体の流れ方向と垂直方向の幅(m)

$$T = K \cdot b \quad (2.1-2)$$

T : 透水量係数(m²/s)

三乗則は、亀裂内の流量が亀裂の開口幅の三乗に比例することを示している。式(2.1-3)に三乗則の式を示す。

$$Q = \frac{\rho \cdot g \cdot b^2}{12\mu} (b \cdot w) \frac{\partial h}{\partial L} \quad (2.1-3)$$

：流体の密度(kg/m³)、g：重力加速度(m/s²)、μ：粘性係数(kg/m・s)、b：亀裂開口幅(m)

2.1.2 液温と粘性係数の関係

水の粘性は、温度の変化に伴い変化することが知られている。同様に、高粘性流体も温度の変化に伴い粘性が変化する。

見かけの粘性と温度の関係は、式(2.1-4)によって近似できる〔4〕。

$$\log_{10} \eta = A - B \times Te \quad (2.1-4)$$

：見かけの粘度(Pa・s) (Pa・s) = (kg/m・s)、Te：液温()

A：濃度により決まる定数、B：温度による粘度の変化率

高粘性流体をニュートン流体とみなすことができる場合、式(2.1-4)で見かけの粘度と称しているものが粘性係数となり、式(2.1-5)のように書き換えることができる。

$$\log_{10} \mu = A - B \times Te \quad (2.1-5)$$

μ：粘性係数(kg/m・s)

2.2 測定手順

図 2.2-1 に試験概略図を示す。セキを岩体の注水側、排水側に接続し、セキの水頭差により透水試験を室温で行う。排水側のセキの高さを固定し、注水側のセキを排水側のセキに対して段階的に上下させる。注水セキの上昇幅は、亀裂面全体を対象とした透水試験で 0～0.07m、1セル対1セル(1注水口対1排水口)の透水試験で 0～0.14m とする。注水側、排水側とも、セキの余分な流体はオーバーフローさせ、水頭を一定に保つ。

岩体内の流れが定常になった後、排水流量、排水側の水温、岩体周囲の水頭を測定する。排水側からオーバーフローした流体の流量測定には、メスシリンダーまたは電子天秤を使用する。また岩体周囲の水頭は、岩体亀裂面に沿ってマノメータを接続して測定する。注水及び排水チューブの数や接続位置は、測定条件に応じ変化させた。

測定手順を次に述べる。

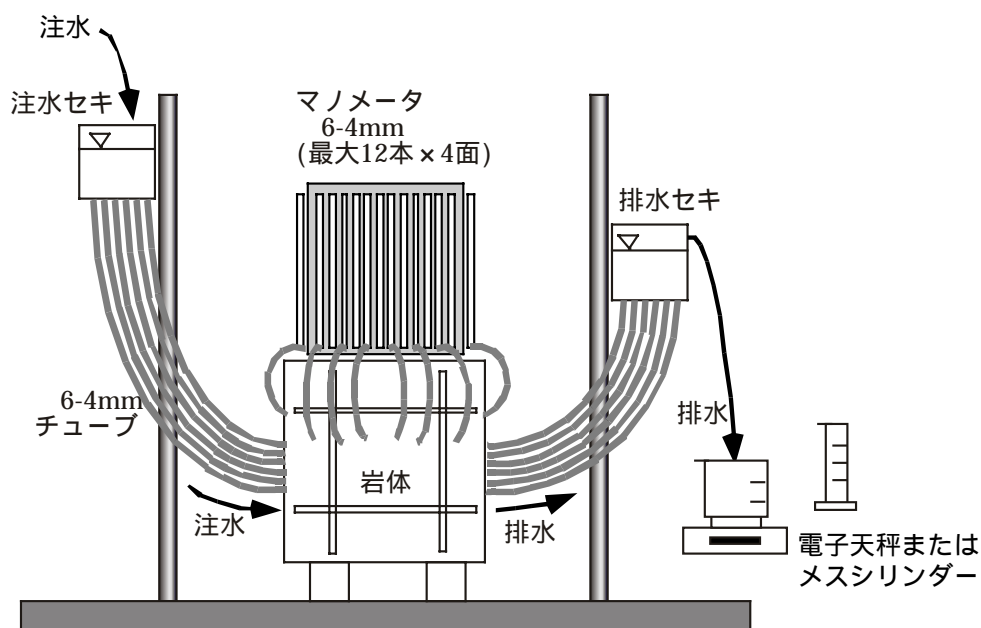


図 2.2-1 透水試験概略図

- (1)岩体の注排水セルと注排水セキを、6-4mm(外径6mm-内径4mm)チューブで接続する。
- (2)マイクロポンプを使用し、注水セキに流体を輸送する。
- (3)注水セキを上げ、岩体に流体を注入する。
- (4)セルの栓を一本ずつ空け、セキの水頭差で岩体内のエアを押し流す。また、マノメータをたたいて、マノメータ継ぎ手内のエアを取り除く。
- (5)注水セキを下げ、排水セキとの水頭差をゼロにする。
- (6)水頭が安定した後、流量ゼロ時のマノメータの水頭を測定する。
- (7)注水セキを、排水セキとの水頭差が0.07mまたは0.14mになるまで段階的に上げる。セキを上げるたびに排水流量が定常になるのを待ち、マノメータ水頭、排水流量(メスシリンダー使用時)、水温を測定する。
- (8)注水セキを、排水セキとの水頭差が0mになるまで段階的に下げる。セキを下げるたびに排水流量が定常になるのを待ち、マノメータ水頭、排水流量(メスシリンダー使用時)、水温を測定する。
- (9)測定を終了する。

2.3 使用装置

(1) 岩体試料

試験には、これまで使用してきた透水性の高い実岩体を、引き続き使用した〔1〕。この岩体は、Y字に交差した天然亀裂を持つ花崗岩である。岩体は縦 0.5m × 横 0.5m × 高さ 0.47 m に整形し、縦 0.5m × 横 0.5m × 高さ 0.03m のステンレス鋼板を岩体に乗せ、全体の大きさを 0.5m 角に調節した。岩体の亀裂の状況を、図 2.3-1 に示す。U 面が岩体の上部面となる。図 2.3-1 に載っていない岩体の下部面は、亀裂が存在しない。

亀裂の観察結果より、岩体試料の主要な亀裂は 2 枚で構成されており、岩体のほぼ中央の水平方向の亀裂(下部亀裂)とそれから分岐した亀裂(上部亀裂)である。また亀裂交差部は、E 面、S 面それぞれの亀裂分岐点を通る線と推定した。

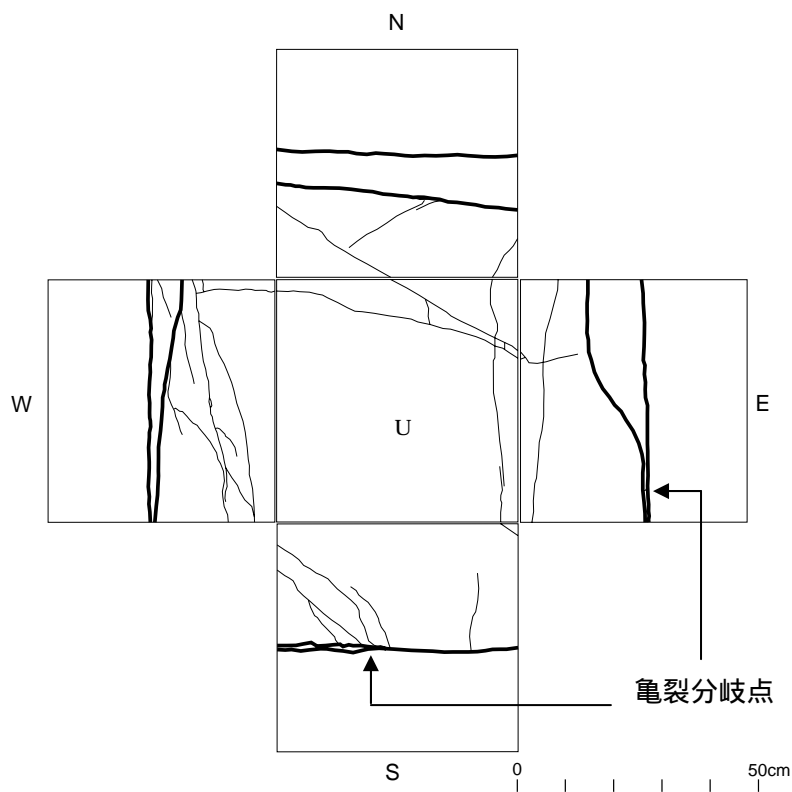


図 2.3-1 岩体亀裂展開図

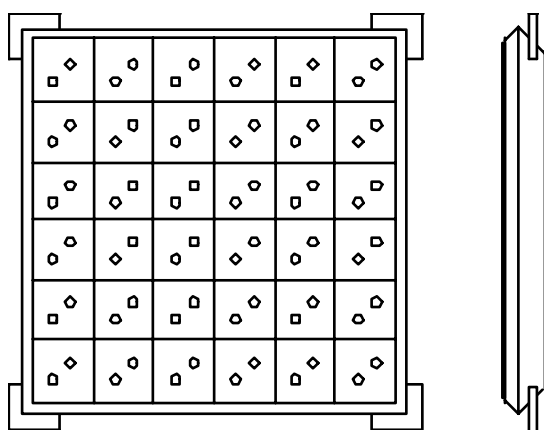
(太線：主要な亀裂)

(2) 止水板

止水板は、岩体の表面に取り付けることにより、岩体亀裂部の止水を行う。また止水板により、岩体表面亀裂部を、注排水を行う領域(セル)に分割する。

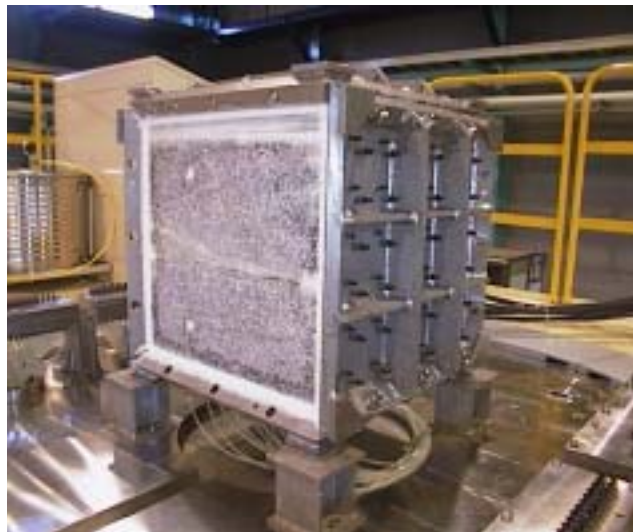
図 2.3-2 に、止水板の外観図を示す。止水板は、止水エレメントにより6×6面のセルに仕切られ、これより岩体へ注排水を行う。注排水の配管には、6-4mm(外径 6mm、内径 4mm)チューブを使用する。

止水板は、岩体の各面に1枚ずつ、計6枚取り付ける。止水板取り付け後、岩体稜線部をシリコンポリマー系シーリング剤(シリコンシーラント)で充填し、岩体の止水を行う。岩体への止水板の取り付け状況を、図 2.3-3 に示す。また図 2.3-4 に、各注排水セルと亀裂の位置関係と、試験で使用したセル番号を示す。亀裂交差部は図 2.3-5 のように、上部亀裂と下部亀裂の亀裂分岐点のある S21-E19 間を通過する線と推定した。



(a) 岩体止水面図 (b) 側面図

図 2.3-2 止水板外観図



(a) 上下面、側面二箇所取り付け状態



(b) 全面取り付け状態

図 2.3-3 止水板取り付け状況

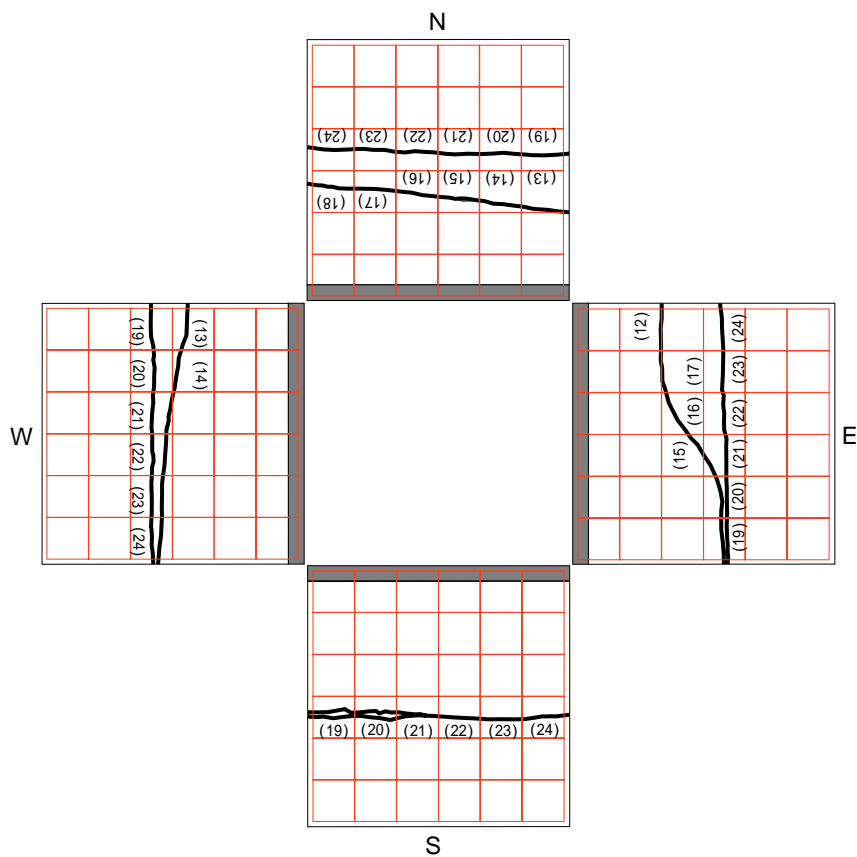


図 2.3-4 各注排水セルと亀裂の位置関係
(太線: 主要な亀裂)

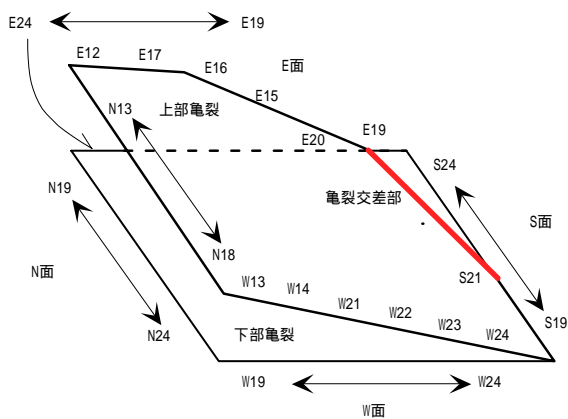


図 2.3-5 主要なセルと亀裂面の関係図
(赤線: 亀裂交差部)

(3) 回転粘度計

透水試験に使用する流体の粘性測定に、回転粘度計 YV6-S(山崎精機研究所)を使用した。超低粘度用ローター(V-L-K)と0~50(g/cm)のトルクメータを組み合わせ、回転数 200(r.p.m)で測定することで、0~50×10⁻³(kg/m・s)の範囲の粘度測定が可能である。

(4) 使用流体

使用流体の粘性を上げるために、水にメチルセルロース系の増粘剤(テルポリマー30L)を溶かしたものを作製した。メチルセルロース系の増粘剤は、安全性、経済性、取り扱いやすさに優れている。また、少量で高い粘性の流体を得られるため、液体の密度が水とほとんど変わらない利点がある。しかし、重合度、水溶液濃度が大きくなると、わずかに非ニュートン性を示す[4]。

以前に行った試験結果より流れが層流になる条件を検討し、0.2(wt%)濃度の高粘性流体を使用した。本試験に用いる高粘性流体は増粘剤の濃度が極めて低いため、おおむねニュートン流体と見なす事ができる。流体の粘性係数は、回転粘度計(せん断速度 320(1/s))で測定した。作製した高粘性流体の粘度は、透水試験時の液温 15~20()で6.0×10⁻³~7.0×10⁻³ (kg/m・s)であり、水の粘度 1.0×10⁻³ (kg/m・s)に比べ約6~7倍大きい。

(5) マノメータ

長さ0.5mのアクリル管 6-4mm(外径6mm-内径4mm)により、岩体亀裂部の水頭を読み取る。図 2.3-6 に、マノメータ外観図を示す。最大 12 点×4 面の岩体水頭を測定できる。

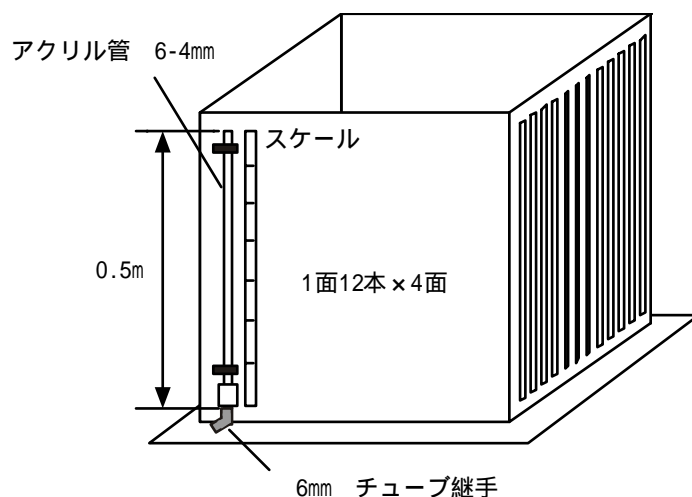


図 2.3-6 マノメータ外観図

2.4 測定条件

2.4.1 亀裂面全体を対象とした透水試験

注水側のセキの高さを変化させ、排水側の流量と全てのマノメータの水頭を測定した。試験の注排水セル組み合わせを、表 2.4-1、図 2.4-1~2.4-6 に示す。

表 2.4-1 亀裂面全体を対象とした透水試験組み合わせ

ケース	注水セル	排水セル	備考
1-1	N13~18	S19~24	図 2.4-1
1-2	S19~24	N13~18	図 2.4-1
1-3	N19~24	S19~24	図 2.4-2
1-4	S19~24	N19~24	図 2.4-2
1-5	S19~24	N13~18 N19~24	図 2.4-3
1-6	N13~18 N19~24	S19~24	図 2.4-3
1-7	W13,14 W20~24	E12 E15~17 E19~21	図 2.4-4
1-8	E12 E15~17 E19~21	W13,14 W20~24	図 2.4-4
1-9	W19~24	E19~24	図 2.4-5
1-10	E19~24	W19~24	図 2.4-5
1-11	W13,14 W19~24	E12 E15~17 E19~24	図 2.4-6
1-12	E12 E15~17 E19~24	W13,14 W19~24	図 2.4-6

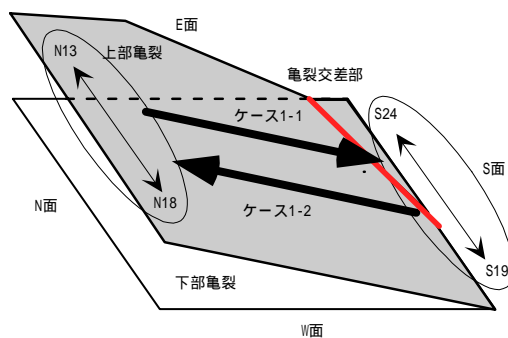


図 2.4-1 透水試験組合せ(ケース 1-1,1-2)

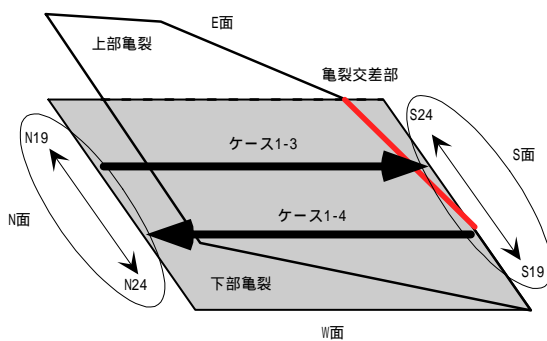


図 2.4-2 透水試験組合せ(ケース 1-3,1-4)

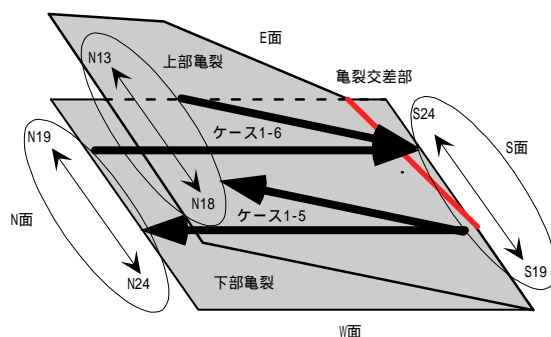


図 2.4-3 透水試験組合せ(ケース 1-5,1-6)

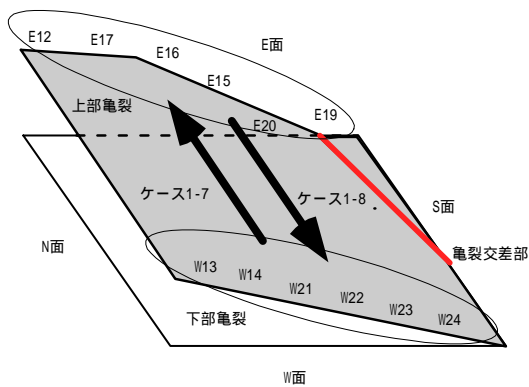


図 2.4-4 透水試験組合せ(ケース 1-7,1-8)

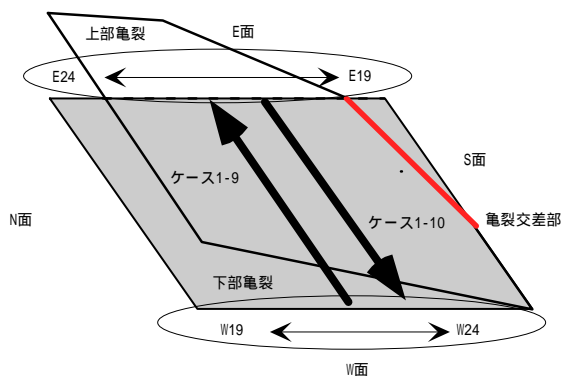


図 2.4-5 透水試験組合せ(ケース 1-9,1-10)

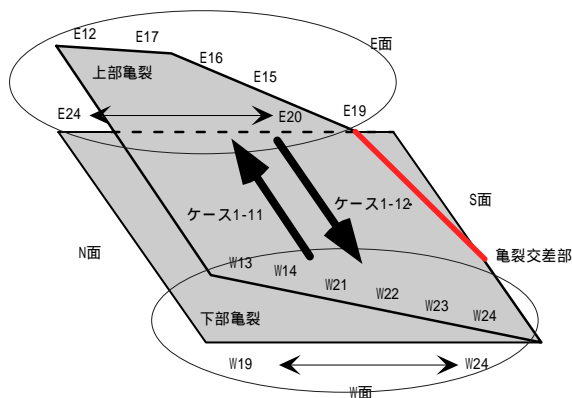


図 2.4-6 透水試験組合せ(ケース 1-11,1-12)

2.4.2 対面するセル間の透水試験

注水側のセキの高さを変化させ、排水側の流量と全てのマノメータの水頭を測定した。対面するセル間の透水試験を、亀裂交差部を含むセル間とそれ以外のセル間で行い、透水量係数の違いを比較する。試験の注排水セルの組み合わせを表 2.4-2、図 2.4-7~2.4-10 に示す。

表 2.4-2 対面するセル間の透水試験組み合わせ

ケース	注水セル	排水セル	備考
2-1	W24	E19	図 2.4-7
2-2	E19	W24	図 2.4-7
2-3	W23	E20	図 2.4-8
2-4	E20	W23	図 2.4-8
2-5	W22	E21	図 2.4-7
2-6	E21	W22	図 2.4-7
2-7	W19	E24	図 2.4-8
2-8	E24	W19	図 2.4-8
2-9	W13	E12	図 2.4-7
2-10	E12	W13	図 2.4-7
2-11	S22	N21	図 2.4-9
2-12	N21	S22	図 2.4-9
2-13	S24	N19	図 2.4-9
2-14	N19	S24	図 2.4-9
2-15	S22	N15	図 2.4-10
2-16	N15	S22	図 2.4-10
2-17	S24	N13	図 2.4-10
2-18	N13	S24	図 2.4-10

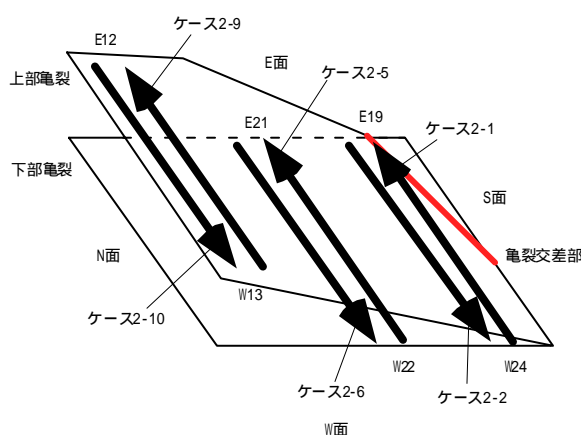


図 2.4-7 透水試験組合せ(ケース 2-1,2-2,2-5,2-6,2-9,2-10)

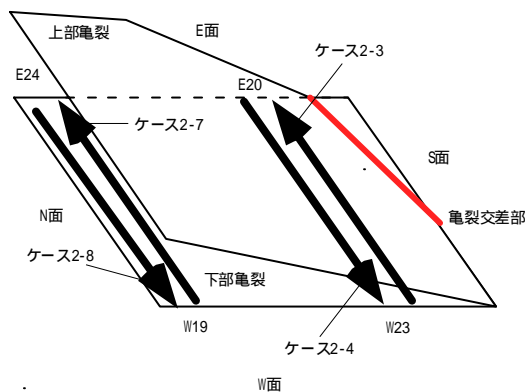


図 2.4-8 透水試験組合せ(ケース 2-3,2-4,2-7,2-8)

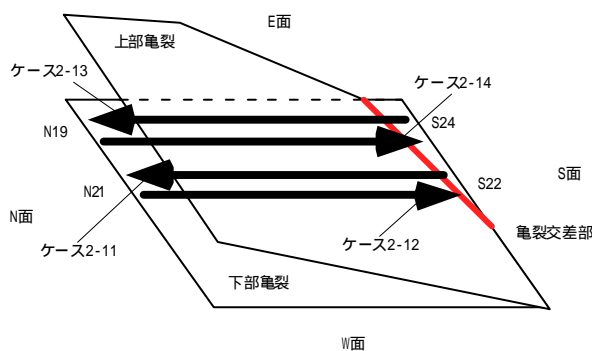


図 2.4-9 透水試験組合せ(ケース 2-11 ~ 2-14)

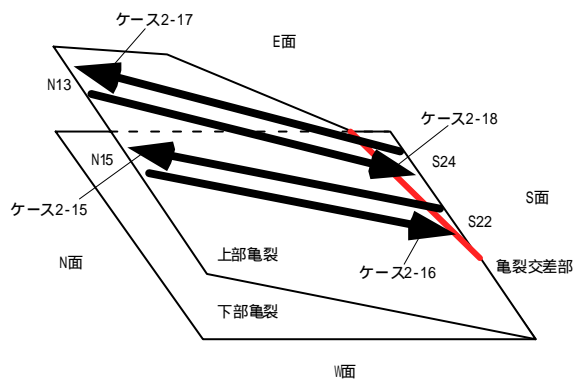


図 2.4-10 透水試験組合せ(ケース 2-15 ~ 2-18)

2.4.3 亀裂交差部と同一流路長セル間の透水試験

注水側のセキの高さを変化させ、排水側の流量と全てのマノメータの水頭を測定した。亀裂交差部に沿った方向と、亀裂交差部と同一流路長のセル間の透水試験を行い、透水量係数の違いを比較する。試験の注排水セルの組み合わせを表 2.4-3、図 2.4-11~2.4-13 に示す。

表 2.4-3 亀裂交差部と同一流路長セル間の透水試験組み合わせ

ケース	注水セル	排水セル	備考
3-1	S21	E19	図 2.4-11
3-2	E19	S21	図 2.4-11
3-3	E21	N19	図 2.4-11
3-4	N19	E21	図 2.4-11
3-5	N22	E24	図 2.4-12
3-6	E24	N22	図 2.4-12
3-7	W22	N18	図 2.4-11
3-8	N18	W22	図 2.4-11
3-9	N16	E12	図 2.4-13
3-10	E12	N16	図 2.4-13
3-11	E16	S24	図 2.4-12
3-12	S24	E16	図 2.4-12
3-13	E22	S24	図 2.4-13
3-14	S24	E22	図 2.4-13
3-15	W24	S22	図 2.4-12
3-16	S22	W24	図 2.4-12

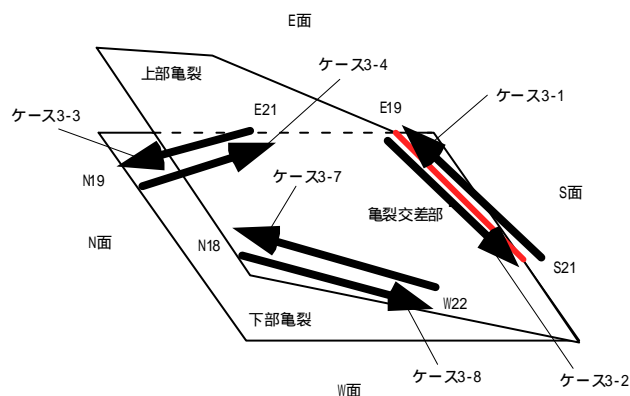


図 2.4-11 透水試験組合せ(ケース 3-1 ~ 3-4,3-7,3-8)

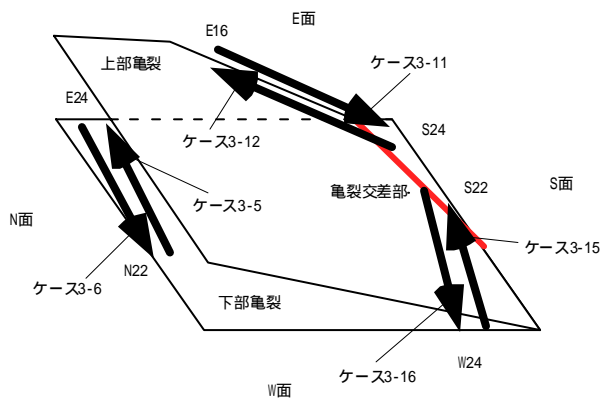


図 2.4-12 透水試験組合せ(ケース 3-5,3-6,3-11,3-12,3-15,3-16)

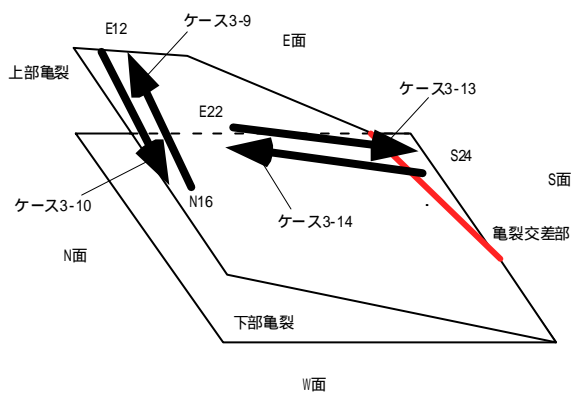


図 2.4-13 透水試験組合せ(ケース 3-9,3-10,3-13,3-14)

3 試験結果

3.1 亀裂面全体を対象とした透水試験結果

亀裂面全体を対象とした透水試験(ケース 1-1~1-12)について、注水流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ と向かい合うセル間の水頭差 $h(\text{m})$ の関係を、図 3.1-1~3.1-12 に示す。図 3.1-1~3.1-12 より、水頭差と流量の平均の傾き(Q/h)、最大、最小となる傾き(Q/h)を、表 3.1-1 に示す。また、水頭差と流量の平均の傾き(Q/h)を図 3.1-13 ~ 3.1-18 に示す。

表 3.1-1、図 3.1-13 ~ 3.1-18 より、注水と排水の方向が逆のケースで、水頭差と流量の傾き(Q/h)がほぼ等しい事が分かる。これより、注水と排水の方向を逆にしても、流体の流路は同じであると考えられる。

ケース 1-1、1-2 は、上部亀裂面を N-S 方向に通水している。図 3.1-1、3.1-2 より、N13-S24 セル間(亀裂の E 面側)で流量が大きいことが分かる。

ケース 1-3、1-4 は、下部亀裂面を N-S 方向に通水している。図 3.1-3、3.1-4 より、N19-S24、N20-S23、N21-S22 セル間(亀裂の E 面側)で流量が大きい。そして、N22-S21 セル間付近を境に、W 面側は流量が小さくなる事が分かる。また注排水が N-S 方向では、上部亀裂よりも下部亀裂の流量が大きいことが分かる。

ケース 1-5、1-6 は、上部亀裂面と下部亀裂面を N-S 方向に同時に通水している。図 3.1-5、3.1-6 より、N13、19-S24(亀裂の E 面側)セル間で流量が大きく、N18、24-N19(亀裂の W 面側)に近づくほど流量が小さくなる事が分かる。

ケース 1-7、1-8 は、上部亀裂面を E-W 方向に通水している。図 3.1-7、3.1-8 より、E19-W24、E20-W23(亀裂の S 面側)で流量が大きいことが分かる。また E-W 方向は N-S 方向より流体が流れやすく、透水異方性を示す。

ケース 1-9、1-10 は、下部亀裂面を E-W 方向に通水している。図 3.1-9、3.1-10 より、E19-W24、E20-W23(亀裂の S 面側)で流量が大きいことが分かる。また E-W 方向は N-S 方向がより流体が流れにくく、透水異方性を示す。

ケース 1-11、1-12 は、上部亀裂面と下部亀裂面を E-W 方向に同時に通水している。図 3.1-11、3.1-12 より、上部亀裂面と下部亀裂面の全体でも、E-W 方向に注水したときは、E19-W24、E20-W23(亀裂の S 面側)の流量が大きいことが分かる。

これより試験に使用した実岩体は、下部亀裂の E 面側で最も流体が流れやすいことが分かった。また、上部亀裂面と下部亀裂面の交わる S 面側で、比較的流体が流れやすいことが分かった。

表 3.1-1 水頭差と流量の傾き(亀裂面全体)

ケース	注水セル	排水セル	Q(m ³ /s)/ h(m)		
			平均値	最大値	最小値
1-1	N13~18	S19~24	1.139×10^{-5}	1.358×10^{-5}	1.061×10^{-5}
1-2	S19~24	N13~18	1.130×10^{-5}	1.306×10^{-5}	1.063×10^{-5}
1-3	N19~24	S19~24	4.779×10^{-5}	6.790×10^{-5}	3.470×10^{-5}
1-4	S19~24	N19~24	5.204×10^{-5}	7.046×10^{-5}	3.813×10^{-5}
1-5	S19~24	N13~18 N19~24	5.667×10^{-5}	7.711×10^{-5}	4.286×10^{-5}
1-6	N13~18 N19~24	S19~24	5.271×10^{-5}	7.524×10^{-5}	3.917×10^{-5}
1-7	W13,14 W20~24	E12 E15~17 E19~21	2.722×10^{-5}	3.568×10^{-5}	2.254×10^{-5}
1-8	E12 E15~17 E19~21	W13,14 W20~24	2.646×10^{-5}	3.531×10^{-5}	1.935×10^{-5}
1-9	W19~24	E19~24	2.578×10^{-5}	3.096×10^{-5}	2.250×10^{-5}
1-10	E19~24	W19~24	2.590×10^{-5}	3.051×10^{-5}	2.313×10^{-5}
1-11	W13,14 W19~24	E12 E15~17 E19~24	2.863×10^{-5}	3.489×10^{-5}	2.524×10^{-5}
1-12	E12 E15~17 E19~24	W13,14 W19~24	2.703×10^{-5}	3.306×10^{-5}	2.251×10^{-5}

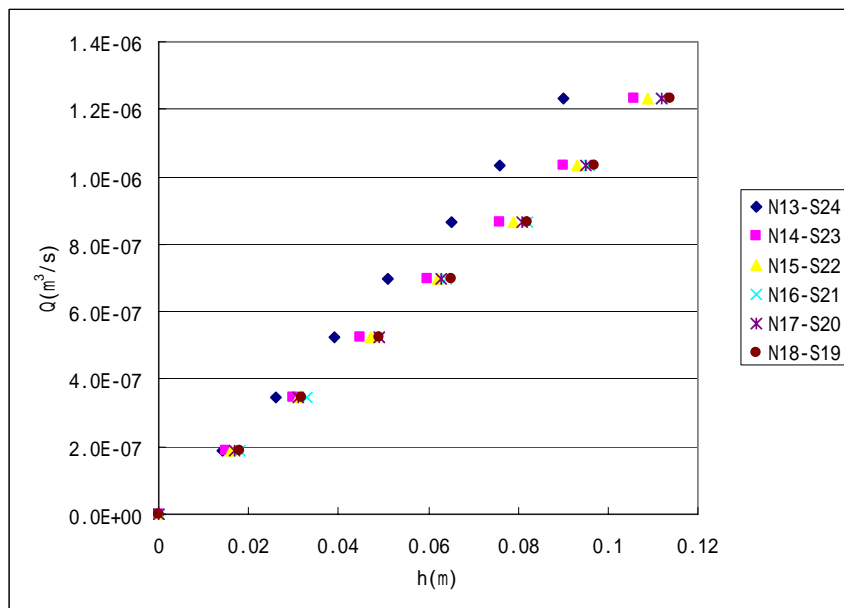


図 3.1-1 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-1)

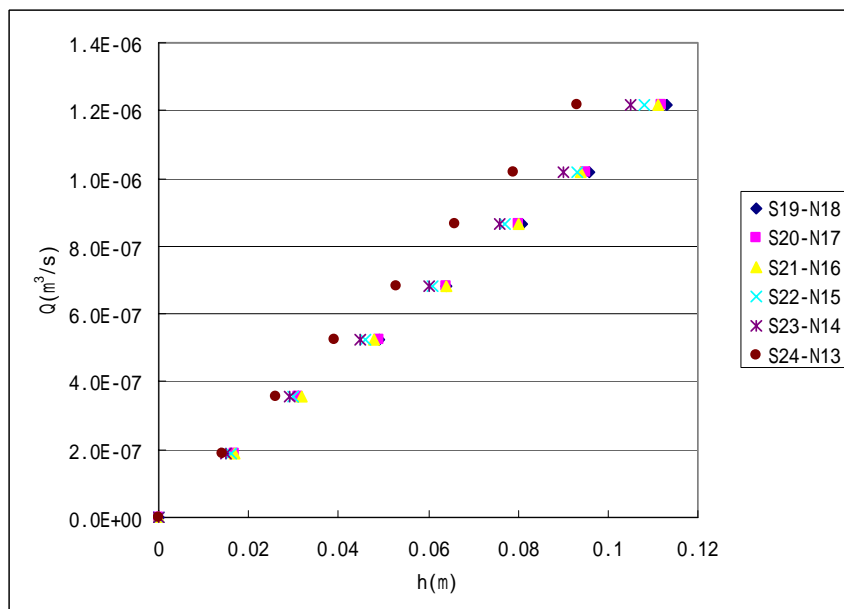


図 3.1-2 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-2)

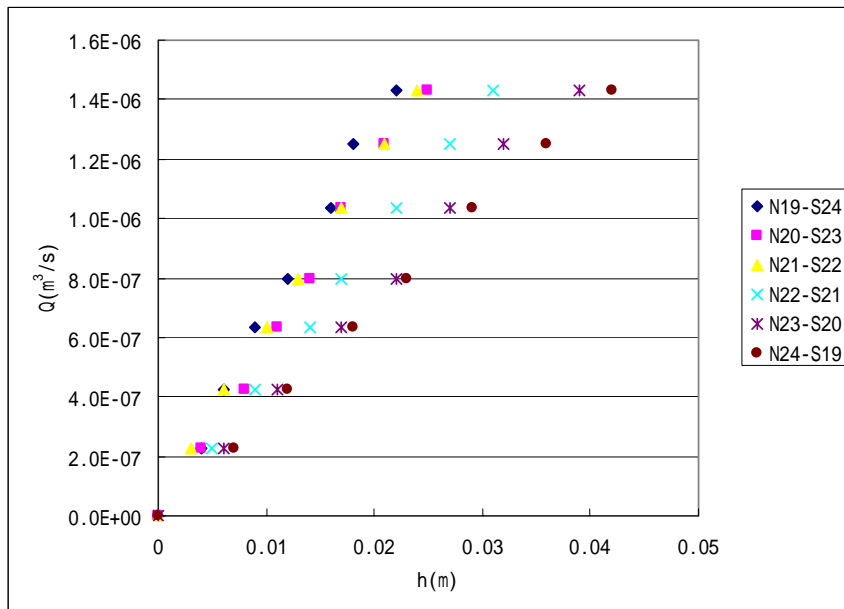


図 3.1-3 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-3)

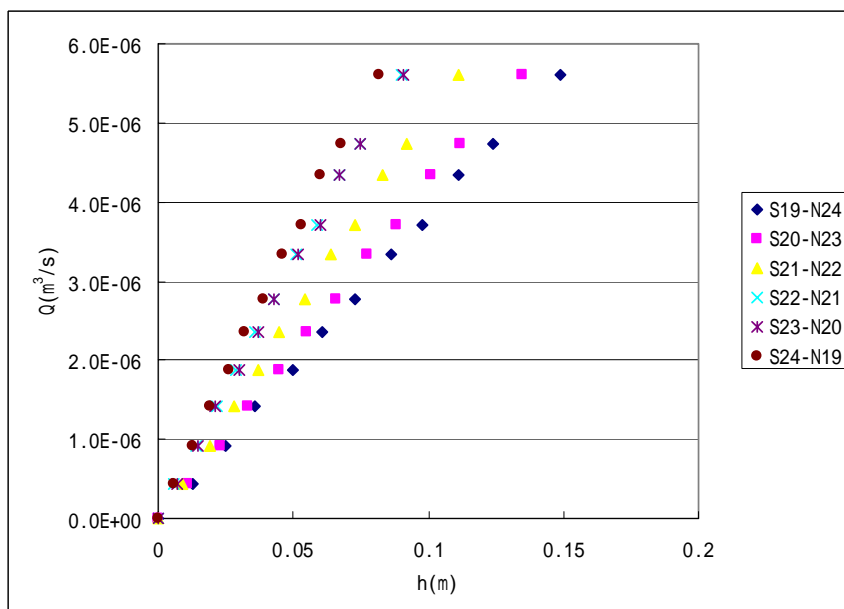


図 3.1-4 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-4)

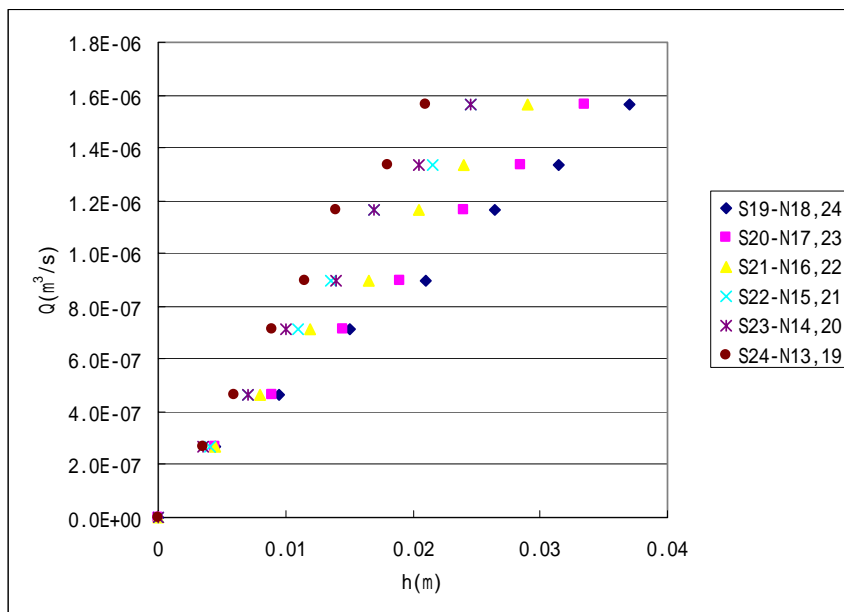


図 3.1-5 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-5)

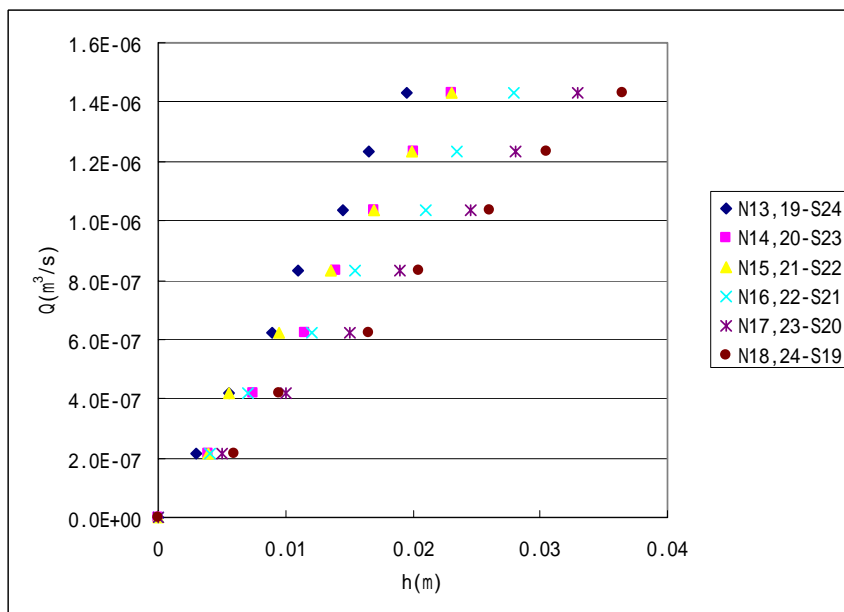


図 3.1-6 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-6)

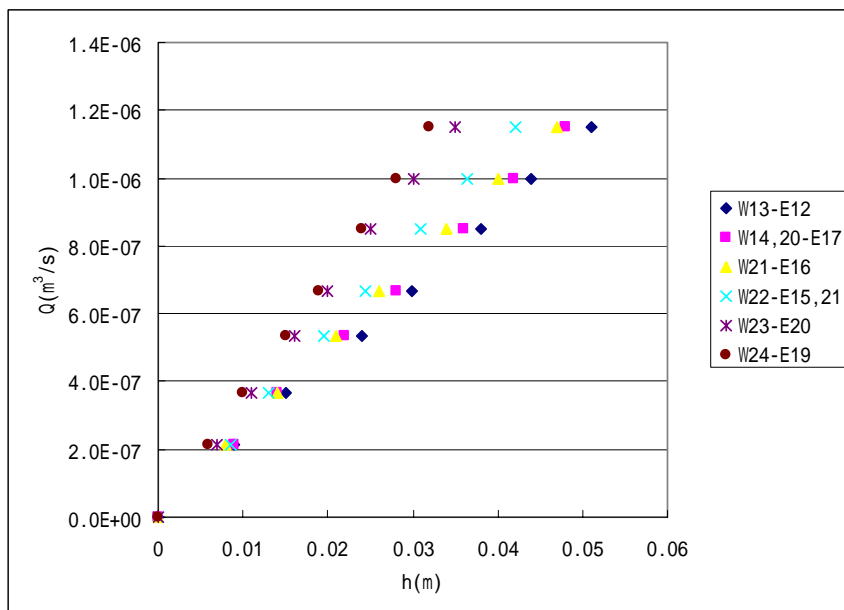


図 3.1-7 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-7)

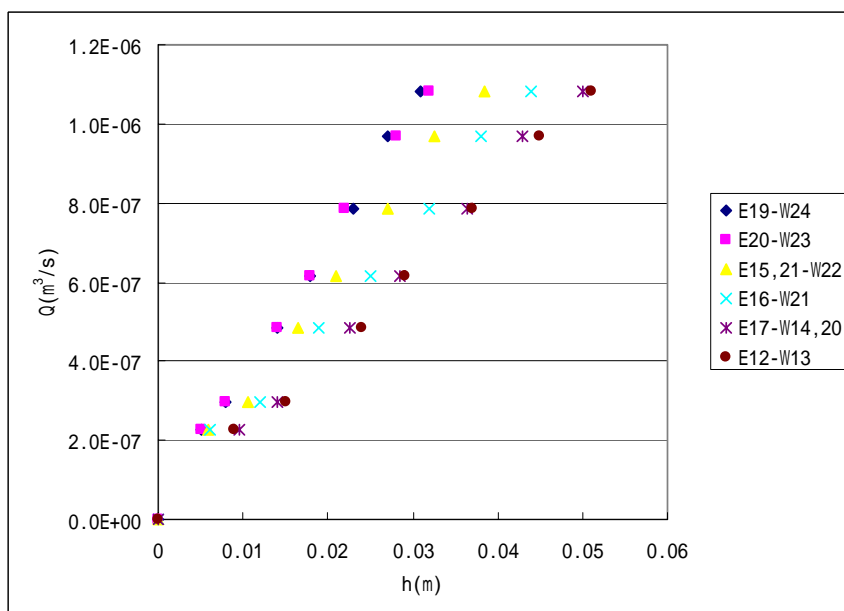


図 3.1-8 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-8)

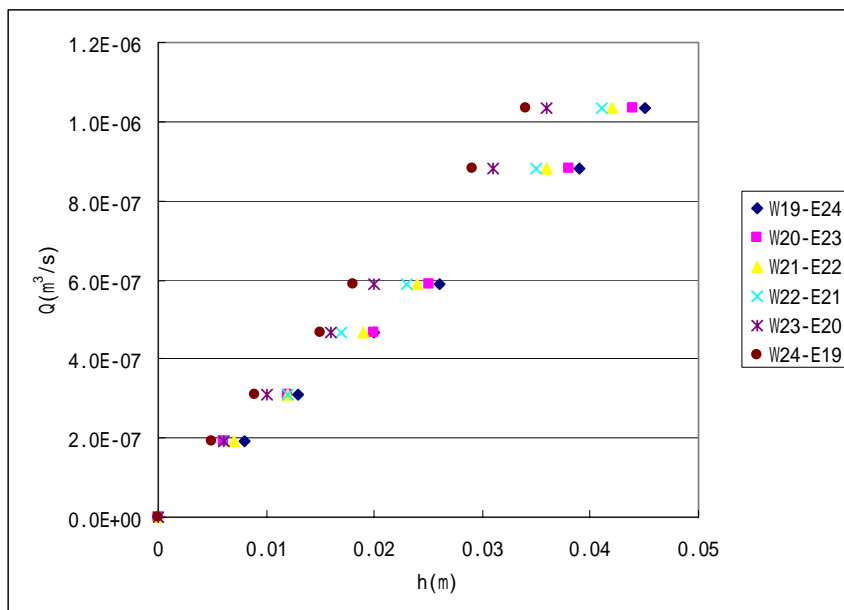


図 3.1-9 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-9)

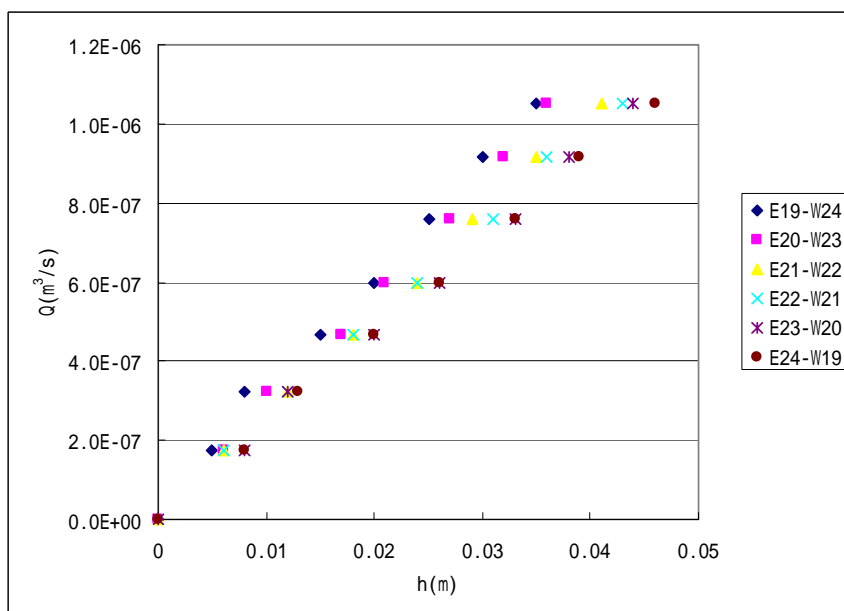


図 3.1-10 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-10)

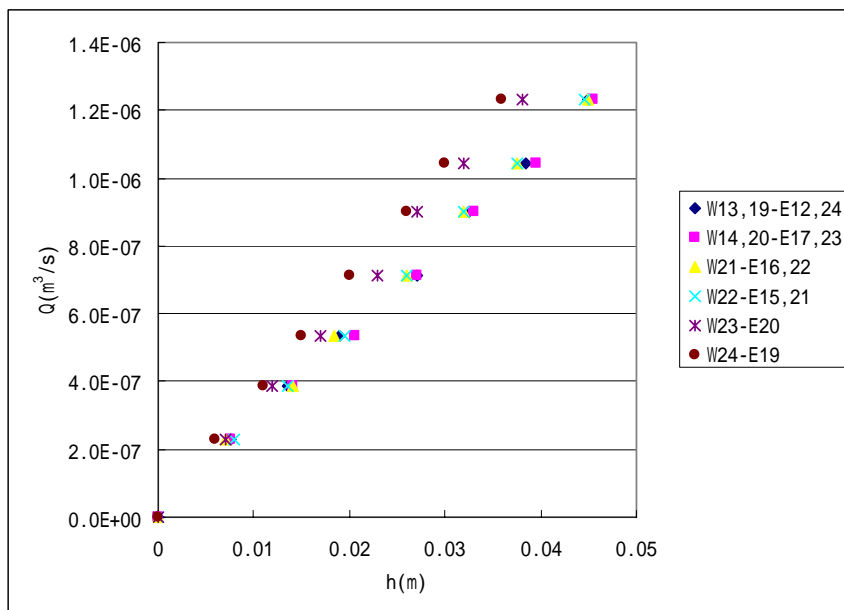


図 3.1-11 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-11)

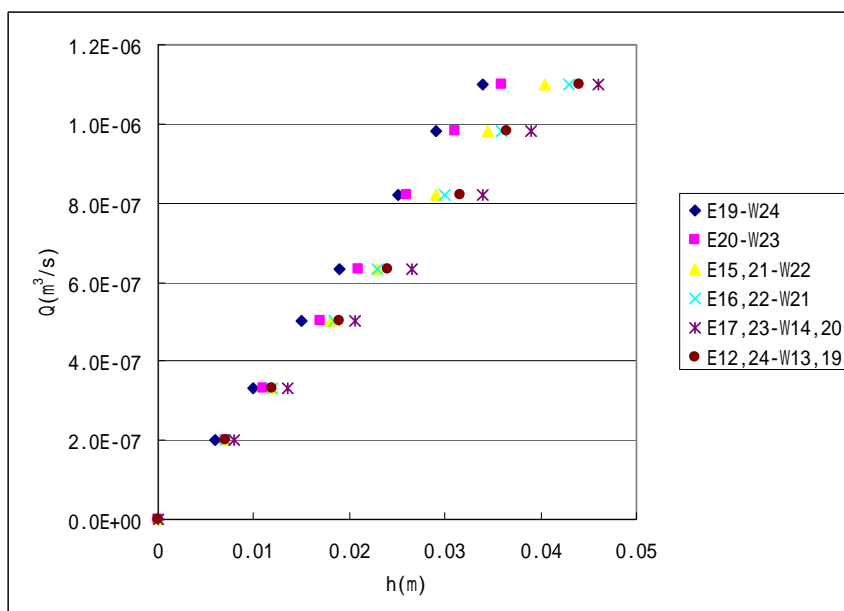


図 3.1-12 注排水セル間の水頭差と流量の関係(ケース 1-12)

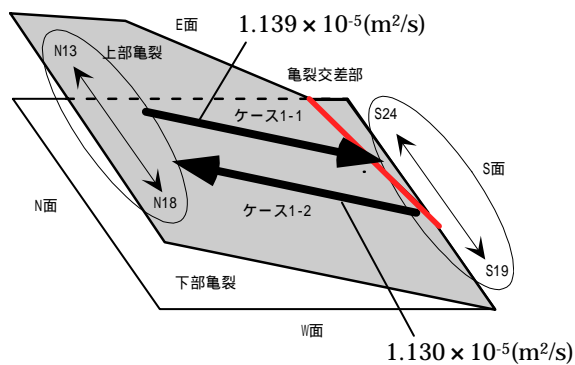


図 3.1-13 水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-1,1-2)

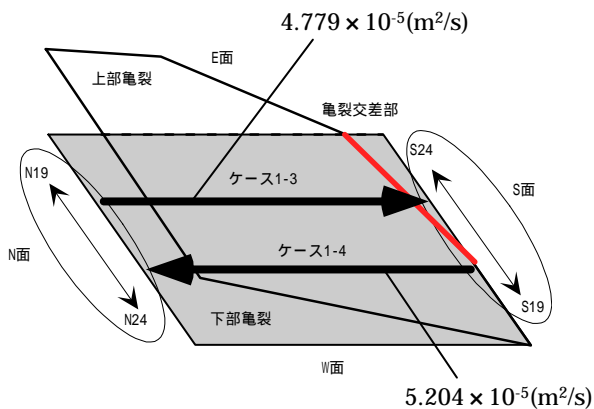


図 3.1-14 水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-3,1-4)

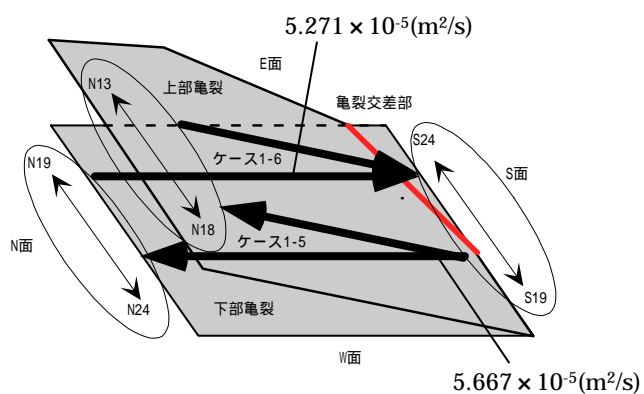


図 3.1-15 水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-5,1-6)

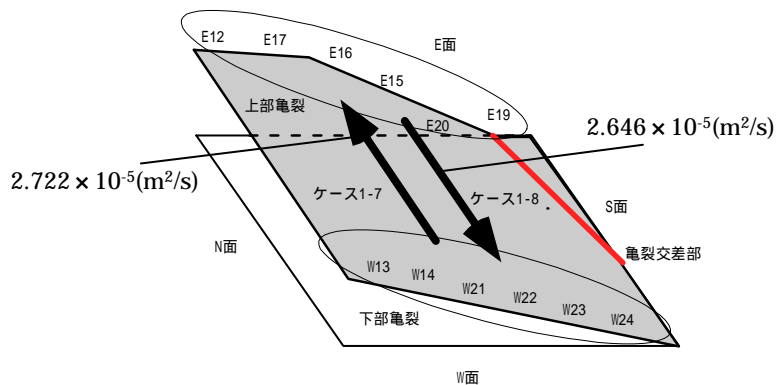


図 3.1-16 水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-7,1-8)

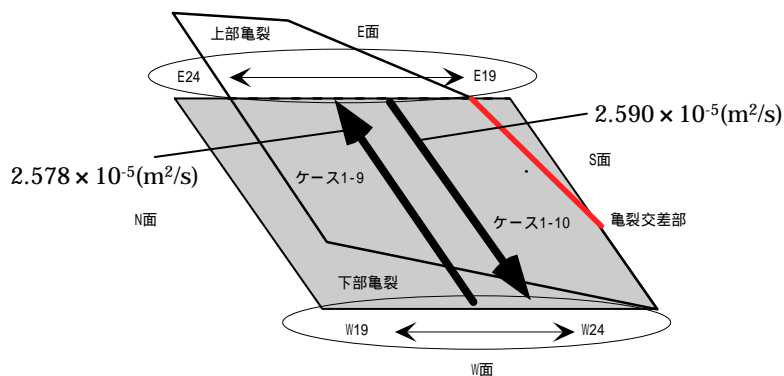


図 3.1-17 水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-9,1-10)

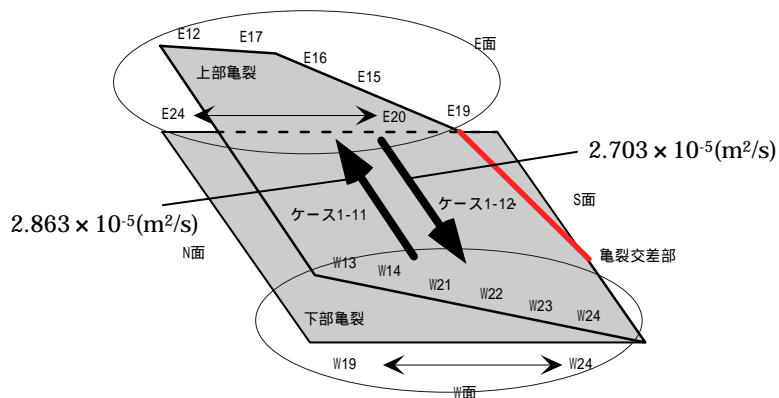


図 3.1-18 水頭差と流量の関係-平均値(ケース 1-11,1-12)

3.2 対面するセル間の透水試験結果

対面するセル間(1セル対1セル間)の透水試験(ケース2-1~2-18)について、注水流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ と向かい合うセル間の水頭差 $h(\text{m})$ の関係を、図 3.2-1~3.2-18 に示す。ケース 2-1、2-2、2-11、2-12、2-13、2-14 は、測定を複数回行っている。また、各ケースの水頭差と流量の傾き(Q/h)を、表 3.2-1、図 3.2-19~3.2-22 に示す。

表 3.2-1、図 3.2-19~3.2-22 より、注水と排水の方向が逆のケースで、水頭差と流量の傾き(Q/h)がほぼ等しいことが分かる。これより、注水と排水の方向を逆にしても、流体の流路は同じであると考えられる。

ケース 2-1~2-8 は、下部亀裂の対面するセル間を E-W 方向に通水している。図 3.2-19、3.2-20 より、亀裂の S 面側である E19-W24 セル間(ケース 2-1、2-2)は流量が大きく、亀裂の N 面側に近づくほど流量が小さくなることが分かる。

ケース 2-9、2-10 は、上部亀裂 N 面側の対面する E12-W13 セル間で通水を行っている。図 3.2-19、3.2-20 より、上部亀裂の E12-W13(ケース 2-9、2-10)セル間は、下部亀裂に比べ流体が流れにくいことが分かる。

ケース 2-11~2-14 は、下部亀裂の対面するセル間を N-S 方向に通水している。図 3.2-21 より、下部亀裂の E 面側は、流量がほぼ一定であると考えられる。また、下部亀裂 E 面側の流量は、他の箇所 비해大きいことが分かる。

ケース 2-15~2-18 は、上部亀裂の対面するセル間を N-S 方向に通水している。図 3.2-22 より、上部亀裂は下部亀裂に比べ流量が小さいことが分かる。

対面するセル間の透水試験より、下部亀裂 E 面側で流量が、最も流れやすいことが分かった。また E-W 方向では、S 面側で流体が流れやすいことが分かる。これらの結果は、亀裂面全体を対象とした透水試験の結果と一致している。

表 3.2-1 水頭差と流量の傾き(対面するセル間)

ケース	注水セル	排水セル	Q(m ³ /s)/ h(m)
2-1	W24	E19	3.057×10^{-5}
2-2	E19	W24	2.803×10^{-5}
2-3	W23	E20	2.635×10^{-5}
2-4	E20	W23	2.726×10^{-5}
2-5	W22	E21	2.431×10^{-5}
2-6	E21	W22	2.463×10^{-5}
2-7	W19	E24	1.960×10^{-5}
2-8	E24	W19	1.764×10^{-5}
2-9	W13	E12	5.292×10^{-6}
2-10	E12	W13	4.410×10^{-6}
2-11	S22	N21	5.379×10^{-5}
2-12	N21	S22	5.812×10^{-5}
2-13	S24	N19	5.226×10^{-5}
2-14	N19	S24	5.893×10^{-5}
2-15	S22	N15	9.571×10^{-6}
2-16	N15	S22	9.953×10^{-6}
2-17	S24	N13	1.158×10^{-5}
2-18	N13	S24	1.136×10^{-5}

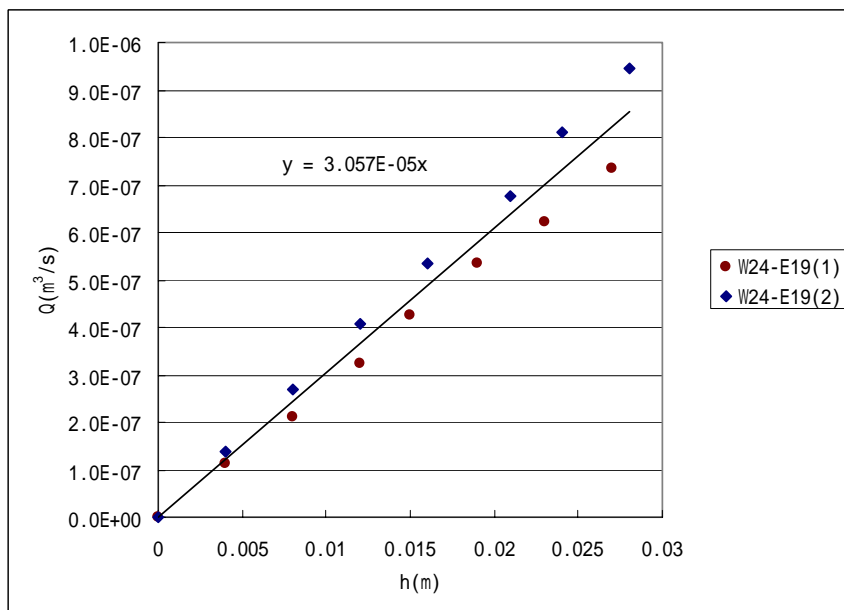


図 3.2-1 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-1)

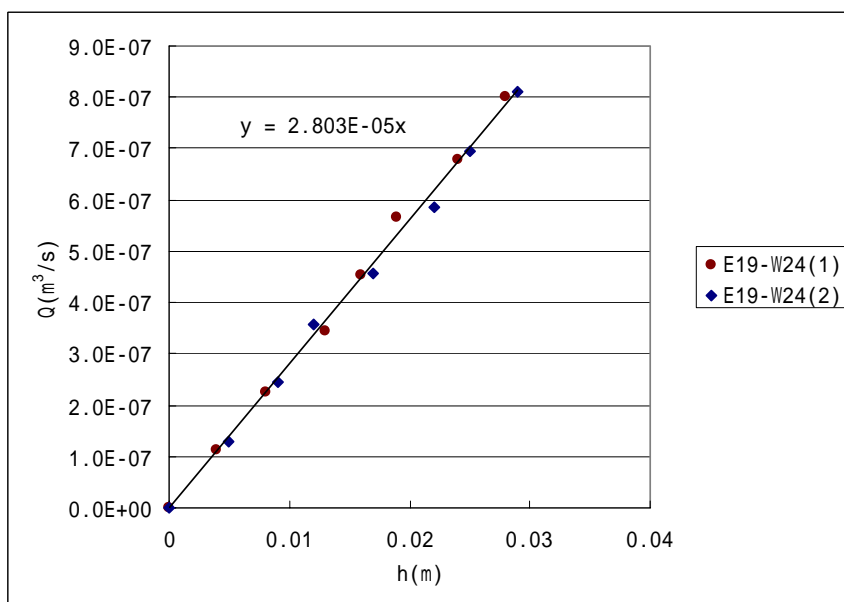


図 3.2-2 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-2)

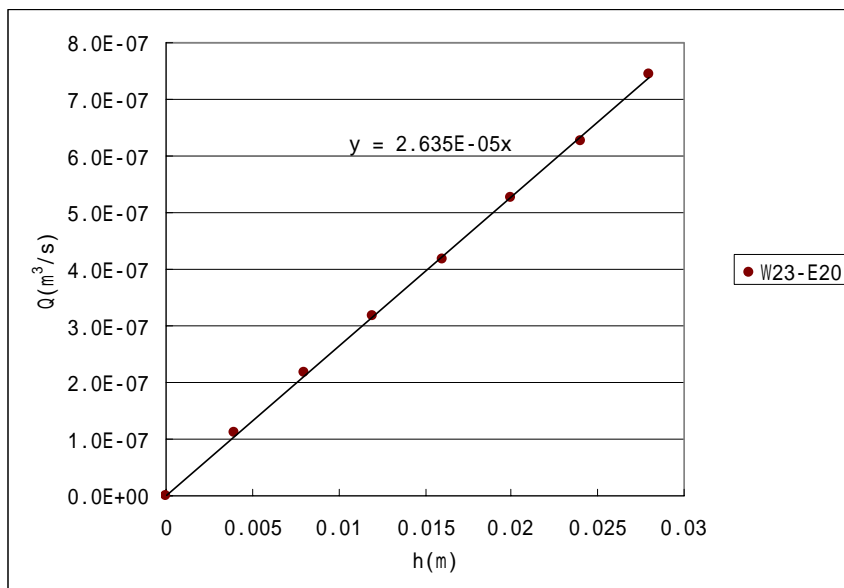


図 3.2-3 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-3)

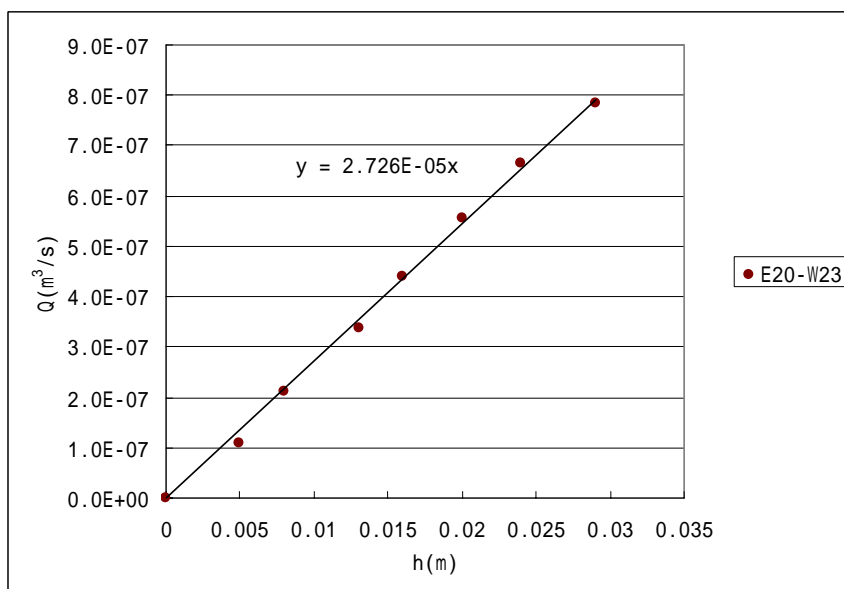


図 3.2-4 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-4)

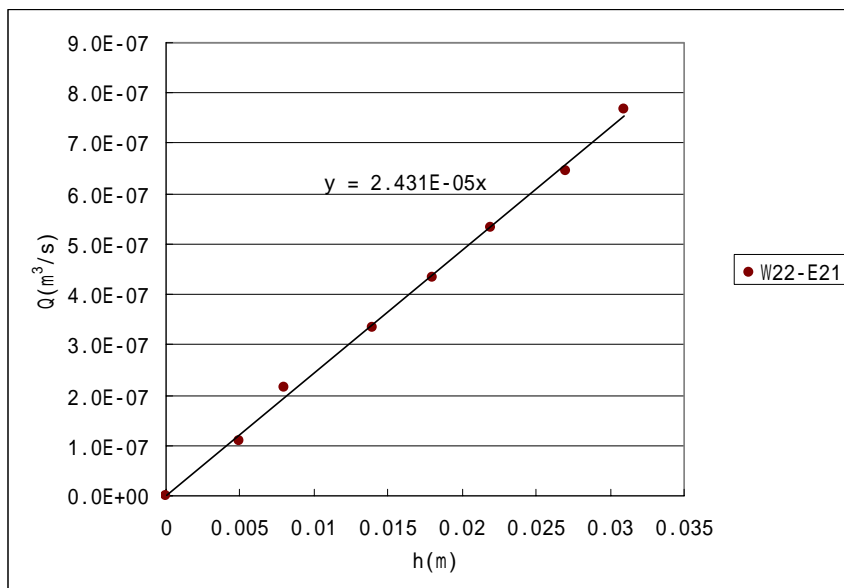


図 3.2-5 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-5)

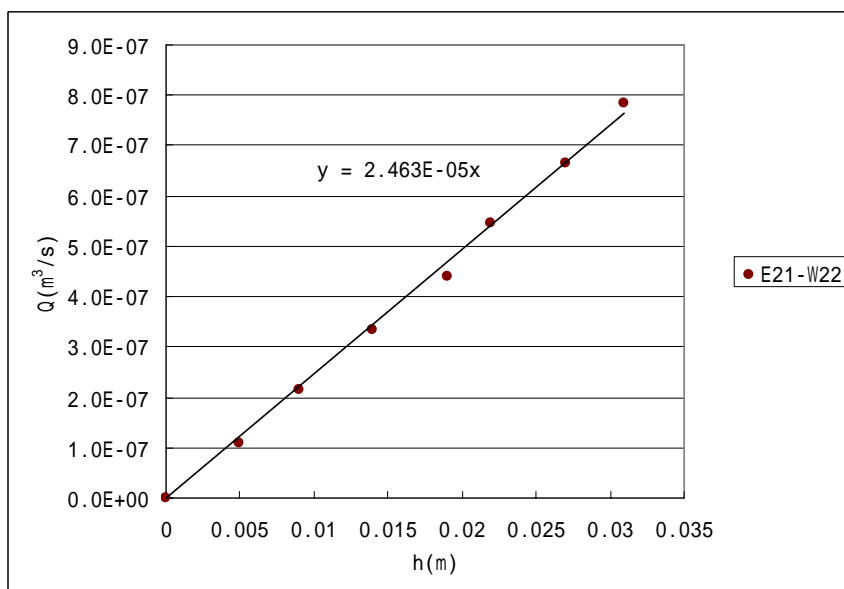


図 3.2-6 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-6)

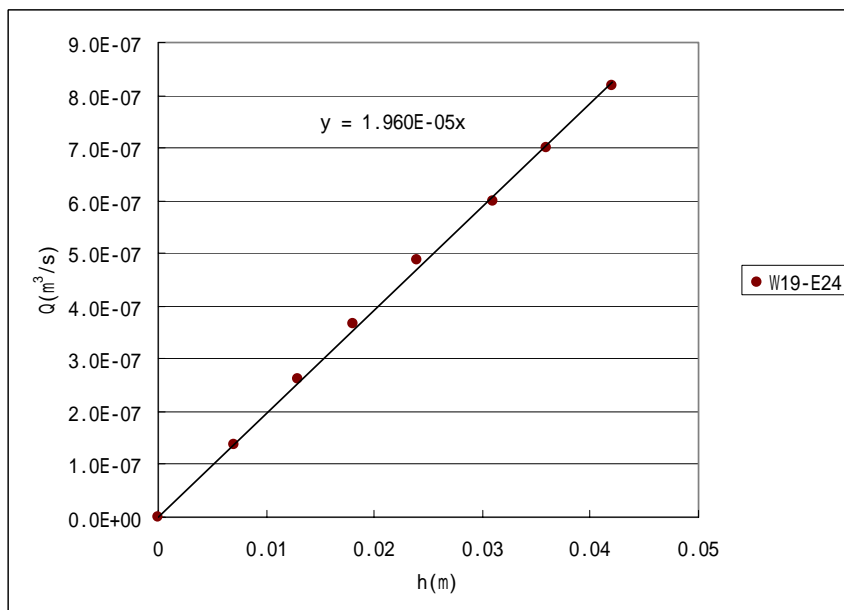


図 3.2-7 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-7)

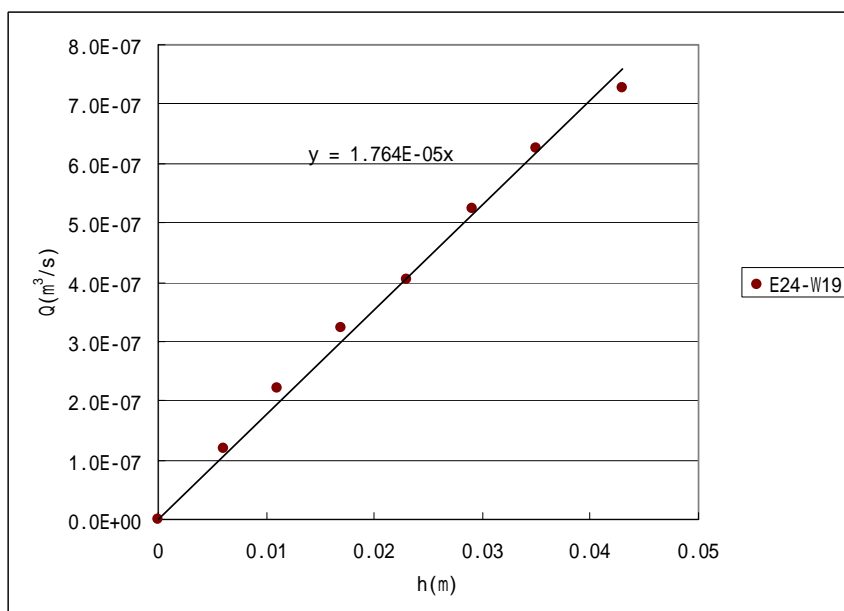


図 3.2-8 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-8)

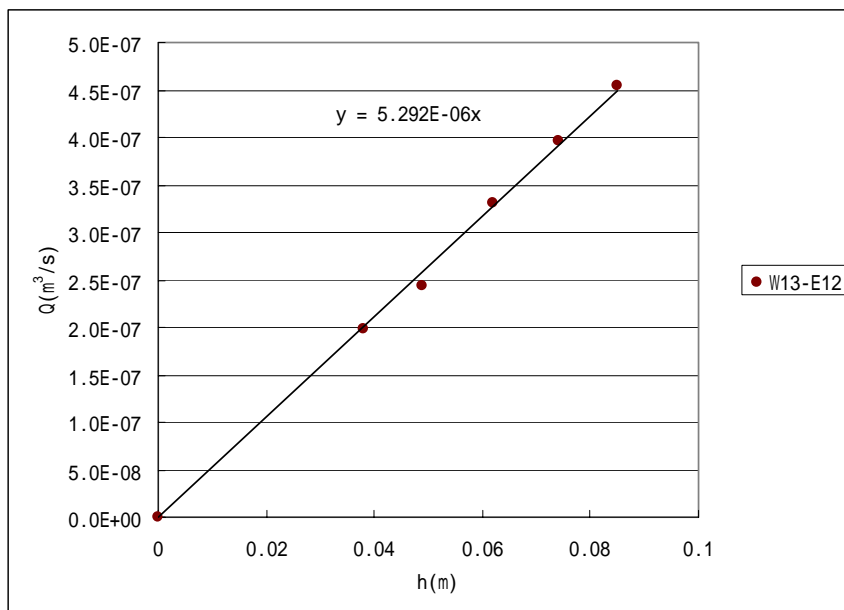


図 3.2-9 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-9)

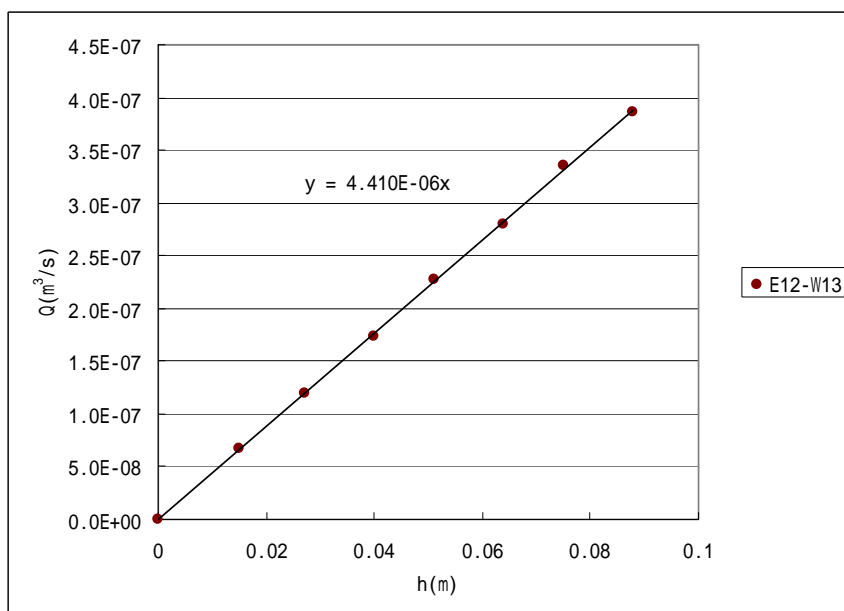


図 3.2-10 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-10)

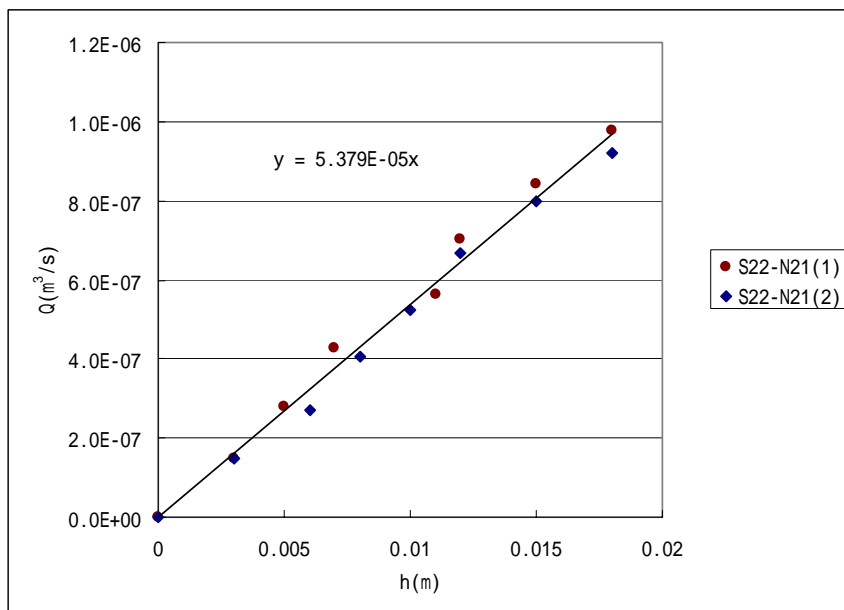


図 3.2-11 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-11)

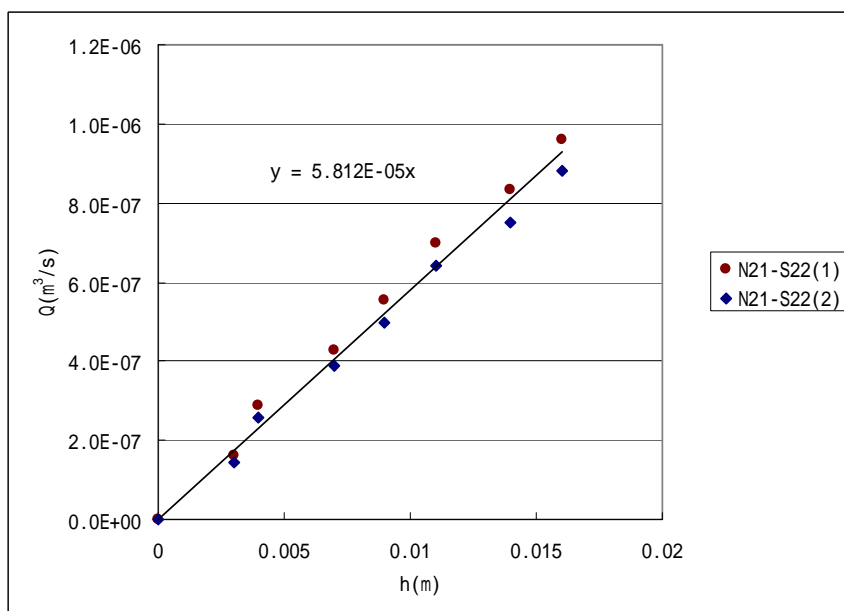


図 3.2-12 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-12)

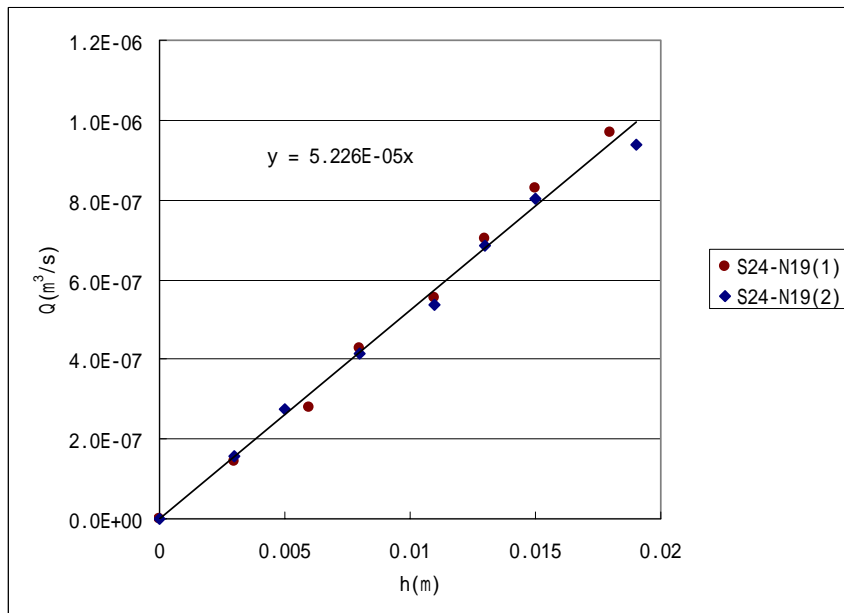


図 3.2-13 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-13)

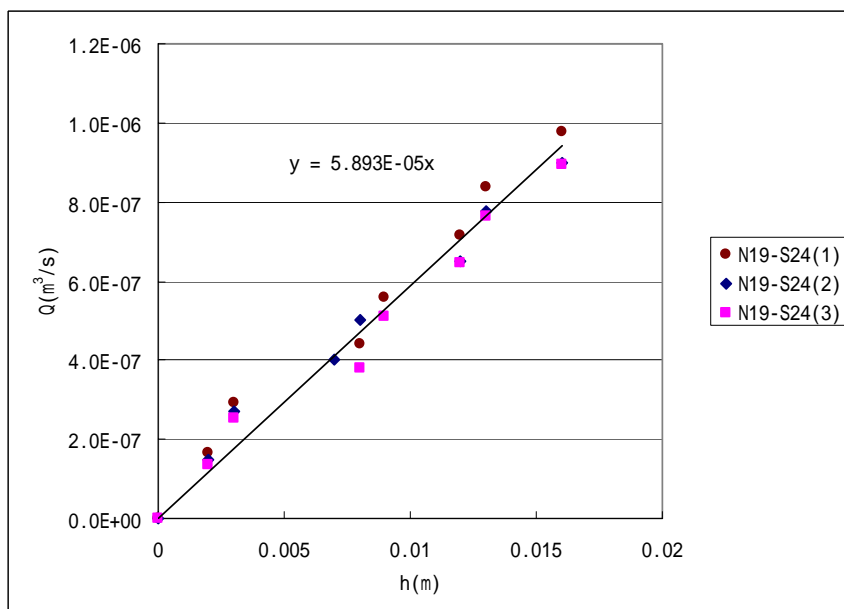


図 3.2-14 対面するセルの水頭差と流量の関係(ケース 2-14)

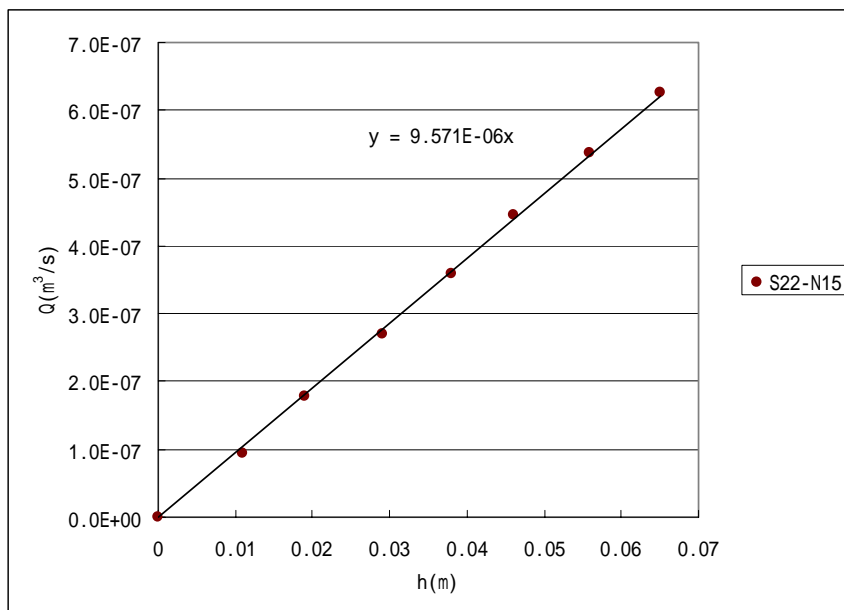


図 3.2-15 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-15)

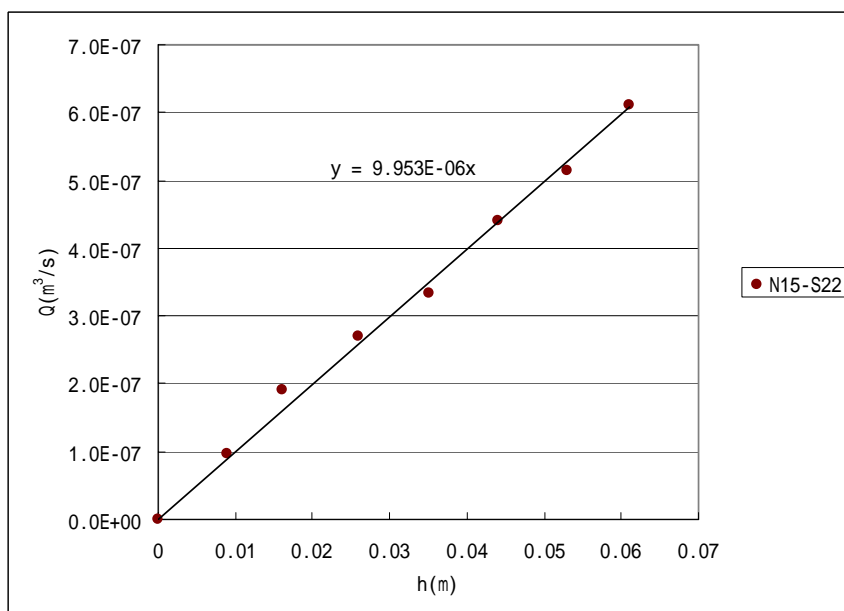


図 3.2-16 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-16)

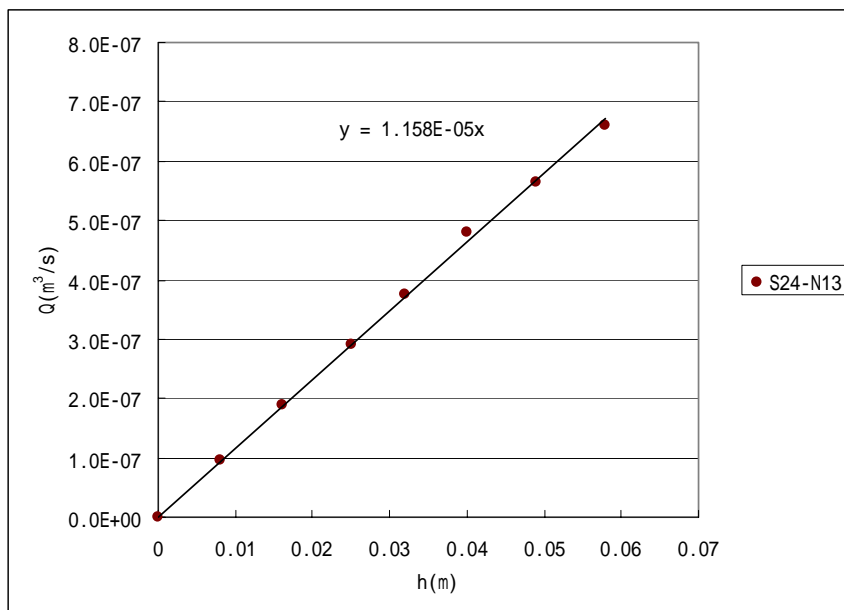


図 3.2-17 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-17)

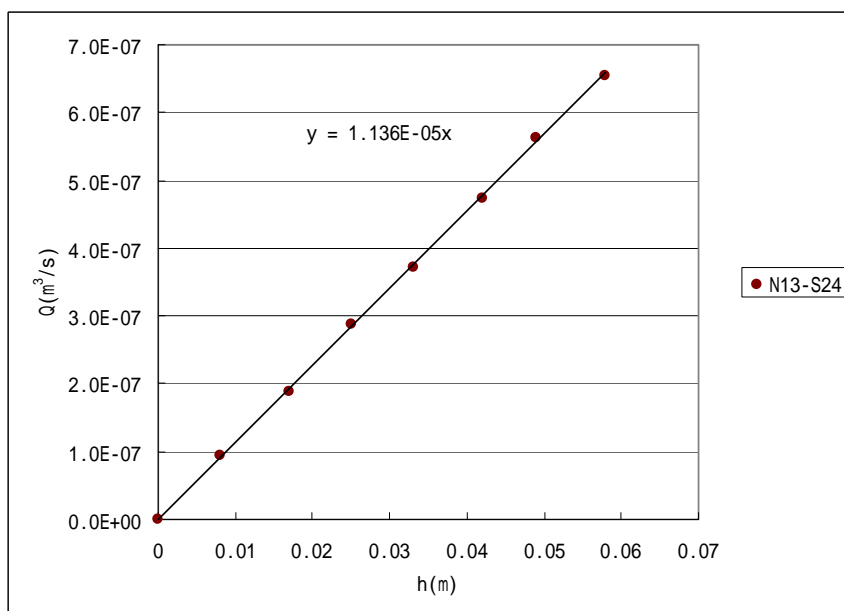


図 3.2-18 対面するセル間の水頭差と流量の関係(ケース 2-18)

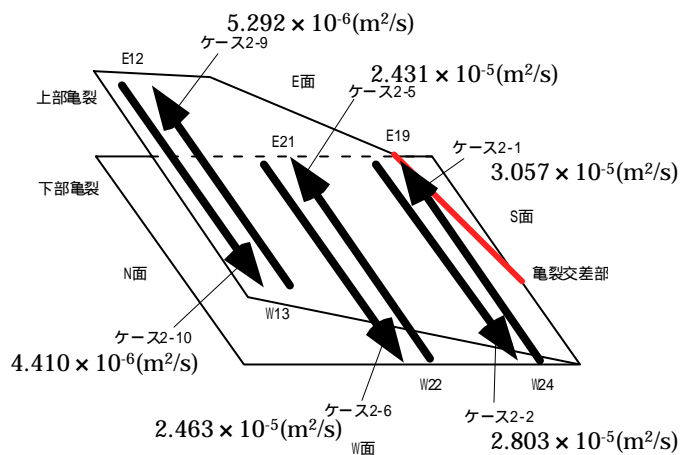


図 3.2-19 水頭差と流量の関係(ケース 2-1,2-2,2-5,2-6,2-9,2-10)

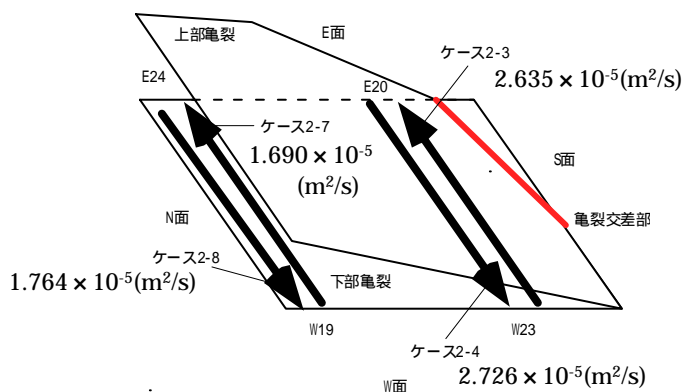


図 3.2-20 水頭差と流量の関係(ケース 2-3,2-4,2-7,2-8)

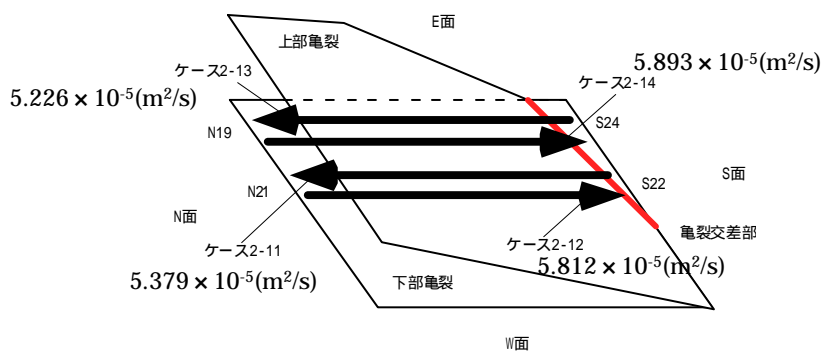


図 3.2-21 水頭差と流量の関係(ケース 2-11 ~ 2-14)

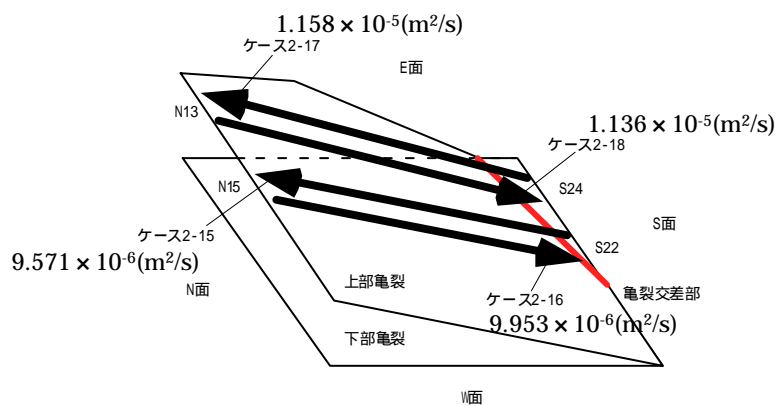


図 3.2-22 水頭差と流量の関係(ケース 2-15 ~ 2-18)

3.3 亀裂交差部と同一流路長セル間の透水試験結果

亀裂交差部に沿った方向(1セル対1セル間)と、亀裂交差部と同一流路長(1セル対1セル間)を対象とした透水試験(ケース 3-1~3-16)について、注水流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ と注排水セル間水頭差 $h(\text{m})$ の関係を、図 3.3-1~3.3-16 に示す。ケース 3-1、3-2、3-3 は、測定を複数回行っている。また、各ケースの水頭差と流量の傾き(Q/h)を、表 3.3-1、図 3.3-17~3.3-19 に示す。

表 3.3-1、図 3.3-17~3.3-19 より、注水と排水の方向が逆のケースで、水頭差と流量の傾き(Q/h)がほぼ等しいことが分かる。これより、注水と排水の方向を逆にしても、流体の流路は同じであると考えられる。

ケース 3-1~3-4、3-13、3-14 は、下部亀裂の E 面側で透水試験を行っている。図 3.3-17~3.3-19 より、下部亀裂 E 面側は他の場所よりも流量が大きい。特に亀裂交差部に沿った方向(ケース 3-1、3-2)の流量が、他の場所に比べ大きいことが分かる。

ケース 3-5、3-6 も、下部亀裂の E 面側で透水試験を行っている。しかし上記のケース 3-1~3-4、3-13、3-14 に比べ、流量が少ない。ケース 3-5、3-6 の N22-E24 セル間に、下部亀裂の E 面側に比べ流体の流れにくい箇所が存在すると思われる。

ケース 3-7~3-12 は、上部亀裂で透水試験を行っている。図 3.3-17~3.3-19 より、上部亀裂 N 面側(ケース 3-7~3-10)は他の場所に比べ、特に流量が小さい。上部亀裂は下部亀裂に比べ流量が小さいことが分かる。また、ケース 3-11、3-12 は流路に下部亀裂を含むため、上部亀裂の他の場所よりも流体が流れやすいと考える。

亀裂交差部に沿った方向と、亀裂交差部と同一流路長のセル間で行った透水試験より、亀裂交差部の流量が最も大きいことが分かった。次に流量が大きい箇所は下部亀裂 E 面側の交差亀裂部付近であった。また、上部亀裂は下部亀裂に比べ流量が少なかった。

表 3.3-1 水頭差と流量の傾き(亀裂交差部と同一流路長セル間)

ケース	注水セル	排水セル	Q(m ³ /s)/ h(m)
3-1	S21	E19	1.316 × 10 ⁻⁴
3-2	E19	S21	1.054 × 10 ⁻⁴
3-3	E21	N19	7.448 × 10 ⁻⁵
3-4	N19	E21	9.356 × 10 ⁻⁵
3-5	N22	E24	3.653 × 10 ⁻⁵
3-6	E24	N22	3.442 × 10 ⁻⁵
3-7	W22	N18	7.498 × 10 ⁻⁶
3-8	N18	W22	6.677 × 10 ⁻⁶
3-9	N16	E12	7.145 × 10 ⁻⁶
3-10	E12	N16	5.712 × 10 ⁻⁶
3-11	E16	S24	2.324 × 10 ⁻⁵
3-12	S24	E16	2.466 × 10 ⁻⁵
3-13	E22	S24	9.106 × 10 ⁻⁵
3-14	S24	E22	1.040 × 10 ⁻⁴
3-15	W24	S22	3.596 × 10 ⁻⁵
3-16	S22	W24	3.843 × 10 ⁻⁵

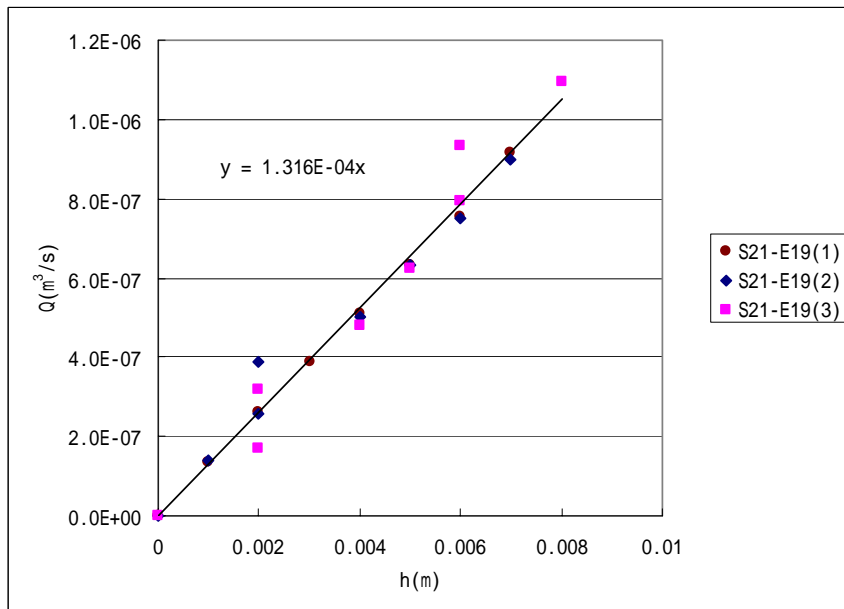


図 3.3-1 亀裂交差部の水頭差と流量の関係(ケース 3-1)

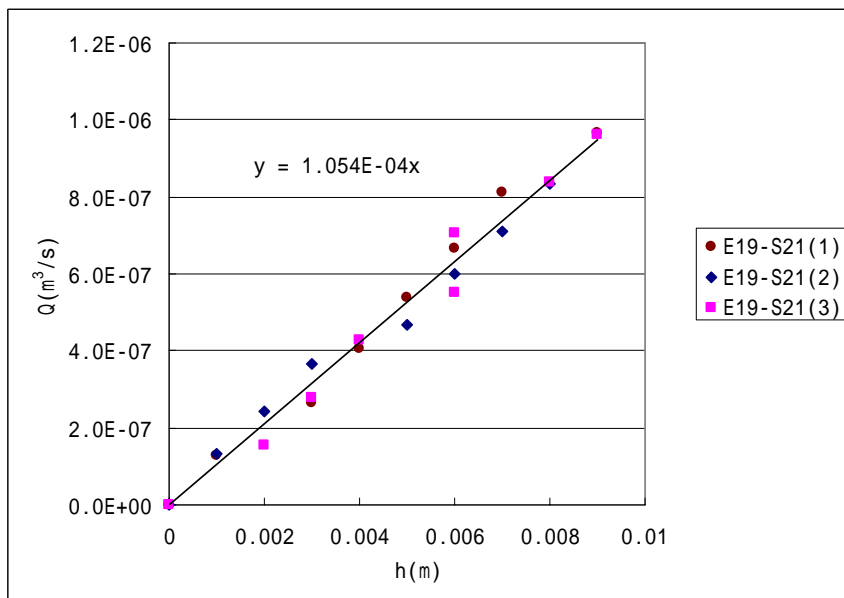


図 3.3-2 亀裂交差部の水頭差と流量の関係(ケース 3-2)

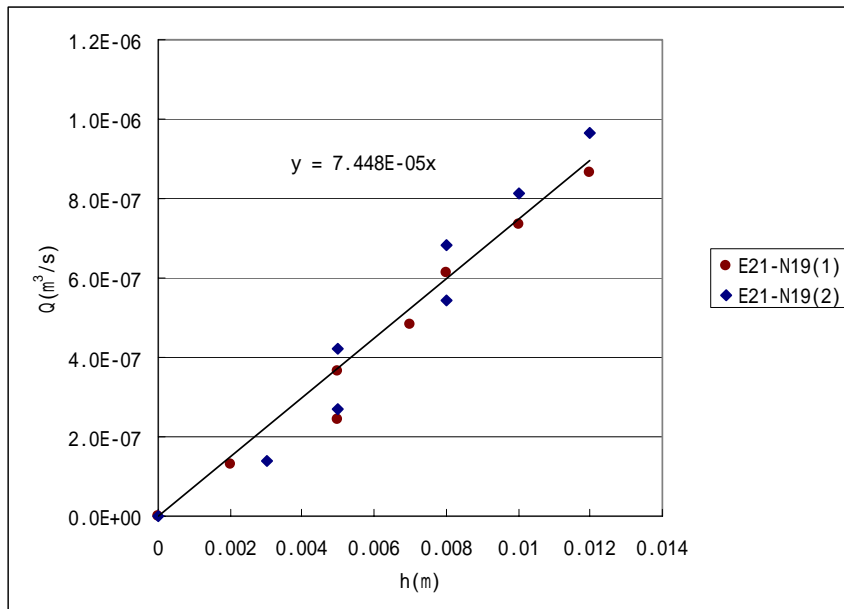


図 3.3-3 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-3)

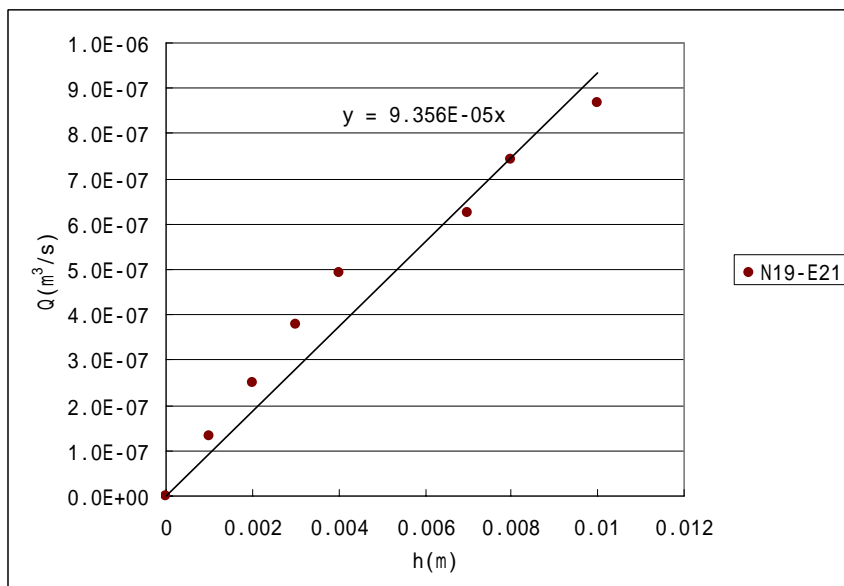


図 3.3-4 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-4)

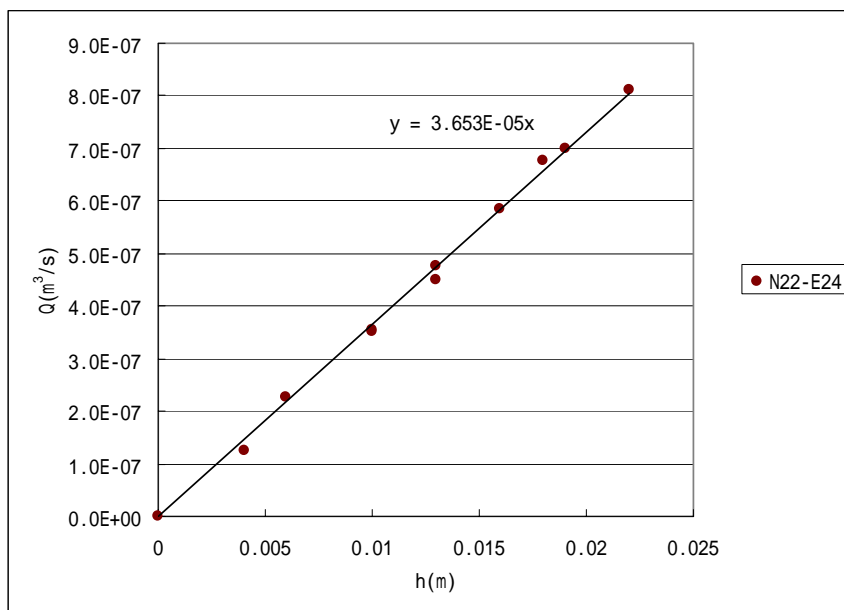


図 3.3-5 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-5)

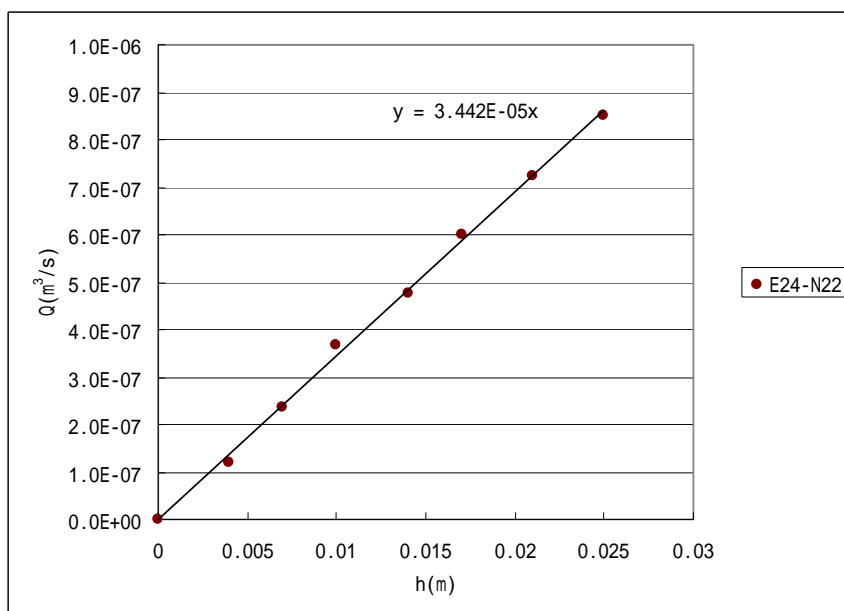


図 3.3-6 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-6)

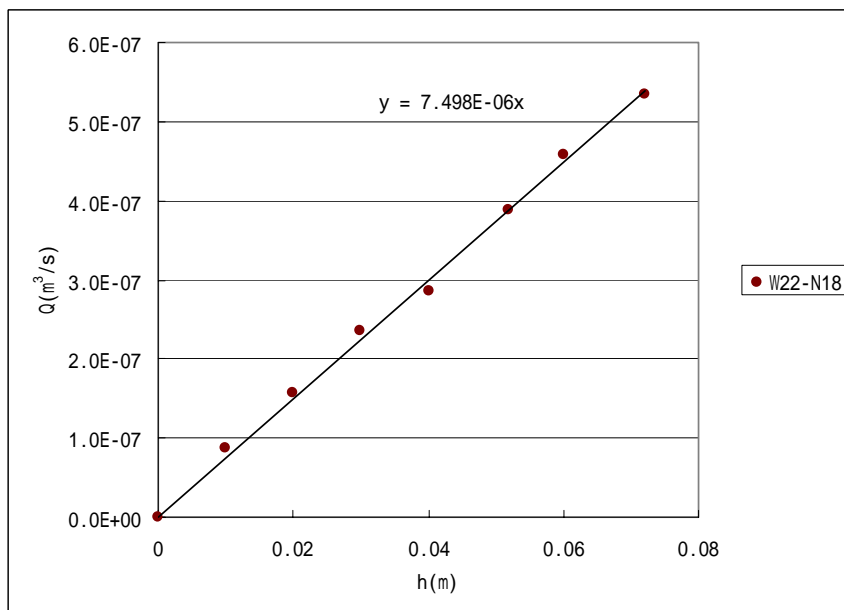


図 3.3-7 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-7)

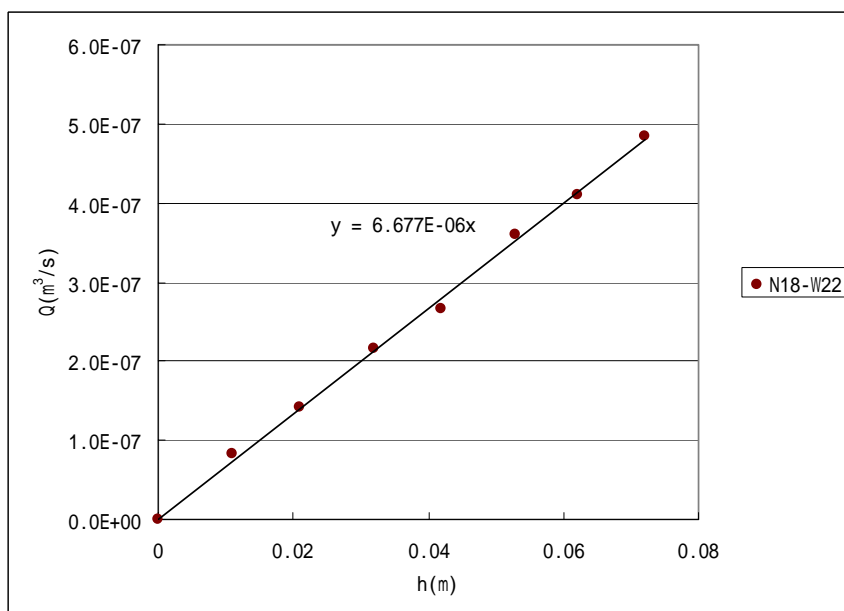


図 3.3-8 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-8)

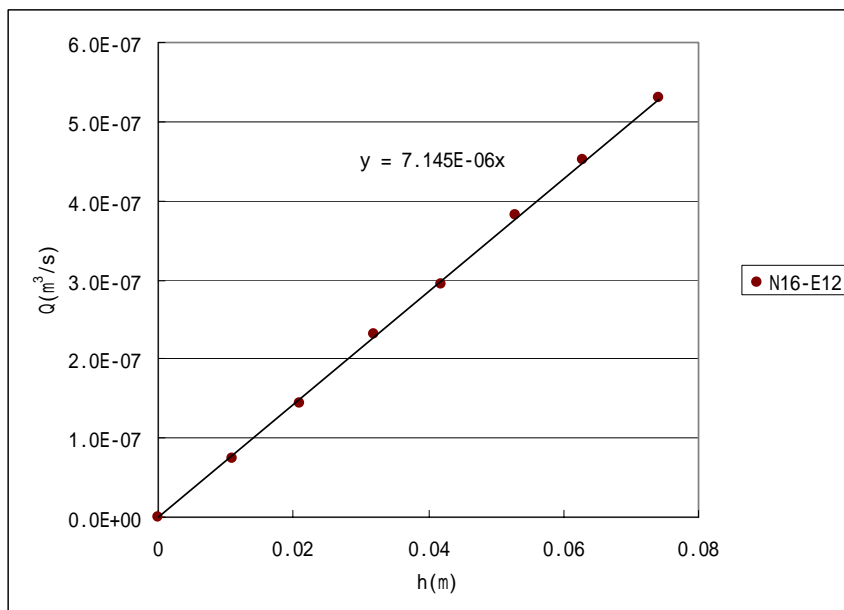


図 3.3-9 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-9)

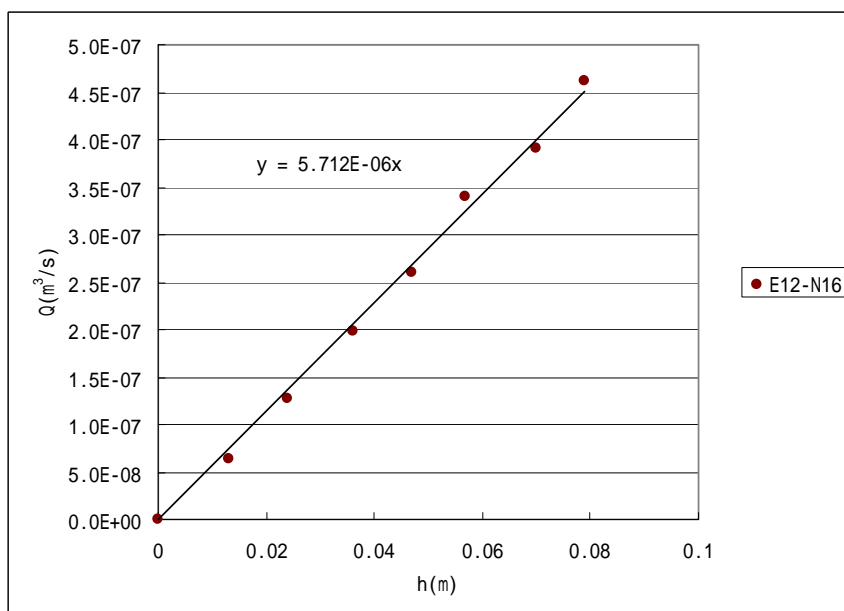


図 3.3-10 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-10)

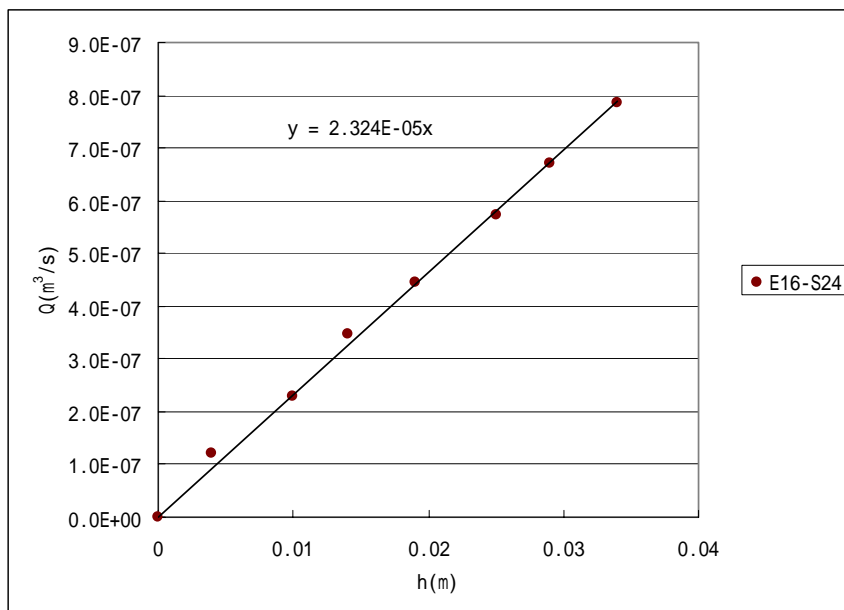


図 3.3-11 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-11)

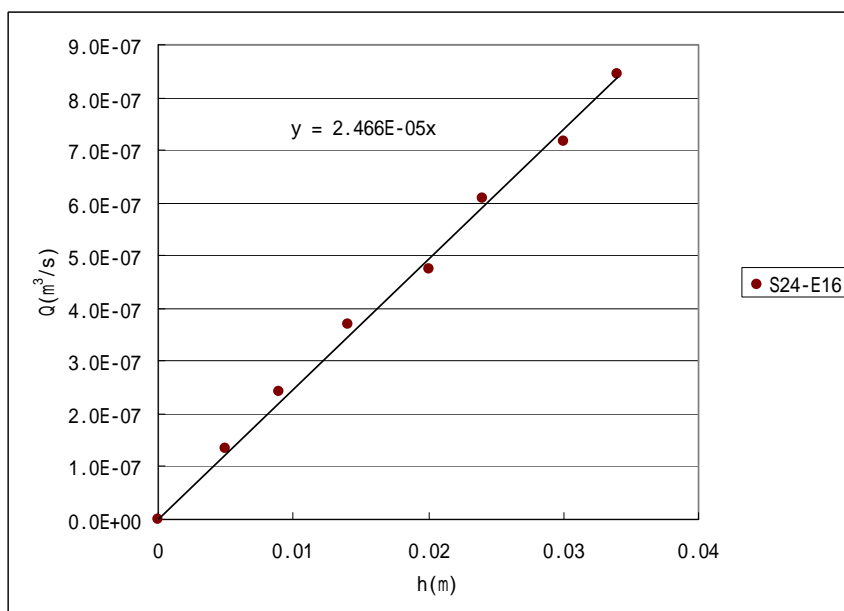


図 3.3-12 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-12)

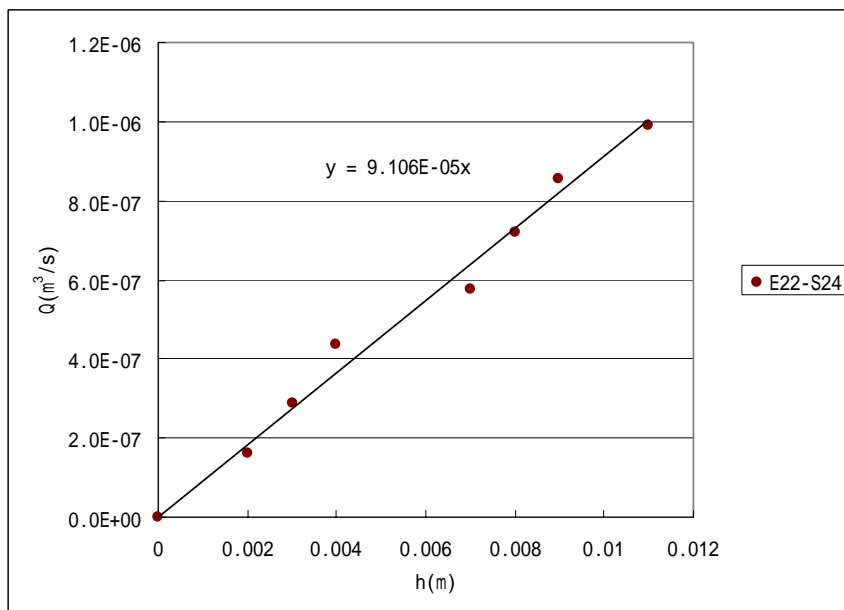


図 3.3-13 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-13)

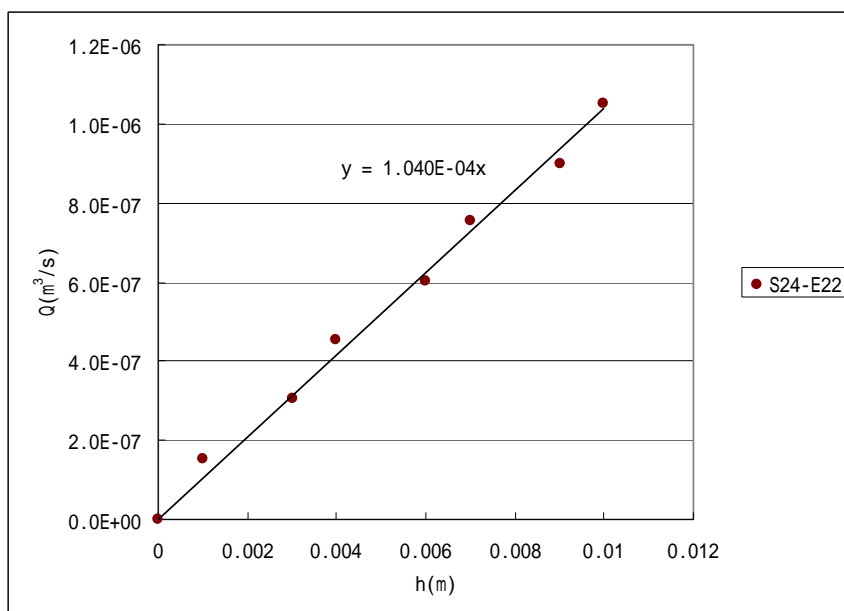


図 3.3-14 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-14)

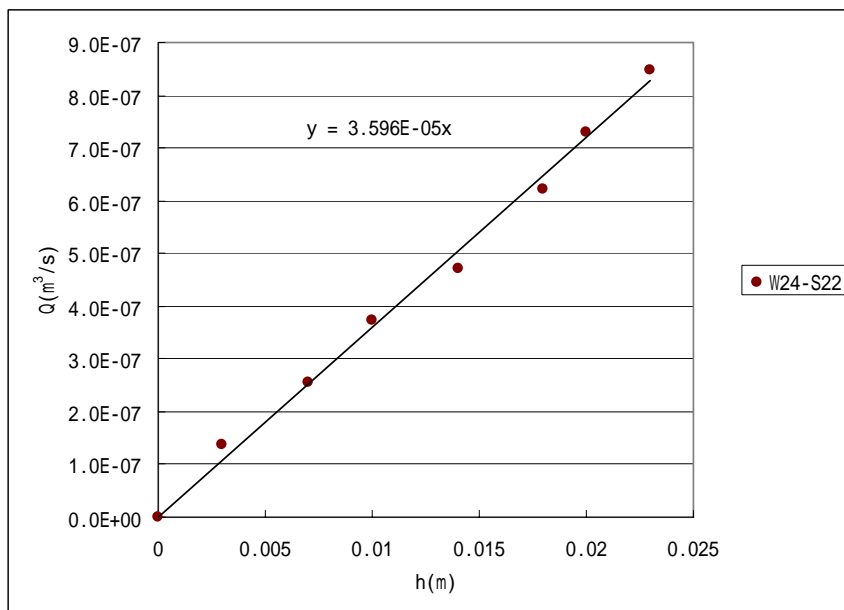


図 3.3-15 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-15)

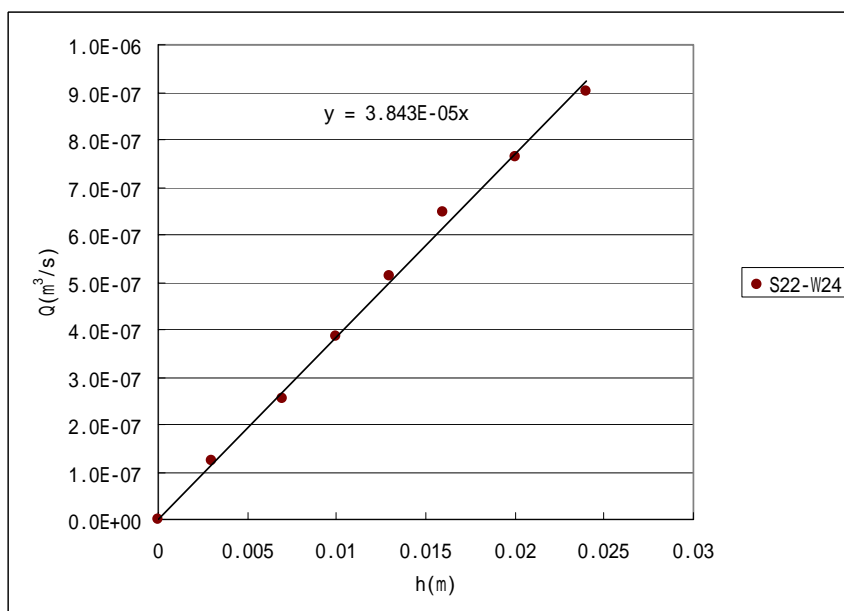


図 3.3-16 亀裂交差部と同一流路長セル間の水頭差と流量の関係(ケース 3-16)

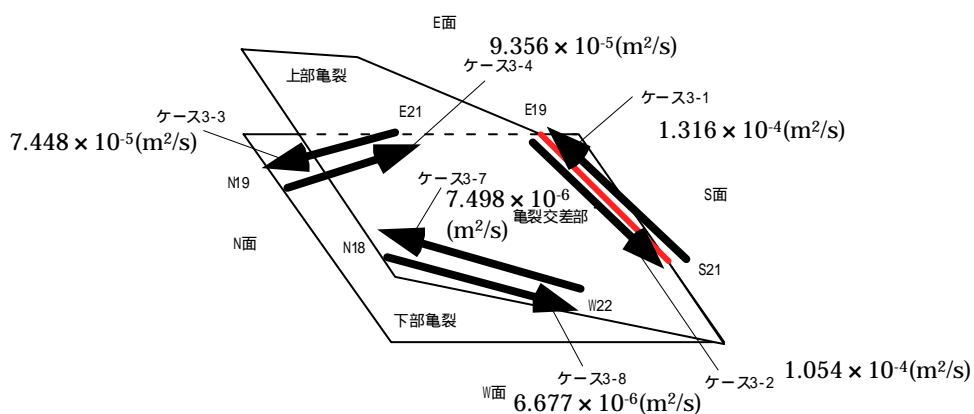


図 3.3-17 水頭差と流量の関係(ケース 3-1 ~ 3-4,3-7,3-8)

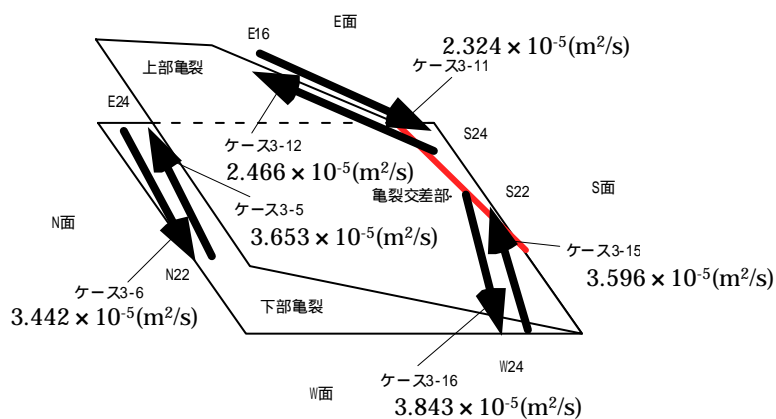


図 3.3-18 水頭差と流量の関係(ケース 3-5,3-6,3-11,3-12,3-15,3-16)

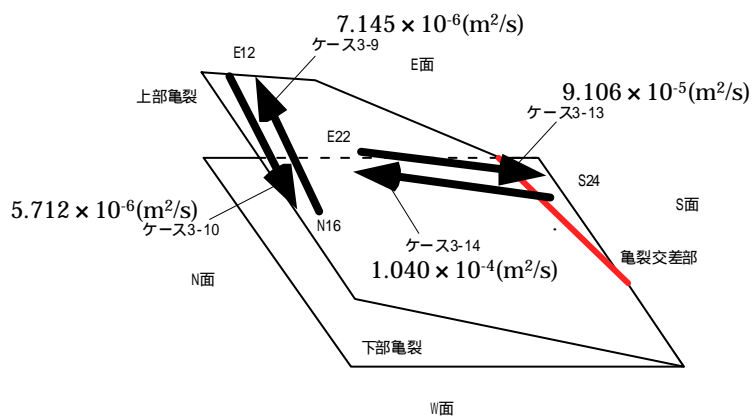


図 3.3-19 水頭差と流量の関係(ケース 3-9,3-10,3-13,3-14)

4 考察

4.1 高粘性流体の液温と粘性係数の関係

回転粘度計を用い、10～20()付近で高粘性流体の粘性係数を測定した。図 4.1-1 に、高粘性流体 0.2(wt%)および水の粘性係数と温度の関係を示す。図 4.1-1 の水の粘性係数は、10()と20()の値を用いた〔5〕。

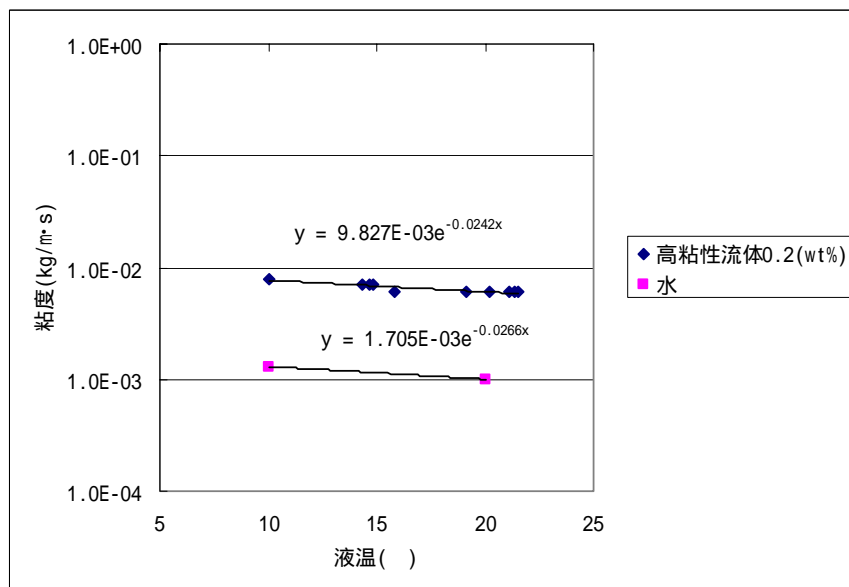


図 4.1-1 高粘性流体(0.2(wt%))の温度と粘性係数の関係

図 4.1-1 より、高粘性流体(0.2(wt%))の粘性係数と温度の関係は式(4.1-1)、水の粘性係数と温度の関係は式(4.1-2)に近似できる。

$$\mu = 9.827 \times 10^{-3} e^{-0.0242Te} \quad (4.1-1)$$

$$\mu_w = 1.705 \times 10^{-3} e^{-0.0266Te} \quad (4.1-2)$$

μ : 粘性係数(kg/m·s)、 μ_w : 水の粘性係数(kg/m·s)、 Te : 液温()

高粘性流体(0.2(wt%))の粘性係数と温度の式(4.1-1)を式(2.1-5)の形に変形すると、式(4.1-3)となる。同様に水の粘性係数と温度の式(4.1-2)を式(2.1-5)の形に変形すると、式(4.1-4)となる。

$$\log_{10} \mu = -2.008 - 0.0105 \times Te \quad (4.1-3)$$

$$\log_{10} \mu_w = -2.769 - 0.0115 \times Te \quad (4.1-4)$$

式(4.1-3)、式(4.1-4)より、温度による粘性係数の変化率(勾配 B)は、高粘性流体(0.2(wt%))で 0.0105、水で 0.0115 である。これより、高粘性流体(0.2(wt%))の温度変化による粘性係数の変化率は、水の場合とほぼ同じ値であることが分かった。また、この変化率(勾配 B)は、油などに比べるとはるかに小さい〔4〕。試験で使用した高粘性流体(0.2(wt%))は、温度変化の影響を受けにくいいため、液温による流体粘度の補正は必ずしも必要ではないと考える。

4.2 透水量係数、亀裂開口幅の計算

表 3.1-1 ~ 3.3-1 の近似式の傾き(Q/ h)より、水の粘性に換算した透水量係数 T_w 、亀裂開口幅 b を求めた。

水の粘性に換算した透水量係数 T_w は、ダルシー則より求めた式(4.2-1)、(4.2-2)を使用して求めた。その後、亀裂開口幅 b を三乗則の変形式(4.2-3)を使用して求めた。

$$T_w = T \frac{\mu}{\mu_w} \quad (4.2-1)$$

$$T = K \cdot b = \frac{Q}{\Delta h} \cdot \frac{L}{w} \quad (4.2-2)$$

$$b = \sqrt[3]{T_w \frac{12\mu_w}{\rho_w g}} = \sqrt[3]{\frac{Q}{\Delta h} \cdot \frac{L}{w} \cdot \frac{12\mu}{\rho_w g}} \quad (4.2-3)$$

T_w : 水に換算した時の透水量係数(m²/s)、 w : 水の密度(kg/m³)

μ_w : 水の粘性係数(kg/m·s)

粘性係数 μ および水の粘性係数 μ_w は、式(4.1-1)、式(4.1-2)を用いて計算した。粘性係数、水の粘性係数を計算する際に用いる液温 T_e は、試験時に排水側で測定した最大液温と最小液温の中間の値を使用した。また、高粘性流体の密度は水の密度とほぼ同じであることから、 $\rho_w = 1000$ (kg/m³)とした。亀裂面全体を対象とした透水試験(ケース 1-1 ~ 1-12)では、流体の流れ方向の長さ L (m)、流体の流れ方向と垂直方向の長さ w (m)を、岩体の1辺の長さである 0.5 m と仮定した。対面するセル間の透水試験(ケース 2-1 ~ 2-18)および亀裂交差部と同一流路長セル間の透水試験(ケース 3-1 ~ 3-16)では、流体の流れ方向の長さ L (m)を注排水セル間の距離とし、流体の流れ方向と垂直方向の長さ w (m)はセルの幅である 0.5/6 m と仮定した。

水の粘性に換算した透水量係数 T_w の計算結果を、表 4.2-1 ~ 4.2-3 に、亀裂開口幅 b の計算結果を、表 4.2-4 ~ 4.2-6 に示す。また、各ケースの水に換算した透水量係数を、図 4.2-1~4.2-13 に示す。

表 4.2-1 ~ 4.2-3、図 4.2-1~4.2-13 より、注水と排水の方向が逆の場合でも、透水量係数がほぼ等しい。これより、注水と排水の方向を逆にしても、流体の流路は同じであると考えられる。

図 4.2-1~4.2-13 より 1 セル対 1 セル間の透水量係数(ケース 2-1 ~ 2-18、3-1 ~ 3-16)は、亀裂

面全体の透水量係数(ケース 1-1 ~ 1-12)に比べ、全体的に大きな値を示している。1セル対1セル間の透水試験では、流体の流れ方向と垂直方向の長さ w (m)はセルの幅である 0.5/6(m)と仮定した。しかし、亀裂内の流れの幅はセルの幅よりも広がると考えられる。このため1セル対1セル間の透水試験では流量が大きくなり、透水量係数が亀裂面全体のケースに比べ大きな値になったと考える。1セル対1セル間の透水試験の結果は、亀裂内部の透水性を比較するために用いる。

図 4.2-7~4.2-13 より、亀裂内で透水量係数が大きい場所はケース 2-11 ~ 2-14、3-1 ~ 3-4、3-13、3-14 であり、下部亀裂のE面側に集中している。この下部亀裂のE面側には亀裂交差部があり、最も透水量係数が大きい場所は亀裂交差部(ケース 3-1、3-2)であった。これより亀裂交差部およびその近傍が、物質の重要な移行経路になっている可能性が強いと考える。また流体は、亀裂内である限られた部分を選択的に流れると考える。

表 4.2-1 水に換算した透水量係数(亀裂面全体)

ケース	注水セル	排水セル	水に換算した透水量係数 T_w (m^2/s)		
			平均値	最大値	最小値
1-1	N13~18	S19~24	0.686×10^{-4}	0.818×10^{-4}	0.639×10^{-4}
1-2	S19~24	N13~18	0.679×10^{-4}	0.785×10^{-4}	0.639×10^{-4}
1-3	N19~24	S19~24	2.868×10^{-4}	4.074×10^{-4}	2.082×10^{-4}
1-4	S19~24	N19~24	3.160×10^{-4}	4.278×10^{-4}	2.315×10^{-4}
1-5	S19~24	N13~18 N19~24	3.412×10^{-4}	4.643×10^{-4}	2.581×10^{-4}
1-6	N13~18 N19~24	S19~24	3.154×10^{-4}	4.502×10^{-4}	2.344×10^{-4}
1-7	W13,14 W20~24	E12 E15~17 E19~21	1.641×10^{-4}	2.151×10^{-4}	1.359×10^{-4}
1-8	E12 E15~17 E19~21	W13,14 W20~24	1.586×10^{-4}	2.116×10^{-4}	1.160×10^{-4}
1-9	W19~24	E19~24	1.543×10^{-4}	1.853×10^{-4}	1.347×10^{-4}
1-10	E19~24	W19~24	1.552×10^{-4}	1.828×10^{-4}	1.386×10^{-4}
1-11	W13,14 W19~24	E12 E15~17 E19~24	1.719×10^{-4}	2.095×10^{-4}	1.516×10^{-4}
1-12	E12 E15~17 E19~24	W13,14 W19~24	1.622×10^{-4}	1.984×10^{-4}	1.351×10^{-4}

(亀裂長さ $L=0.5$ (m)、亀裂開口長さ $w=0.5$ (m)と仮定)

表 4.2-2 水に換算した透水量係数(対面するセル間)

ケース	注水セル	排水セル	水に換算した透水量係数 T(m ² /s)
2-1	W24	E19	1.115 × 10 ⁻³
2-2	E19	W24	1.018 × 10 ⁻³
2-3	W23	E20	0.951 × 10 ⁻³
2-4	E20	W23	0.991 × 10 ⁻³
2-5	W22	E21	0.884 × 10 ⁻³
2-6	E21	W22	0.897 × 10 ⁻³
2-7	W19	E24	0.722 × 10 ⁻³
2-8	E24	W19	0.640 × 10 ⁻³
2-9	W13	E12	0.197 × 10 ⁻³
2-10	E12	W13	0.162 × 10 ⁻³
2-11	S22	N21	1.960 × 10 ⁻³
2-12	N21	S22	2.110 × 10 ⁻³
2-13	S24	N19	1.906 × 10 ⁻³
2-14	N19	S24	2.142 × 10 ⁻³
2-15	S22	N15	0.355 × 10 ⁻³
2-16	N15	S22	0.368 × 10 ⁻³
2-17	S24	N13	0.430 × 10 ⁻³
2-18	N13	S24	0.421 × 10 ⁻³

(亀裂長さ L は注排水セル間の距離、亀裂開口長さ w=0.5/6(m)と仮定)

表 4.2-3 水に換算した透水量係数(亀裂交差部と同一流路長セル間)

ケース	注水セル	排水セル	水に換算した透水量係数 T(m ² /s)
3-1	S21	E19	2.828 × 10 ⁻³
3-2	E19	S21	2.251 × 10 ⁻³
3-3	E21	N19	1.598 × 10 ⁻³
3-4	N19	E21	1.997 × 10 ⁻³
3-5	N22	E24	0.782 × 10 ⁻³
3-6	E24	N22	0.740 × 10 ⁻³
3-7	W22	N18	0.168 × 10 ⁻³
3-8	N18	W22	0.148 × 10 ⁻³
3-9	N16	E12	0.161 × 10 ⁻³
3-10	E12	N16	0.127 × 10 ⁻³
3-11	E16	S24	0.516 × 10 ⁻³
3-12	S24	E16	0.553 × 10 ⁻³
3-13	E22	S24	1.953 × 10 ⁻³
3-14	S24	E22	2.250 × 10 ⁻³
3-15	W24	S22	0.768 × 10 ⁻³
3-16	S22	W24	0.827 × 10 ⁻³

(亀裂長さ L は注排水セル間の距離、亀裂開口長さ w=0.5/6(m)と仮定)

表 4.2-4 亀裂開口幅(亀裂面全体)

ケース	注水セル	排水セル	亀裂開口幅 b(m)		
			平均値	最大値	最小値
1-1	N13~18	S19~24	0.451×10^{-3}	0.479×10^{-3}	0.441×10^{-3}
1-2	S19~24	N13~18	0.454×10^{-3}	0.477×10^{-3}	0.445×10^{-3}
1-3	N19~24	S19~24	0.739×10^{-3}	0.831×10^{-3}	0.664×10^{-3}
1-4	S19~24	N19~24	0.730×10^{-3}	0.808×10^{-3}	0.658×10^{-3}
1-5	S19~24	N13~18 N19~24	0.773×10^{-3}	0.857×10^{-3}	0.704×10^{-3}
1-6	N13~18 N19~24	S19~24	0.771×10^{-3}	0.868×10^{-3}	0.698×10^{-3}
1-7	W13,14 W20~24	E12 E15~17 E19~21	0.602×10^{-3}	0.659×10^{-3}	0.566×10^{-3}
1-8	E12 E15~17 E19~21	W13,14 W20~24	0.609×10^{-3}	0.671×10^{-3}	0.549×10^{-3}
1-9	W19~24	E19~24	0.607×10^{-3}	0.645×10^{-3}	0.580×10^{-3}
1-10	E19~24	W19~24	0.605×10^{-3}	0.639×10^{-3}	0.582×10^{-3}
1-11	W13,14 W19~24	E12 E15~17 E19~24	0.621×10^{-3}	0.664×10^{-3}	0.596×10^{-3}
1-12	E12 E15~17 E19~24	W13,14 W19~24	0.610×10^{-3}	0.653×10^{-3}	0.574×10^{-3}

(亀裂長さ L=0.5(m)、亀裂開口長さ w=0.5(m)と仮定)

表 4.2-5 亀裂開口幅(対面するセル間)

ケース	注水セル	排水セル	亀裂開口幅 b(m)
2-1	W24	E19	1.106×10^{-3}
2-2	E19	W24	1.092×10^{-3}
2-3	W23	E20	1.090×10^{-3}
2-4	E20	W23	1.079×10^{-3}
2-5	W22	E21	1.036×10^{-3}
2-6	E21	W22	1.034×10^{-3}
2-7	W19	E24	0.925×10^{-3}
2-8	E24	W19	0.938×10^{-3}
2-9	W13	E12	0.602×10^{-3}
2-10	E12	W13	0.593×10^{-3}
2-11	S22	N21	1.341×10^{-3}
2-12	N21	S22	1.393×10^{-3}
2-13	S24	N19	1.324×10^{-3}
2-14	N19	S24	1.394×10^{-3}
2-15	S22	N15	0.745×10^{-3}
2-16	N15	S22	0.764×10^{-3}
2-17	S24	N13	0.791×10^{-3}
2-18	N13	S24	0.795×10^{-3}

(亀裂長さ L は注排水セル間の距離、亀裂開口長さ $w=0.5/6(m)$ と仮定)

表 4.2-6 亀裂開口幅(亀裂交差部と同一流路長セル間)

ケース	注水セル	排水セル	亀裂開口幅 b(m)
3-1	S21	E19	1.511×10^{-3}
3-2	E19	S21	1.432×10^{-3}
3-3	E21	N19	1.257×10^{-3}
3-4	N19	E21	1.380×10^{-3}
3-5	N22	E24	0.998×10^{-3}
3-6	E24	N22	0.966×10^{-3}
3-7	W22	N18	0.584×10^{-3}
3-8	N18	W22	0.577×10^{-3}
3-9	N16	E12	0.567×10^{-3}
3-10	E12	N16	0.544×10^{-3}
3-11	E16	S24	0.873×10^{-3}
3-12	S24	E16	0.863×10^{-3}
3-13	E22	S24	1.345×10^{-3}
3-14	S24	E22	1.366×10^{-3}
3-15	W24	S22	1.002×10^{-3}
3-16	S22	W24	0.997×10^{-3}

(亀裂長さ L は注排水セル間の距離、亀裂開口長さ $w=0.5/6(m)$ と仮定)

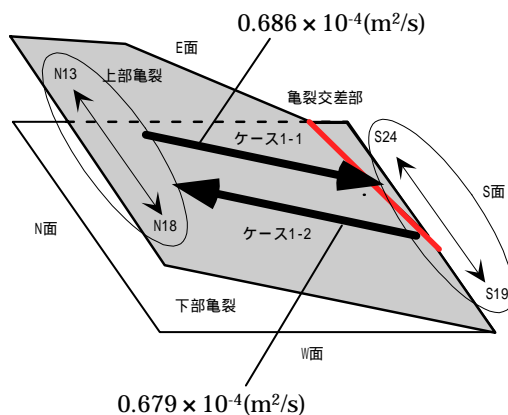


図 4.2-1 水に換算した透水量係数(ケース 1-1,1-2)

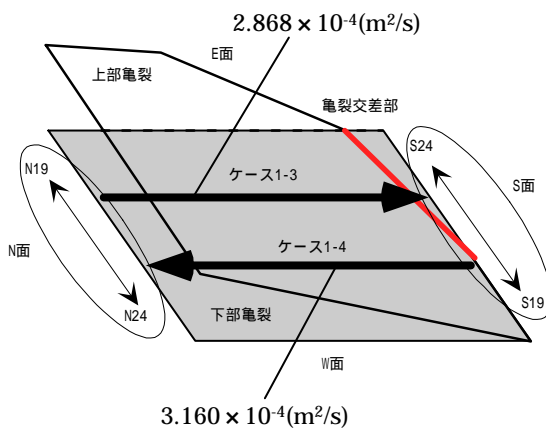


図 4.2-2 水に換算した透水量係数(ケース 1-3,1-4)

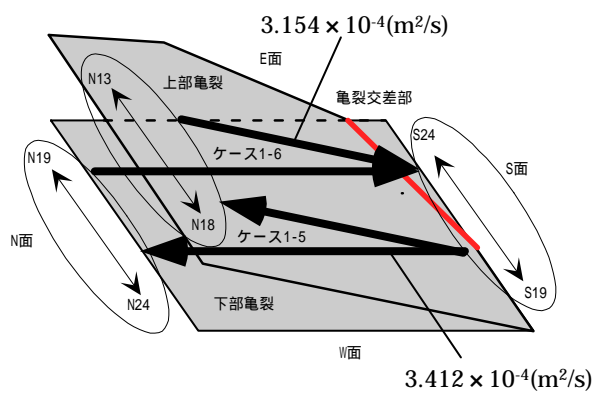


図 4.2-3 水に換算した透水量係数(ケース 1-5,1-6)

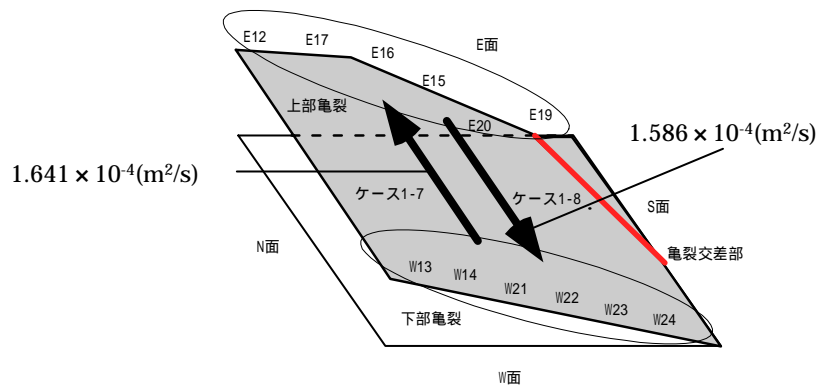


図 4.2-4 水に換算した透水量係数(ケース 1-7,1-8)

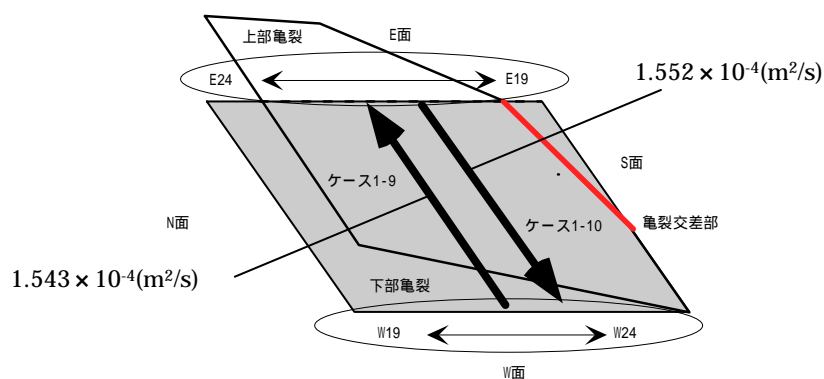


図 4.2-5 水に換算した透水量係数(ケース 1-9,1-10)

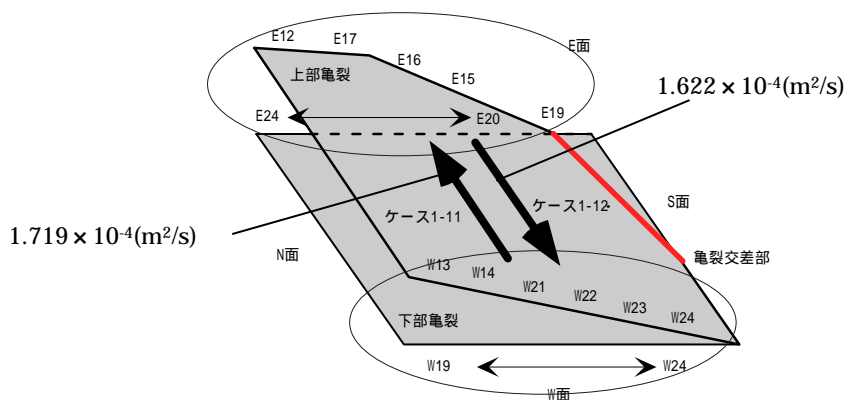


図 4.2-6 水に換算した透水量係数(ケース 1-11,1-12)

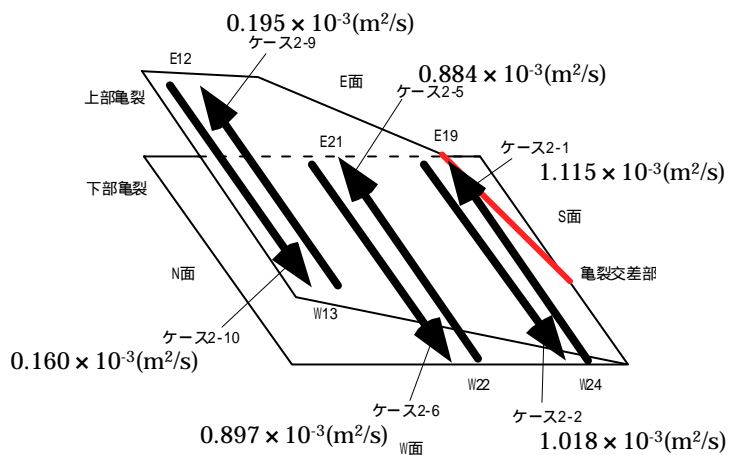


図 4.2-7 水に換算した透水量係数(ケース 2-1,2-2,2-5,2-6,2-9,2-10)

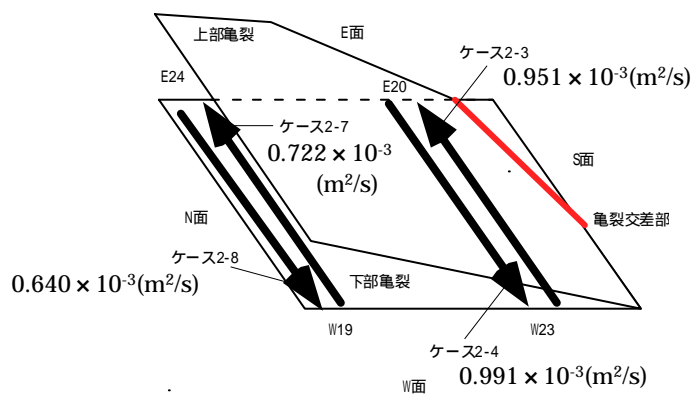


図 4.2-8 水に換算した透水量係数(ケース 2-3,2-4,2-7,2-8)

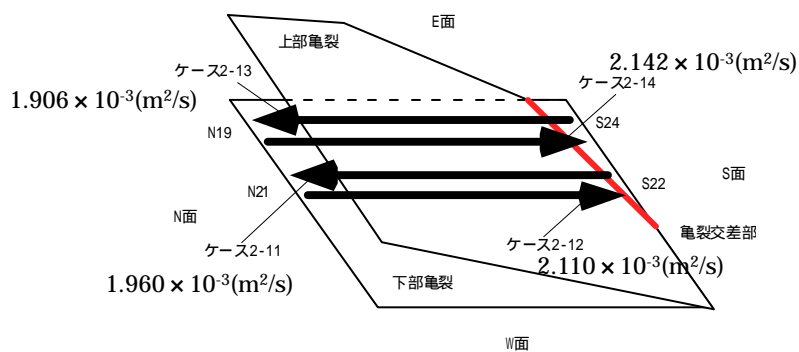


図 4.2-9 水に換算した透水量係数(ケース 2-11 ~ 2-14)

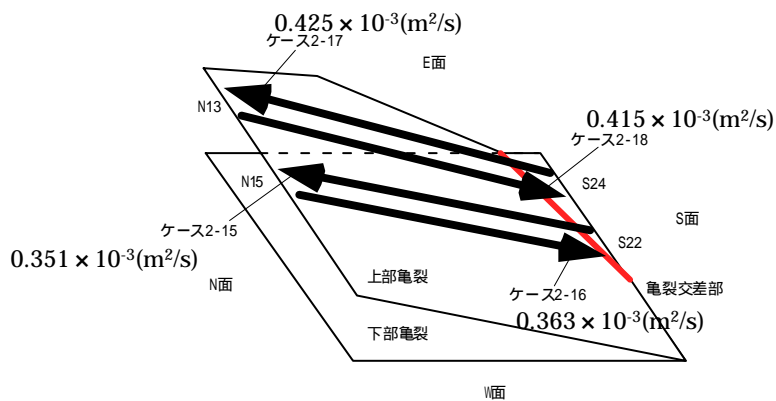


図 4.2-10 水に換算した透水量係数(ケース 2-15 ~ 2-18)

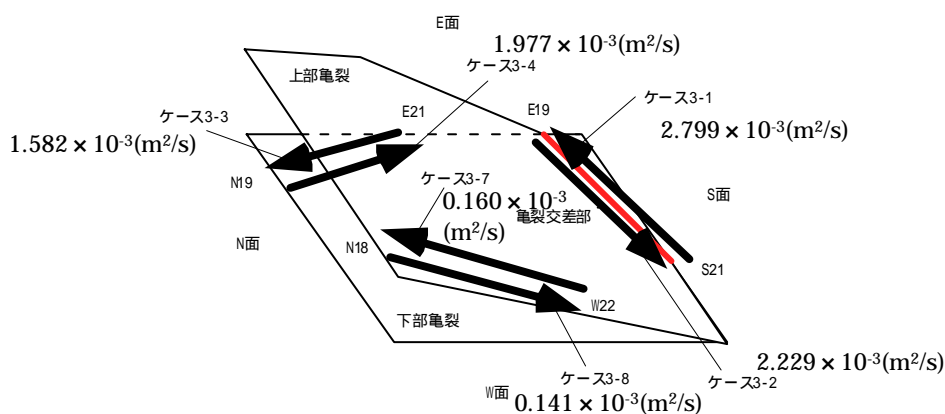


図 4.2-11 水に換算した透水量係数(ケース 3-1 ~ 3-4,3-7,3-8)

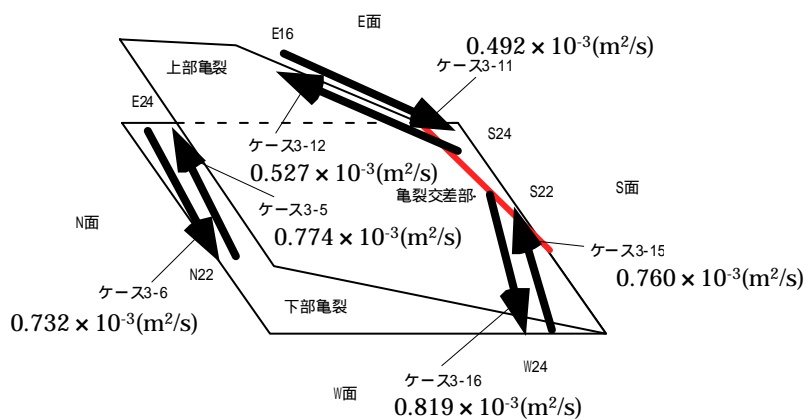


図 4.2-12 水に換算した透水量係数(ケース 3-5,3-6,3-11,3-12,3-15,3-16)

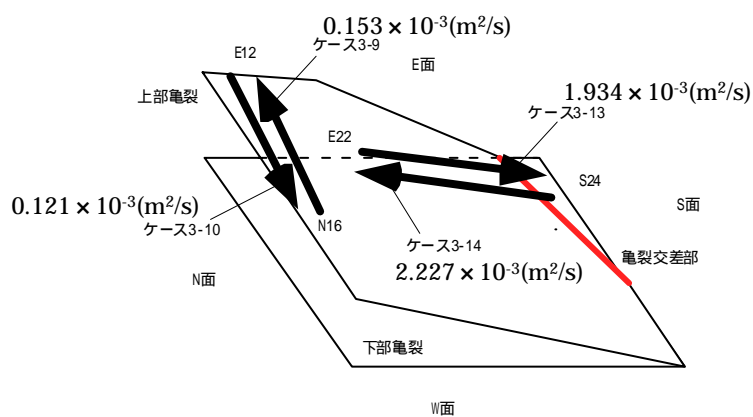


図 4.2-13 水に換算した透水量係数(ケース 3-9,3-10,3-13,3-14)

5 おわりに

0.2 (wt%) の高粘性流体を用い、天然亀裂を持つ花崗岩で透水試験を行った。測定結果より、水に換算した透水量係数、亀裂部の亀裂開口幅を計算した。透水量係数より、亀裂交差部に沿った方向とそれ以外の方向について、亀裂内の流れの違いを検討した。

試験結果より以下の結果が得られた。

- ・亀裂面全体を対象とした透水試験では、注排水の方向が逆の場合でも、透水量係数がほぼ等しい。注水と排水の方向を逆にしても、流体の流路が同じであると考え。また、上部亀裂、下部亀裂とも注排水面 S-N 間と E-W 間では透水量係数が異なるため、この亀裂内は透水異方性であると考えられる。
- ・対面するセル間の透水試験、亀裂交差部に沿った方向の透水試験、亀裂交差部と同一流路長の透水試験より、亀裂内の透水量係数が $0.1 \times 10^{-3} \sim 2.8 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{s})$ の範囲で求められた。
- ・上部亀裂は下部亀裂に比べて透水量係数が小さい傾向があり、 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{s})$ の範囲に分布している。
- ・亀裂内で透水量係数が大きい場所は下部亀裂の E 面近傍であり、その中でも亀裂交差部に沿った方向で透水量係数が最大になることが分かった。これより、亀裂交差部およびその近傍が、地下水および物質の主な移行経路となる可能性が強いと考える。

今後は、今回試験に用いた岩体を研削することにより、亀裂開口部の詳細な観察を行い三次元的な開口幅分布を求める。そして、今回取得した試験データと今後取得予定の亀裂開口幅データより、亀裂開口部の形状が流体流れに与える影響を、数値解析的に検討する予定である。

参考文献

- [1] 山田直之、鐵桂一、澤田淳：“実岩体を用いた透水試験”、核燃料サイクル開発機構技術資料、JNC TN8430 2001-003(2001)
- [2] 鐵桂一、澤田淳：“高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験”、核燃料サイクル開発機構技術資料、JNC TN8430 2001-006(2001)
- [3] P.A.ドミニコ、F.W.シュワルツ：地下水の科学、土木工学社(1995)
- [4] 山口嘉一、渋市秀雄、松本徳久：“高粘性流体試験による高透水性岩盤の透水性評価”、地下水学会誌、第37巻、第1号、(1995)
- [5] 国立天文台編：理科年表、丸善株式会社(2002)