

分置01

深部岩盤における掘削影響領域を対象とした 水理学的調査

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1998年3月

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
1	J1439 98-001	1998.9.21

この資料は技術管理室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です

動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

大成基礎設計株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒107-0052 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to : Technical Information Service, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

深部岩盤における掘削影響領域を対象とした 水理学的調査

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1998年3月

大成基礎設計株式会社

深部岩盤における掘削影響領域を対象とした水理学的調査

松岡 永憲※

要　旨

釜石鉱山 250m レベル坑道において、深部岩盤の掘削影響試験の一環として試験坑道周辺の水理学的影響領域を定量的に把握することを目的として、水理学的緩み領域計測装置を用いた透水試験を実施した。その結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 調査用試錐孔の掘削された2つの断面では、間隙水圧の分布状況が異なった傾向を示した。
- 2) 今回の試験では、水平および鉛直下向きの試錐孔で試験を実施したが、試錐孔の掘削方向により、透水係数の分布に違いがみられた。
- 3) 鉛直下向きの試錐孔では、坑道底盤に最も近い測定区間で高い透水係数が得られたが、水平孔における試験では、坑壁からの距離によらずほぼ同程度の透水係数であった。
- 4) 掘削工法の違いによる透水性への影響の違いは、水平孔では認められなかつたが、鉛直下向き孔ではスムースプラスティング区間に掘削された試錐孔の坑壁付近の透水係数が、普通発破区間の試錐孔のそれよりも大きくなつた。

本報告書は、大成基礎設計株式会社が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号: 090C0123

事業団担当部課室および担当者: 環境技術開発推進本部 地層科学研究グループ

山崎 真一

※大成基礎設計株式会社 技術研究所

Hydraulic Tests for the Excavation Disturbed Zone in Deep Rock Mass

Eiken Matsuoka *

Abstract

Investigation for characterization of rock properties of the Excavation Disturbed Zone (EDZ) were carried out in 250m level drift of KAMAISHI Mine. As a part of this investigation, hydraulic tests in the two different sections which were excavated by normal and smooth blasting method respectively, were performed in the vicinity of a drift wall and floor.

The test results are as follows,

- 1) The distribution of pore water pressure in two sections was different.
- 2) In this investigation, hydraulic test was performed at the different depth in the horizontal and vertical down hole. The variation of measured permeability with depth from the drift wall and floor showed different character.
- 3) The measured permeability in horizontal hole has no change with depth from drift wall, but in vertical down hole, the measured permeability in nearest part from the floor indicated the higher value compared to the permeability in deeper part.
- 4) In horizontal holes in two sections there was no difference of the measured permeabilities dependent on the excavation method. The higher permeability was obtained in the vertical hole in smooth blasting section compared to normal blasting section.

Work performed by Taisei Kiso Sekkei Co.,LTD under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : PNC Head Office ,Radioactive Waste Management Project, Geoscience Research Program Shinichi Yamazaki

*Taisei Kiso Sekkei CO.,LTD Technical Laboratory

目 次

1. まえがき	1
2. 試験装置の概要	2
2. 1 試験装置の構成	2
2. 2 測定作業手順	2
3. 透水試験	6
3. 1 透水試験区間の状況	6
3. 2 試験方法及び透水係数の算定方法	9
3. 2. 1 定圧注水試験	9
3. 2. 2 非定常透水試験	9
3. 3 試験結果	11
3. 3. 1 間隙水圧測定結果	11
3. 3. 2 定圧注水試験結果	18
3. 3. 3 非定常透水試験結果	27
4. 考察	34
4. 1 間隙水圧	34
4. 2 透水係数の深度分布および透水係数と亀裂状態の相関	36
4. 3 透水試験	39
4. 3. 1 定圧注水試験	40
4. 3. 2 非定常透水試験	43
4. 3. 3 まとめ	45
5. あとがき	50
巻末付録	
(1) 間隙水圧測定結果	52～59
(2) 定圧注水試験非定常解析図	60～65
(3) 写 真 集	66～69

表 目 次

表-1	性能表	3
表-2	機器の精度	3
表-3	測定区間深度と地質状況	7
表-4	間隙水圧一覧表	14
表-5	定圧注水試験結果の一覧表	20
表-6	ナイロンチューブの注水量一圧力関係	28
表-7	非定常透水試験結果の一覧	28
表-8	透水係数と亀裂状態	38
表-9	定圧注水試験の解析結果一覧	40

図 目 次

図-1	試験装置概要図	4
図-2	緩み領域の透水試験作業フロー	5
図-3	調査用試錐孔の位置	6
図-4	測定区間の配置および亀裂の位置関係図	8
図-5	間隙水圧測定結果一覧図	15
図-6	間隙水圧測定結果9/25-11/25(KPS-2, 3)	16
図-7	間隙水圧測定結果9/25-11/25(KPS-2, 3)気圧補正後	16
図-8	間隙水圧測定結果11/06-12/19(KPS-5, 6)	17
図-9	間隙水圧測定結果11/06-12/19(KPS-5, 6)気圧補正後	17
図-10	KPS-2-1区間2回目透水試験結果全データ	21
図-11	KPS-2-2区間透水試験結果全データ	21
図-12	KPS-2-3区間透水試験結果全データ	22
図-13	KPS-3-1区間透水試験結果全データ	22
図-14	KPS-3-2区間透水試験結果全データ	23
図-15	KPS-3-3区間透水試験結果全データ	23
図-16	KPS-5-1区間透水試験結果全データ	24
図-17	KPS-5-2区間透水試験結果全データ	24
図-18	KPS-5-3区間透水試験結果全データ	25
図-19	KPS-6-1区間透水試験結果全データ	25

図-20	KPS-6-2区間透水試験結果全データ	26
図-21	KPS-6-3区間透水試験結果全データ	26
図-22	KPS-2-1区間非定常透水試験結果	29
図-23	KPS-2-2区間非定常透水試験結果	29
図-24	KPS-2-3区間非定常透水試験結果	30
図-25	KPS-3-1区間非定常透水試験結果	30
図-26	KPS-3-2区間非定常透水試験結果	31
図-27	KPS-5-1区間非定常透水試験結果	31
図-28	KPS-6-1区間非定常透水試験結果	32
図-29	KPS-6-3区間非定常透水試験結果	32
図-30	KPS-3-2区間非定常透水試験結果（2回目）	33
図-31	KPS-6-3区間非定常透水試験結果（2回目）	33
図-32	透水試験／距離と振幅比	35
図-33	間隙水圧の深度分布	36
図-34	透水係数（定圧注水試験）の深度分布	37
図-35	透水係数比（非定常法／定圧注水）	39
図-36	KPS-3-2区間 $\log_{10} t - \log_{10} Q$ 曲線	46
図-37	KPS-3-2区間 $dP/Q - \log_{10}(t/rw^2)$ 曲線	46
図-38	KPS-3-2区間 $1/\sqrt{t} - Q$ 曲線	47
図-38	KPS-3-2区間 $1/\sqrt{t} - Q$ 曲線拡大	47
図-39	KPS-6-3区間 $\log_{10} t - \log_{10} Q$ 曲線	48
図-40	KPS-6-3区間 $dP/Q - \log_{10}(t/rw^2)$ 曲線	48
図-41	KPS-6-3区間 $1/\sqrt{t} - Q$ 曲線	49
図-42	KPS-6-3区間 $1/\sqrt{t} - Q$ 曲線拡大	49

1. まえがき

釜石原位置試験第2フェーズでは、釜石鉱山 250m レベル坑道において、深部岩盤の掘削影響領域の評価に関する研究が実施されている。今年度のこの掘削影響試験では、昨年掘削された試験坑道の周辺岩盤の計測および試験が実施されている。

本業務は、掘削影響試験の一環として試験坑道周辺の水理学的特性を調査し、坑道掘削により生じた水理学的影响領域を定量的に把握することを目的として、水理学的緩み領域計測装置を用いて透水試験を実施したものである。

上述の装置は、平成3年に掘削影響領域の間隙水圧と透水係数を測定するために、動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センターで開発された。同装置は、坑道壁面から掘削された試錐孔を利用して定圧注水の透水試験を実施するものである。本装置は平成5年度までの改良により、1本の試錐孔で5つ（試錐孔深度2m）または、3つ（試錐孔深度12m）の測定区間が設定可能である。また、この装置は、同時に6区間の間隙水圧を測定でき、測定値に影響を与えると考えられる坑道内の気圧及び気温も測定できる機能を有している。

本報では、今回実施した透水試験結果について述べる。

2. 試験装置の概要

本試験装置は坑道掘削に伴って発生する掘削影響を岩盤の水理特性の変化から定量的に把握するために、坑道壁面から掘削した試錐孔内で間隙水圧測定と透水試験を行う試験機である。本装置の基本的性能を表-1に、使用しているセンサー等の精度を表-2に示す。

2. 1 試験装置の構成

試験装置は、主に以下の基本機能を持つブロックから構成されている（図-1参照）。

- ①多点式パッカー : 試錐孔内に設置し、1試錐孔内に最大3点（深度1.2m）、または5点（深度2m）の測定区間を設定する。
- ②定水圧制御装置 : 脱気水を用い、一定圧で送水する。
- ③流量計ユニット : 定圧注水試験を行う場合、流量計と測定区間の接続を切り替え、注水流量を測定する。また、間隙水圧測定時には気圧及び気温を測定する。
- ④圧力計ユニット : 間隙水圧測定時には全6区間の間隙水圧を測定し、透水試験時に注水圧力と他5区間の間隙水圧を同時測定する。
- ⑤記録装置 : 6区間の圧力データと注水量データ、気圧及び気温データをモニタリングし、フロッピーディスクに記録する。

2. 2 測定作業手順

本試験装置を用いた測定方法は、概略、次のとおりである（図-2参照）。

- ①試錐孔内にブッシングパッカーと遮水用充填材を組み合わせた多点式パッカーを挿入・設置し原則として長さ10cmの測定区間を1試錐孔に5つ（試錐孔深度2m）または、3つ（試錐孔深度1.2m）設定する。
- ②測定区間を水で充満させた後に、各測定区間の間隙水圧が十分に安定したと判断できるまで、間隙水圧測定を実施する。試錐孔外の気温及び気圧の変動が、孔外で測定される間隙水圧の測定値に影響を与えると考えられるために、これらも同時に測定する。
- ③今回は基本的に定圧注水にて透水試験を実施した。定圧注水の透水試験は、注水流量が十分に定常状態になったと判断できるまで一定圧で注水を行う。また、測定区間相互の圧力伝搬状況をモニタリングするために、透水試験を行っていない他の区間の間隙水圧も試験中同時に測定する。

表-1 性能表

項目	性能
最大測定深度	・12m(孔径φ86mm)、2m(孔径φ76mm)
適用孔径	・φ86mm、φ76mm
測定区間長	・10cm固定
測定点数	・1試錐孔当たり最大3点(最大深度2mの場合最大5点)
測定区間の間隔	・25cm以上工場出荷時固定(深度12m)、33cm以上(深度2m)
測定可能な地盤	・甚だしく試錐孔壁が崩壊しない岩盤
透水係数計測可能範囲	・ $10^{-5} \sim 10^{-9}$ cm/s(これ以外の範囲は参考値)
間隙水圧測定範囲	・ $10\text{kgf/cm}^2 \sim -1\text{kgf/cm}^2$
注水流量測定範囲	・ $500\text{cm}^3/\text{h} \sim 1\text{cm}^3/\text{h}$
気圧測定範囲	・ $1060\text{hPa} \sim 800\text{hPa}$
気温測定範囲	・ $100^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$
マリオットタンク容量	・約8 リットル×2本

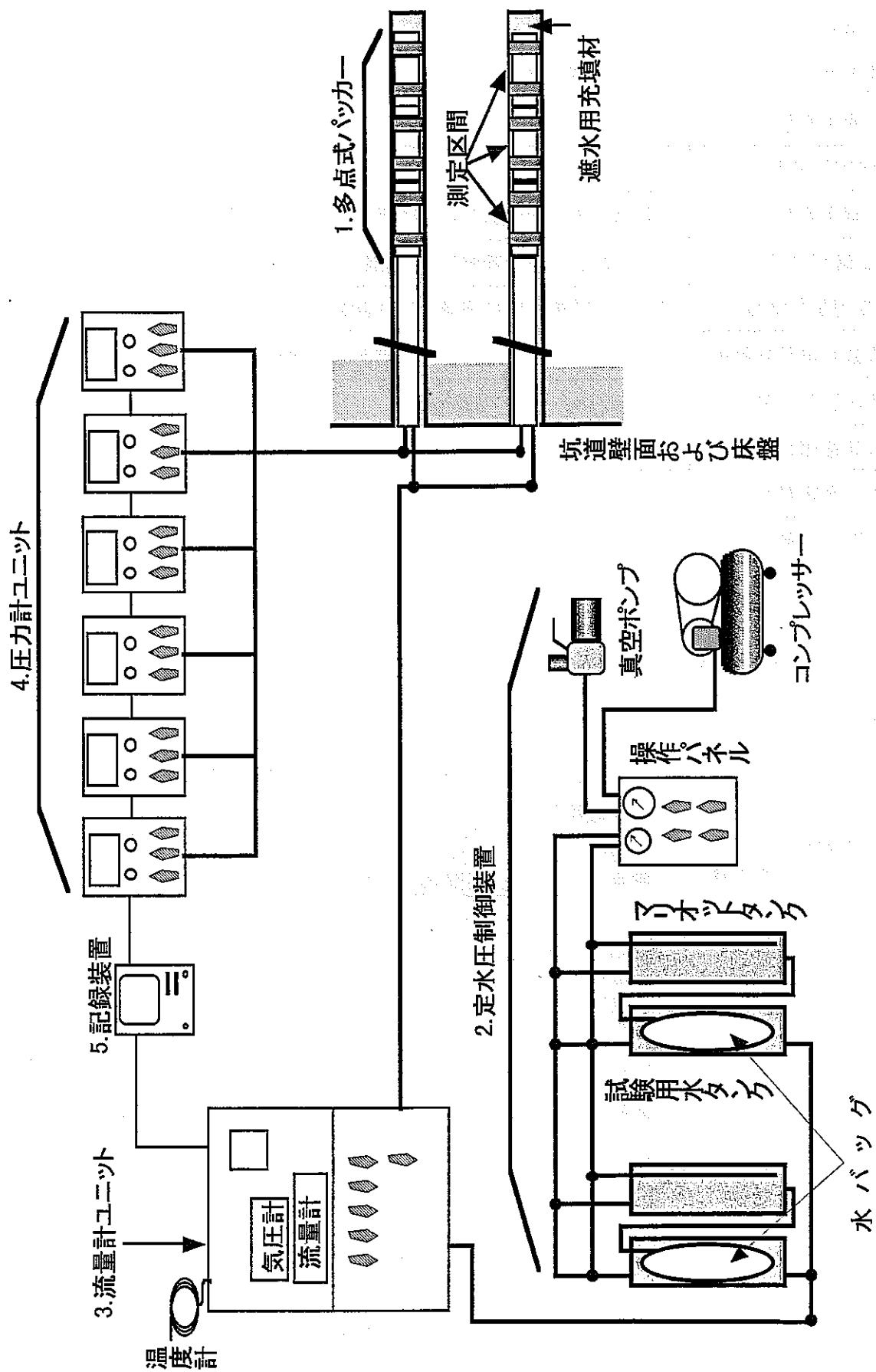
注：今回透水試験を実施した最大測定区間深度は2.015m、孔径はφ76mmである。

表-2 機器の精度

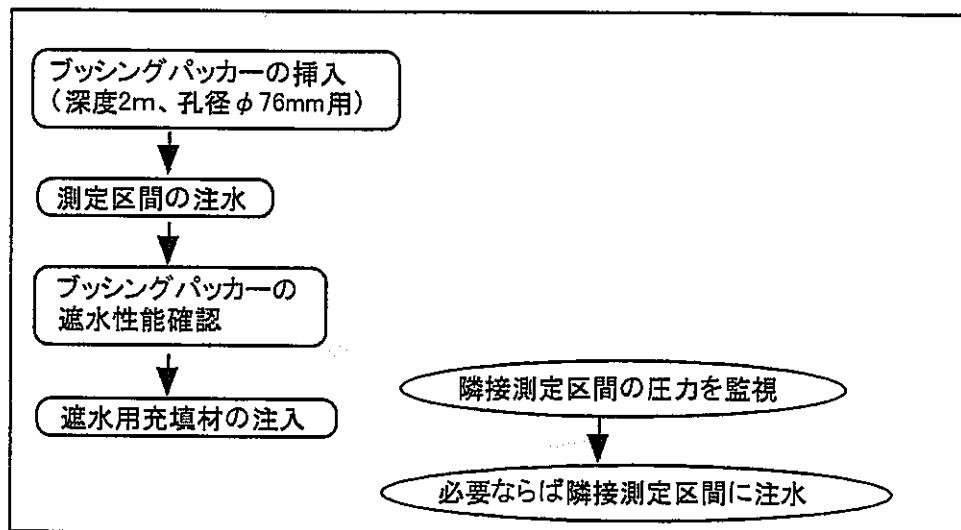
機器の種類	精度
流量計* (20,100,500cm ³ /h計共通)	・平均温度係数 $0.1\%/\text{°C}$ ・精度+直線性 $\pm 1\%$ ・再現性 $\pm 0.2\%$ ・零点安定性 長期間誤差 $1\%/\text{年}$ 温度ドリフト $0.05\%/\text{°C}$
圧力計ユニット内圧力計 (2,5,10kgf/cm ² 計共通)	・平均温度係数 $0.02\%/\text{°C}$ ・非直線性 $\pm 0.3\%$ ・再現性 $\pm 0.3\%$ ・零点安定性 温度ドリフト $0.02\%/\text{°C}$
気圧計	・直線性 $\pm 0.3\text{hPa}$ ・再現性 $\pm 0.3\text{hPa}$ ・長期安定性 $\pm 0.3\text{hPa}/\text{年}$
気温計	・許容差 $\pm 1^\circ\text{C}$ または測定温度の $\pm 0.75\%$
レギュレーター	・感度 0.001kgf/cm^2 (低圧用) 0.01kgf/cm^2 (高圧用)

*) 今回の計測では、大成基礎設計(株) 所有の $1 \sim 0.05\text{cm}^3/\text{h}$ 計も併せて使用した。

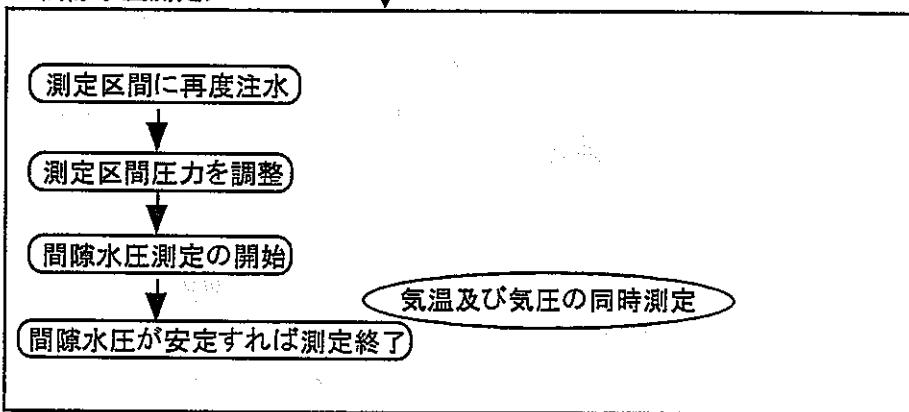
図-1 試験装置概要図



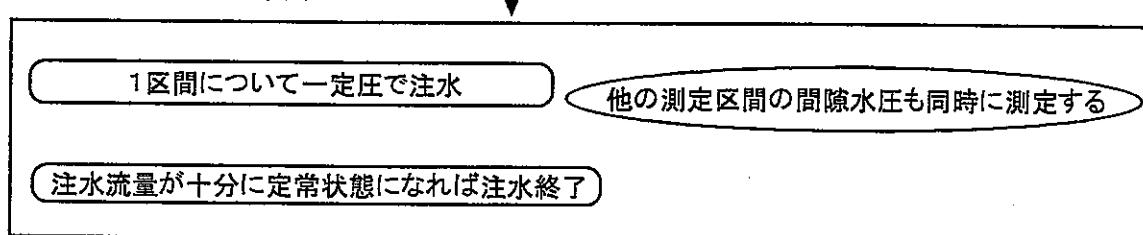
1[多点式パッカーの設置]



2[間隙水圧測定]



3[透水試験(定圧注水法)]



4[透水試験(非定常法)]

←参考データ取得のため可能な区間において実施

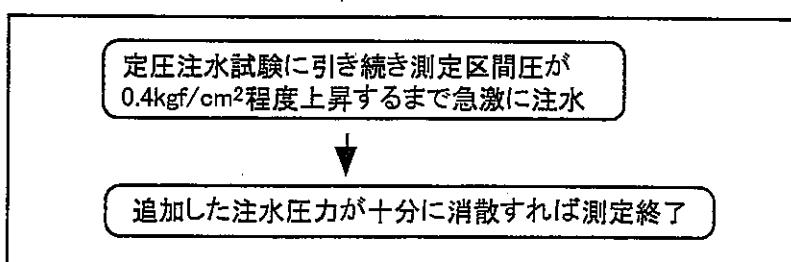


図-2 緩み領域の透水試験作業フロー

3. 透水試験

3. 1 透水試験区間の状況

今年度透水試験を実施した試錐孔は、図-3に示す昨年掘削された試験坑道のA断面（スムースプラスティング区間）、B断面（普通発破区間）に2本ずつ合計4本掘削された。4本の試錐孔の内2本（KPS-2、5孔）の掘削方向は、水平方向であり、残り2本（KPS-3、6孔）の掘削方向は、鉛直下向きである。

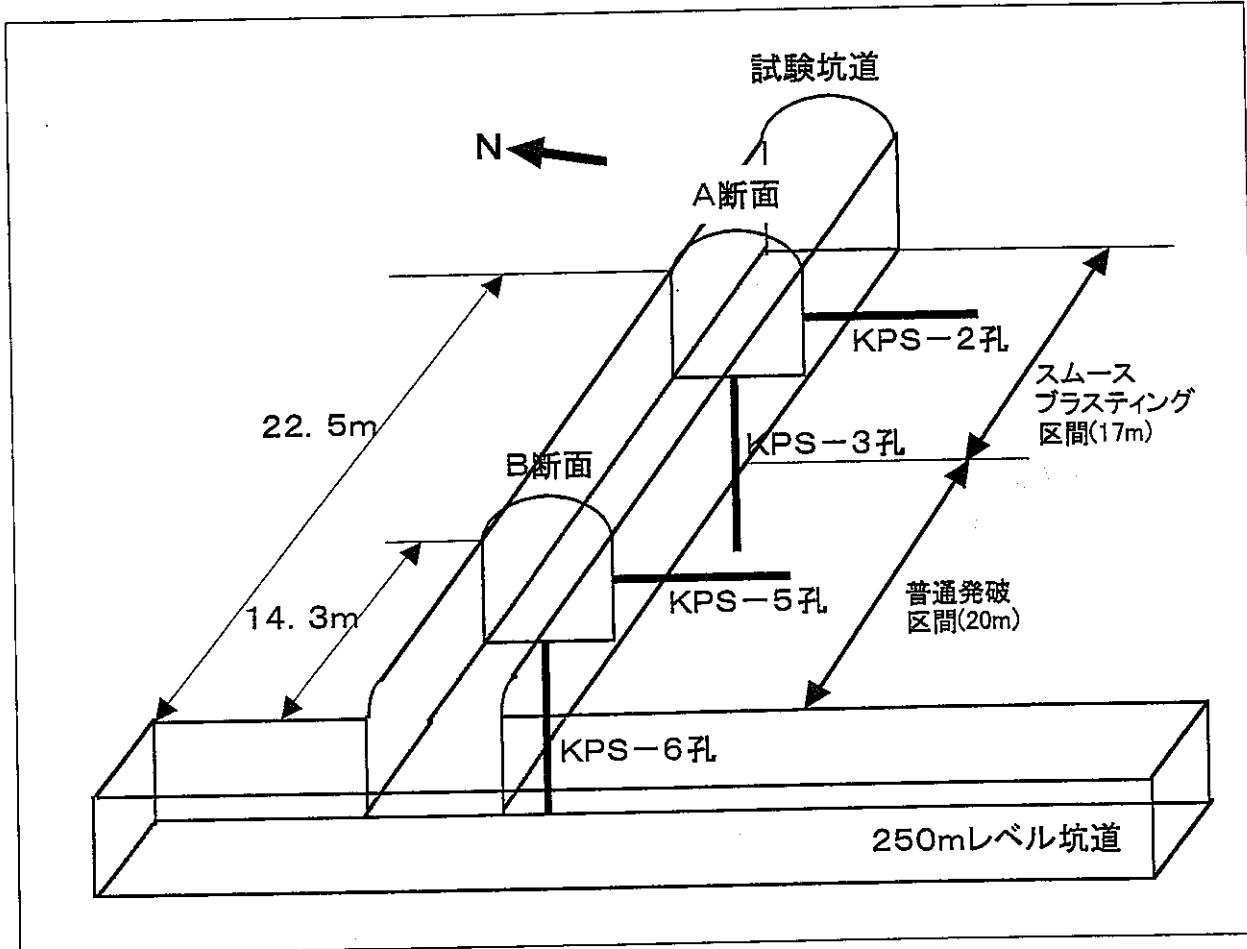


図-3 調査用試錐孔の位置

測定位置の設定に当たっては、動燃事業団と協議の上、弾性波屈折法調査との比較の視点から、同調査で把握された弾性波の低速度帯の中に1点、それ以深で2点の測定区間を設けることとした。KPS-6孔については、亀裂のないマトリックス部に透水性の変化が生じているか否かを調べるために亀裂のない区間3カ所を測定区間として選定した。

試錐孔掘削により得られた岩芯コアの観察結果とボアホールテレビの観察結果より、KPS-2、3、5孔の測定区間は、全て岩芯コアが分離している亀裂を含む深度に設定した。特に、KPS-3-3区間は、亀裂集中帯であり、多点式パッカーの設置時にも試錐

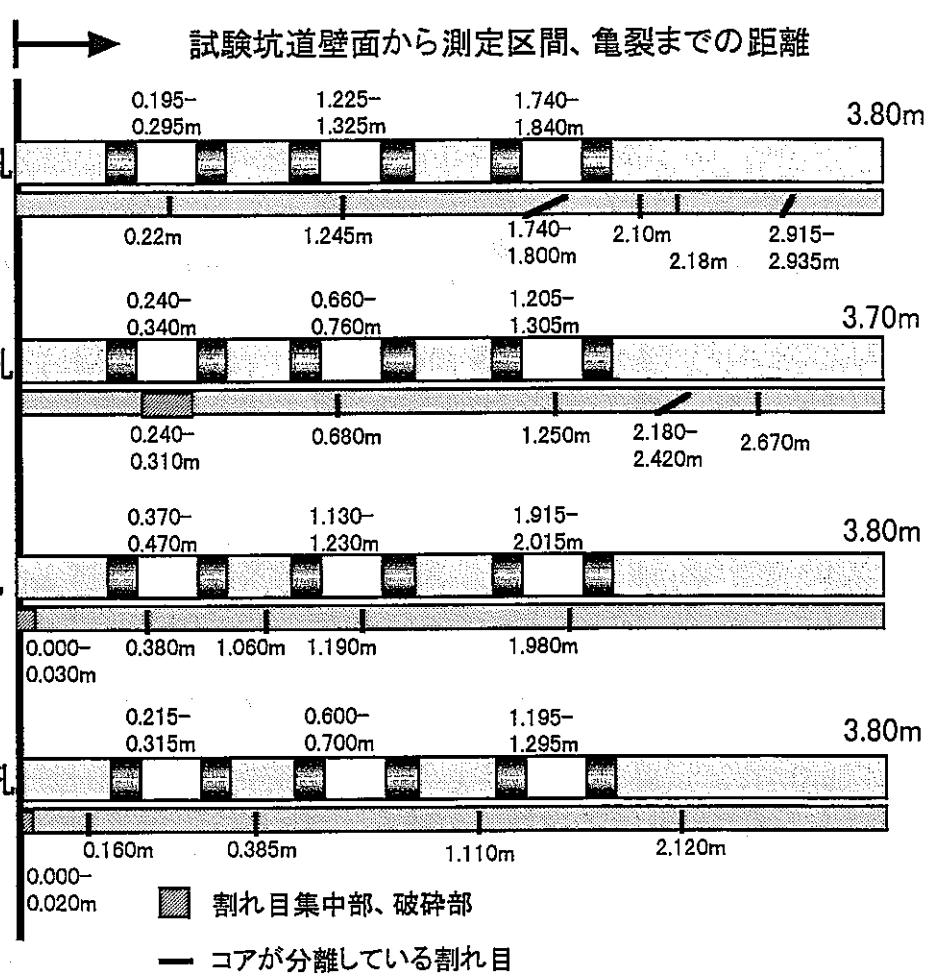
孔口から挿入した巻き尺の先端が亀裂に引っかかるなど開口亀裂であることが確認された。

測定区間の地質状況を表-3および図-4にまとめて示す。

表-3 測定区間深度と地質状況

試錐孔No.	測定区間No.	試錐孔口 からの距離cm	岩質	亀裂の状況
KPS-2 (水平)	1	174.0～184.0	栗橋花崗閃綠岩	有り
	2	122.5～132.5		有り
	3	19.5～29.5		有り
KPS-3 (鉛直)	1	120.5～130.5	栗橋花崗閃綠岩	有り
	2	66.0～76.0		有り
	3	24.0～34.0		有り(亀裂集中部)
KPS-5 (水平)	1	191.5～201.5	栗橋花崗閃綠岩	有り
	2	113.0～123.0		有り
	3	37.0～47.0		有り
KPS-2 (鉛直)	1	119.5～129.5	栗橋花崗閃綠岩	無
	2	60.0～70.0		無
	3	21.5～31.5		無

試
驗
坑
道



図一4 測定区間の配置および亀裂の位置関係図

3. 2 試験方法及び透水係数の算定方法

透水試験は、基本的に定圧注水法で実施し、試験法比較の参考データを得るために工程上可能な測定区間について非定常透水試験を実施した。

3. 2. 1 定圧注水試験

注水圧力は、試験対象区間の初期隙水圧に比べて約1.0~3.6kgf/cm²高い値となるように設定した。

試験は、上述の注水圧を一定に保ち、注水流量が十分に減衰し安定していると見なせることを確認して終了した。

透水係数は、単孔式透水試験の一般的な解析式である Hvorslev の定常式（式（1））を使用して求めた。

• Hvorslev の定常式

$$k = \frac{Q \times \ln\left(\left(mL/2r\right) + \sqrt{1 + \left(mL/2r\right)^2}\right)}{2\pi LH} \quad \dots \quad (1)$$

ここに、 k …… 透水係数(cm/s)

Q …… 注水流量(cm³/s)

m …… 異方性に関する係数(等方性の場合1)

L …… 測定区間長(cm)

r …… 測定区間の半径(cm)

H …… 注水差圧水頭(cm)

今回の透水試験のみで異方性は考慮できないのでm=1、その他の条件はr=3.8cm、L=10cmなので、式（1）は次のとおりとなる。

$$k = 0.0173 \frac{Q}{H} \quad \dots \quad (1) a$$

3. 2. 2 非定常透水試験

定圧注水試験の終了時に、測定区間圧力がその注水圧力からさらに0.4~0.5kgf/cm²程度高くなるように、急速に加圧注水する。その後、基本的に加圧注水した圧力が定圧注水試験時の圧力に戻るまで圧力を測定した。

透水試験結果から、次に示すHvorslevの非定常式を用いて透水係数を計算した。

• Hvorslev の非定常式

$$k = \frac{\theta^2 \ln(L/r)}{2L(t_2 - t_1)} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad \dots \quad (2)$$

ここに、 k …… 透水係数(cm/s)

t₁、 t₂ …… 経過時間(s)

P₁、 P₂ …… t₁、 t₂時の測定区間圧力(kgf/cm²)

θ …… 仮想半径(cm)

Lおよびrは式(1)と同じである。

$$\theta^2 = \frac{\Delta V}{\Delta P} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot 0.001 \quad \dots \quad (3)$$

ここに、 ΔV ……チューブ内の水の貯留量(cm^3)

ΔP ……チューブ内の非定常透水試験時水圧と定圧注水試験時の水圧との差(kgf/cm^2)

$\Delta V / \Delta P$ ……単位圧力の圧力変化当たりのチューブ内の水の貯留量の変化量(cm^5/kgf)

3. 3 試験結果

3. 3. 1 間隙水圧測定結果

測定区間全12箇所の岩盤の間隙水圧測定結果を表-4および図-5に示す。

KPS-2孔、KPS-3孔の間隙水圧測定は、基本的に平成9年9月25日～11月25日の期間実施し、KPS-5孔、KPS-6孔の測定は、平成9年11月6日～12月19日の期間実施した。この期間の測定結果を図-6～9に示す。

KPS-5, 6孔の間隙水圧測定に使用した間隙水圧計の高さは、KPS-2, 3孔の測定時より56cm高いため、これを測定値に加算した。又、KPS-6孔の間隙水圧測定に使用した圧力計がドリフトしていることを、平成9年12月20日に確認したので、このドリフト値を測定値の最終値に対して補正した。

なお、零点のドリフトが測定期間中線形で単調に発生しているという保証はないため、最終値についてのみ補正した。間隙水圧データグラフでは、KPS-6孔のデータに対してこのドリフトに関する補正を行っていない。

KPS-3-2、3区間は、孔外の間隙水圧計に関する気圧変動の補正後、他の測定区間には認められない気圧変動に対する応答が認められ、他の測定区間に比べて坑道壁面に対する連結性が高い（当区間周辺の透水係数が大きく、壁面から当区間までの流体圧力の伝搬経路が短い）といえる。

図-6および7からKPS2-1、KPS3-2、KPS3-3区間の間隙水圧測定値は、ほぼ安定状態に到達したと判断できる。また、その他の測定区間についてはまだ間隙水圧が安定していないが、変動幅が10000分間にたかだか約0.02kgf/cm²未満と定圧透水試験に与える影響が少ないと判断できるので、間隙水圧測定を終了し透水試験を開始した。ただし、間隙水圧測定の終了後、透水試験が開始されるまで約1ヶ月空き期間のある測定区間もある。そのような区間は、他の測定区間の透水試験中測定している間隙水圧値も参考にして、各測定区間の間隙水圧値および、透水係数の計算に用いる初期間隙水圧値を判断した。

以下、各測定区間の間隙水圧値に関する検討結果を略記する。また、この検討に使用した各測定区間の間隙水圧検討グラフを巻末付録に示す。

①KPS-2-1区間

間隙水圧測定終了直前に大気圧の変動幅が大きくなつたため、間隙水圧の測定値も見掛け上0.04kgf/cm²程度の変動がみられるが、間隙水圧の全般的な増加または、減少傾向はみられない。したがって、間隙水圧、透水試験の初期間隙水圧として、試験開始直前までの測定値の平均値を用いた。

②KPS-2-2区間

測定値全般に減少傾向が明らかに認められ、測定値安定状態には到達していないと判断できる。したがって、間隙水圧、透水試験の初期間隙水圧として、当区間の透水試験開始直前までの測定値の平均値を用いた。

③KPS-2-3区間

測定値全般に減少傾向が明らかに認められ、測定値安定状態には到達していないと判断できる。したがって、間隙水圧、透水試験の初期間隙水圧として、当区間の透水試験開始直前までの測定値の平均値を用いた。

④KPS-3-1区間

間隙水圧測定終了直前から全般的な減少傾向が小さくなり、 -0.15kgf/cm^2 付近で安定する傾向がみられ、地盤の間隙水圧を示していると考える。したがって、間隙水圧、透水試験の初期間隙水圧は、当区間の透水試験開始直前までの測定値の平均値である。

⑤KPS-3-2区間

大気圧変動に対応する間隙水圧の変動は小さく、値も -0.02kgf/cm^2 付近で安定している。したがって、間隙水圧、透水試験の初期間隙水圧は、最初の間隙水圧測定の最終値である。

⑥KPS-3-3区間

大気圧変動に対応する間隙水圧の変動は、上述のKPS-3-2区間よりも大きい。間隙水圧測定中は、測定値の減少傾向がみられるが、当区間の透水試験開始直前には、 -0.02kgf/cm^2 程度に安定している。当区間の透水性は、水理学的ゆるみ領域計測装置の測定限界を大きく上回っていると考えられ、間隙水圧測定開始前に注水を行ったが、圧力測定用チューブに注入水の戻りがみられなかった。

当区間の間隙水圧測定値は当区間より透水性の低いKPS-3-2区間に比べ大気圧変動に対する応答幅が大きく、測定値の安定に必要とする時間が長くなっている。間隙水圧の安定に要する時間が長期化する原因として、測定用配管系統の中の空気抜きが十分に行えず、残留した空気塊が圧縮されることによる影響が出ているのではないかと思われる。

なお、間隙水圧は、透水試験開始直前までの間隙水圧測定値の最終平均値とした。また、定圧透水試験中、測定区間圧力に有意な上昇が認められなかつたので、透水係数を計算する際の初期間隙水圧としては、透水試験開始直前の瞬間値を用いた。

⑦KPS-5-1区間

当区間の間隙水圧測定に使用した圧力計は、共和電業（株）製のPGU-2K型であり、ダイアフラム（受圧面）の背面に不活性ガスが封入されている。このため、受圧面背面には大気圧変動の影響がない構造である。間隙水圧の測定値は、大気圧変動に対する応答がみられず、当区間と坑道壁面との連結性が低い（当区間周辺の透水係数が小さく、壁面から当区間までの流体圧力の伝搬経路が長い）ことを示している。

間隙水圧測定終了後に、水理学的ゆるみ領域計測装置本体に配管を切り替えた影響が測定値に若干みられ、減少傾向を残したままで透水試験を開始している。したがって便宜的ではあるが、間隙水圧測定終了直前の平均値を間隙水圧、および透水試験の初期間隙水圧とした。

⑧KPS-5-2区間

当区間の透水試験開始時は、間隙水圧測定終了後の配管切換後約27日経過しているが、この配管切換の影響が残っている。したがって、透水試験の初期間隙水圧としては、試験開始直前の測定値の平均を使用し、地盤の間隙水圧値としては、間隙水圧測定終了直前の平均値を用いた。

⑨KPS-5-3区間

前述のKPS-5-2区間と同様の理由で、透水試験の初期間隙水圧値は試験開始直前の測定値の平均値、地盤の間隙水圧値としては、間隙水圧測定終了直前の平均値を使用した。

⑩KPS-6-1区間

当区間は、水理学的ゆるみ領域計測装置本体に配管を切り替えた直後に、透水試験を開始しているので、透水試験の初期間隙水圧としては、間隙水圧測定終了直前の平均値を用いた。

当区間は、間隙水圧測定の開始時に測定区間内から、明らかに湧水がみられた。また、間隙水圧測定開始後に一度測定値がゆっくりと上昇した。このことより地盤の間隙水圧値としては、 0.4kgf/cm^2 程度と考えられたが、透水試験終了後配管内の注水圧力を一度開放して、圧力測定を行ったが、約27日経過しても 0.05kgf/cm^2 程度以上に測定値が上昇する傾向がみられない。したがって、地盤の間隙水圧値として、間隙水圧測定終了時の平均値と、透水試験終了後の平均値の妥当性の判断は難しいが、便宜上、間隙水圧測定終了直前の平均値を記載した。

定圧注水試験中に注水流が大きくなる傾向はみられず、定圧注水試験後の非

定常透水試験でも、注水圧力の減衰速度は遅いため、定圧注水試験中に通水経路が広がるような変化を起こしたとは考えにくい。

したがって、今回の一連の測定では、この圧力変化現象の原因が明確にはできず、何らかの外部的な圧力環境に変化がなかったかどうかも検討する必要があると考える。

⑪KPS-6-2区間

当区間は、配管張り替え後も継続した間隙水圧測定値の減少傾向がみられる。したがって、透水試験の初期間隙水圧、地盤の間隙水圧値共に、透水試験開始直前の平均値を用いた。

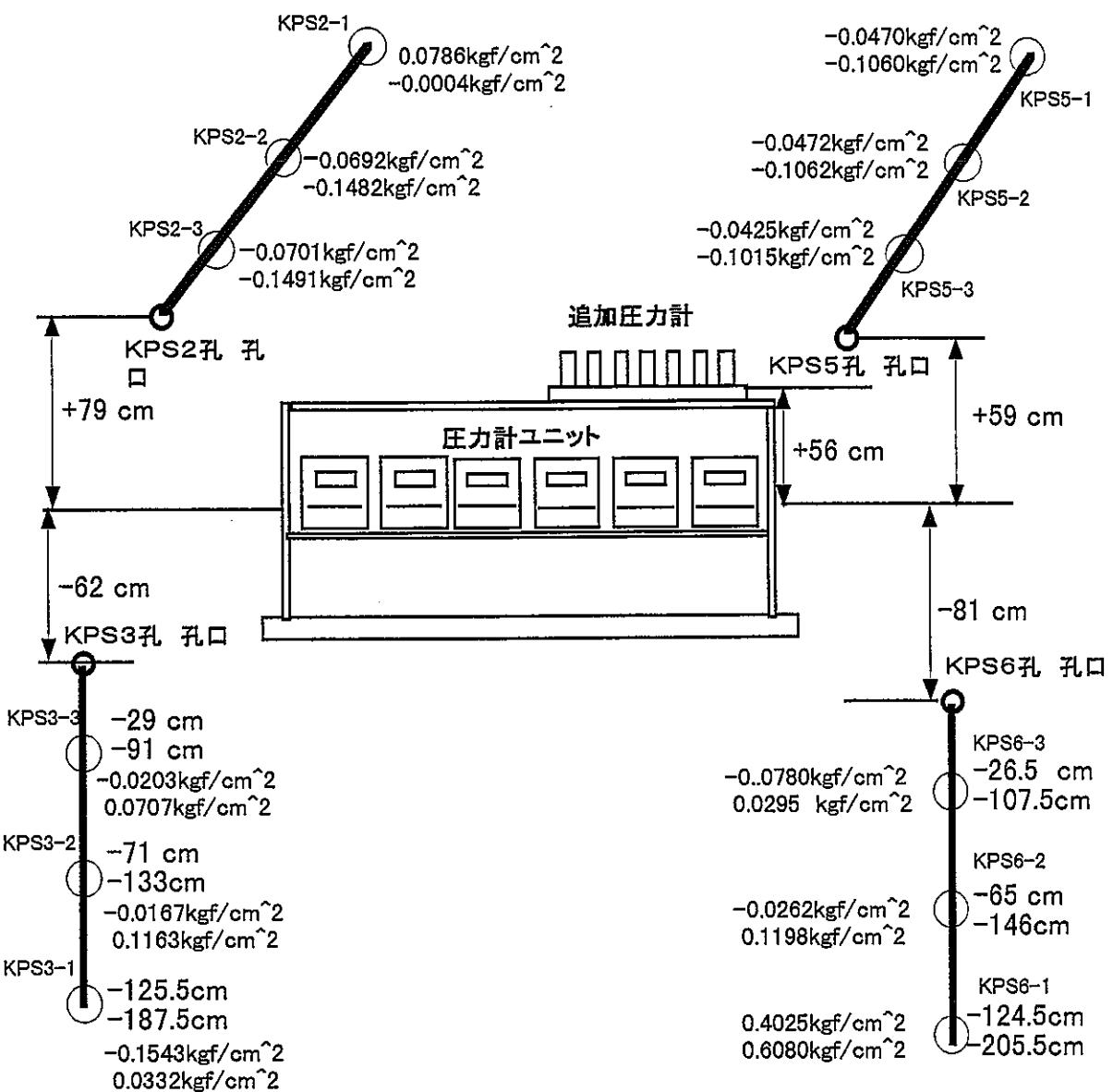
⑫KPS6-3区間

当区間は、間隙水圧測定時に使用した圧力計の負方向の零点ドリフトが大きかったため、図-8および9のグラフはこのドリフトを含んでいる。

配管の水理学的ゆるみ領域計測装置本体への切換後、間隙水圧の測定値が -0.08kgf/cm^2 程度に安定する傾向がみられるたので、透水試験の初期間隙水圧値、地盤の間隙水圧値共に透水試験開始直前の平均値を用いた。

表-4 間隙水圧一覧表

測定区間	KPS-2-1	KPS-2-2	KPS-2-3	KPS-3-1	KPS-3-2	KPS-3-3
測定区間中心深度(cm)	179.0	127.5	24.5	125.5	71.0	29.0
間隙水圧(kgf/cm ²)	0.0786	-0.0692	-0.0701	-0.1543	-0.0167	-0.0203
初期間隙水圧(kgf/cm ²)	0.0786	-0.0692	-0.0701	-0.1543	-0.0167	-0.0227
測定区間	KPS-5-1	KPS-5-2	KPS-5-3	KPS-6-1	KPS-6-2	KPS-6-3
測定区間中心深度(cm)	196.5	118.0	42.0	124.5	65.0	26.5
間隙水圧(kgf/cm ²)	-0.0470	-0.0472	-0.0425	0.4025	-0.0262	-0.0780
初期間隙水圧(kgf/cm ²)	-0.0470	-0.0380	-0.0296	0.4025	-0.0262	-0.0780



(注)

上段:-(孔口からの深度) cm

下段:-(受圧面からの深度) cm

KPS-2、5孔は試錐方向水平

上段: (受圧面を基準とした圧力表示) kgf/cm²

下段: (測定区間中心を基準とした圧力表示) kgf/cm²

図-5 間隙水圧測定結果 一覧図

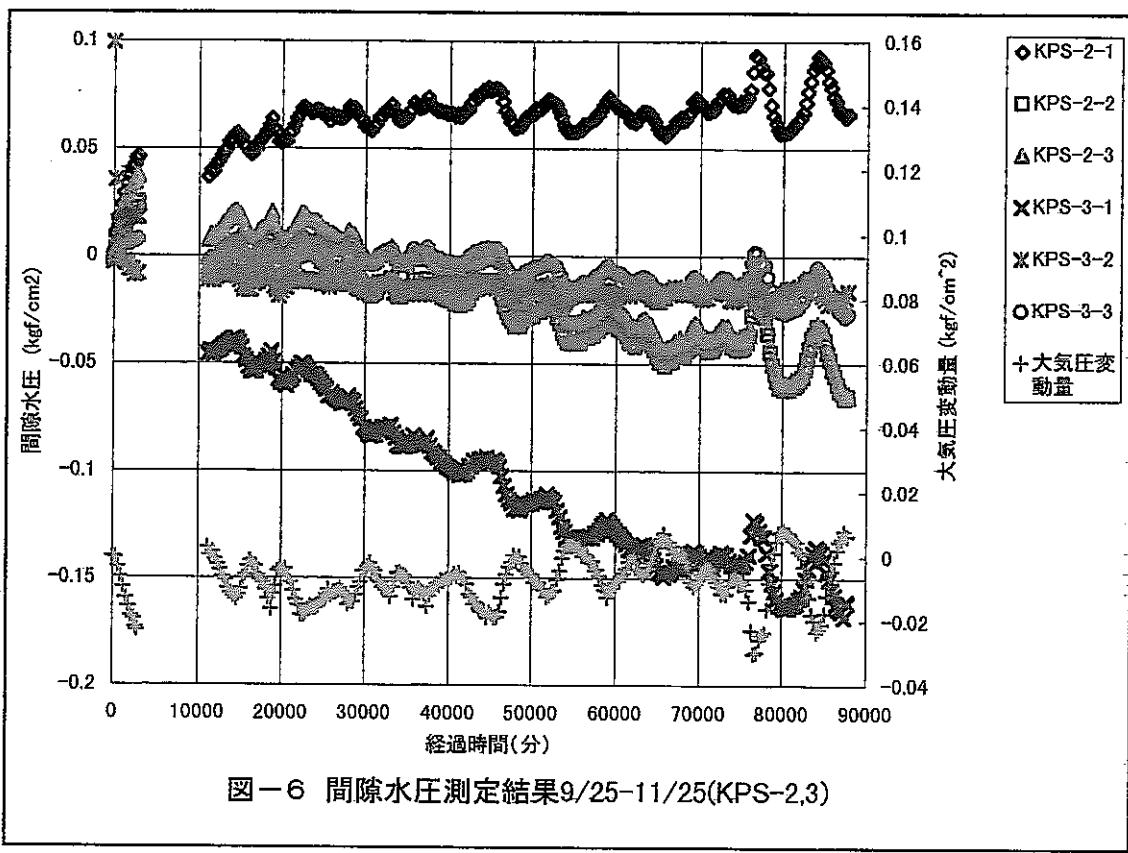


図-6 間隙水圧測定結果9/25-11/25(KPS-2,3)

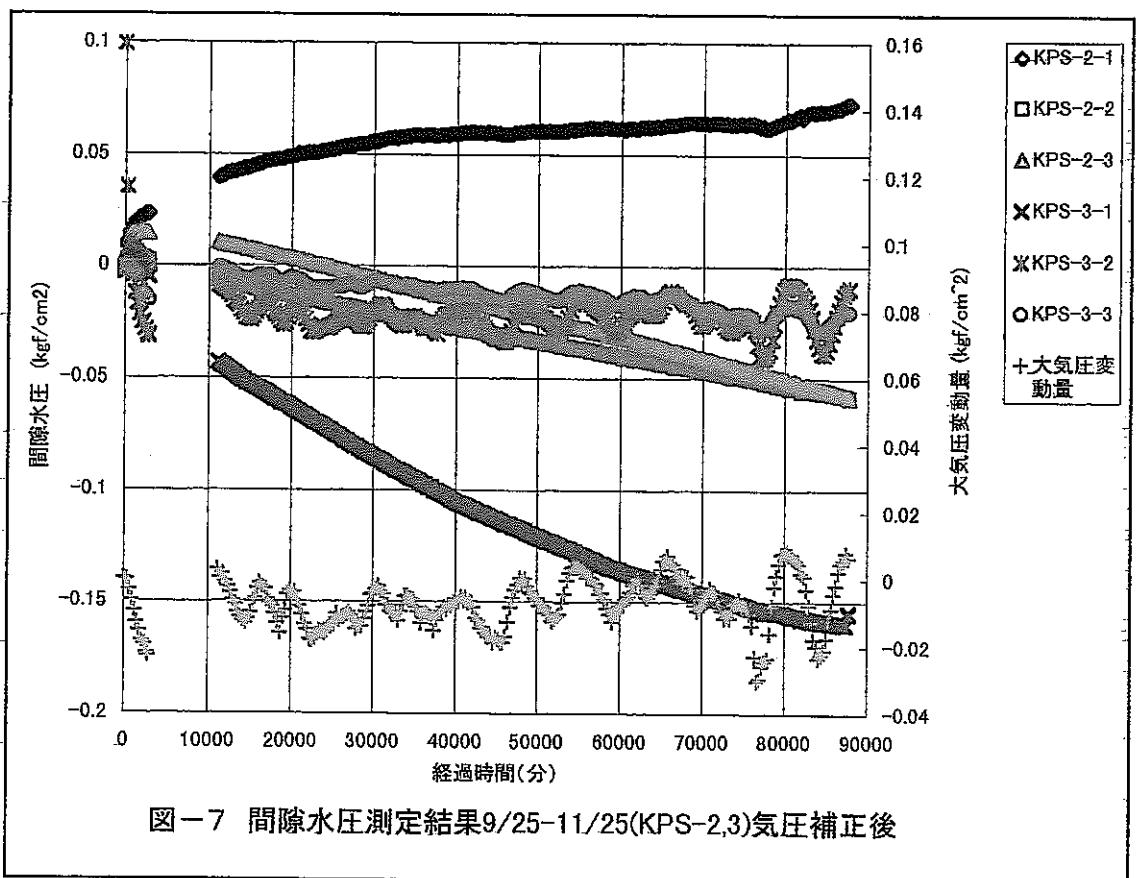
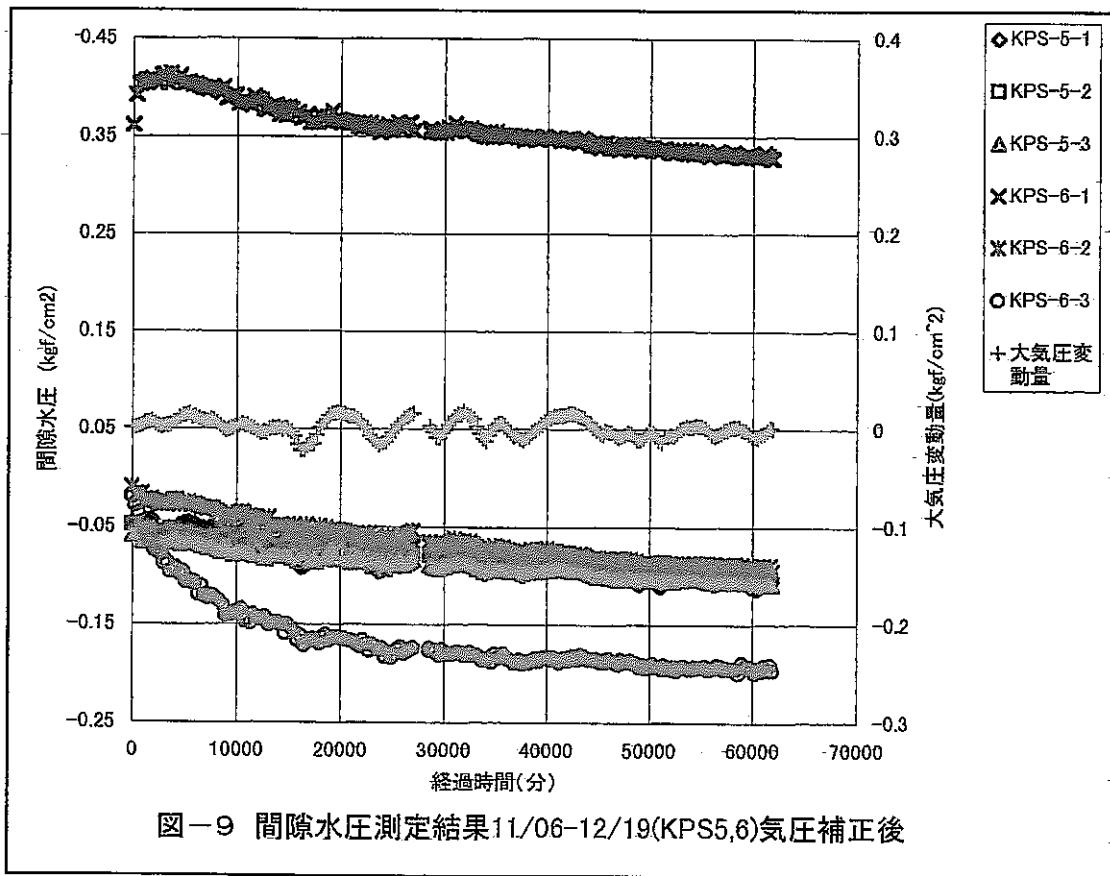
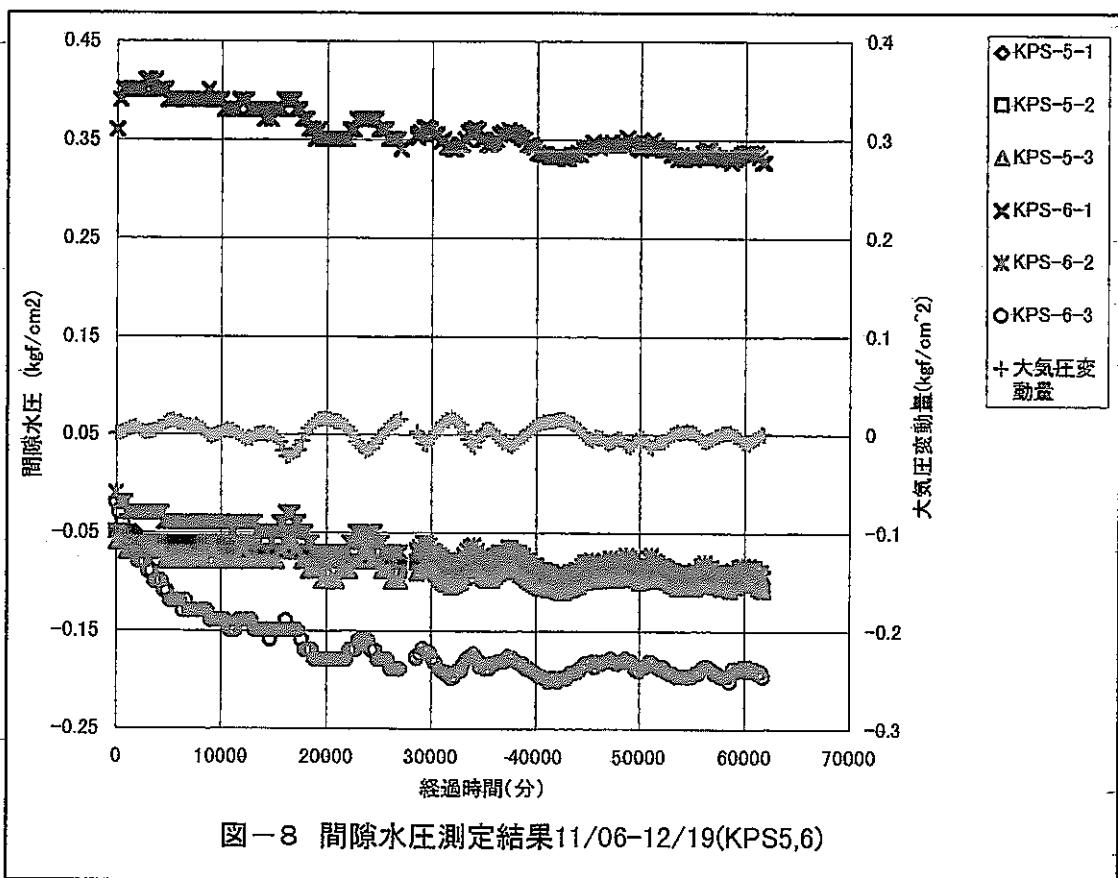


図-7 間隙水圧測定結果9/25-11/25(KPS-2,3)気圧補正後



3. 3. 2 定圧注水試験結果

各測定区間の試験結果を、図-10～21に示す。間隙水圧測定結果から測定区間は間隙水圧が低く定圧注水試験の注入流量が安定するまでに、約1日間から最大6日間の測定を行った。

各透水試験の終了判定結果を次に示す。

(1) KPS-2-1区間 (図-10参照)

同区間は、約2800分まで注水を継続したが、注水開始後約2000分で $0.05\text{cm}^3/\text{h}$ 程度の流量でほぼ安定しており、擬似的定常状態に達したと判断し、注水を終了した。

(2) KPS-2-2、-3、-3-1区間 (図-11、12、13参照)

どの区間も注水開始後1000～3000分(約1日)程度で注水流量が $0.05\text{cm}^3/\text{h}$ 以下となっている。これは流量計の測定下限値を下回っている可能性が高い。したがって、注水流量値は信頼性が低く、これらの区間の透水係数の算定値も参考値である。

(3) KPS-3-2区間 (図-14参照)

試験開始後約2300分以降ほぼ注水流量が安定したので疑似定常状態に到達したと判断した。

(4) KPS-3-3区間 (図-15参照)

注水を約60分継続した。注水流量は、本試験機の測定範囲を大幅に超えており、さらに、試験中、測定区間の圧力に有意な上昇がみられないで、このデータから計算される透水係数は信頼性が低い。

(5) KPS-5-1、-2、-3、-6-1、-6-2区間 (図-16、17、18、19、20参照)

どの区間も注水開始後800分(約0.5日)程度で注水流量が $0.05\text{cm}^3/\text{h}$ 以下となっている。これは流量計の測定下限値を下回っている可能性が高い。したがって、注水流量値は信頼性が低く、これらの区間の透水係数の算定値も参考値である。

(6) KPS-6-3区間 (図-21参照)

本区間では、約7000分間の注水試験を実施している。注水流量は、注水終了直前でも、若干減少傾向を示し、厳密には疑似定常状態に到達していないと判定されるが、最終1000分間の注水流量の減少量は $0.01\text{cm}^3/\text{h}$ 以下で最終注水流量 $0.449\text{cm}^3/\text{h}$ の3%以下である。したがって、この後の注入流量の過大評価分は透水係数の値に大きな影響を及ぼさないと判断できるので注水を終了した。

(7) 容量1～0.05cm³/hの流量計の零点補正

KPS-6-3区間以外の測定区間で容量1～0.05cm³/hの流量計を使用し測定した流量値は、同流量計の測定下限値付近に集中した。これらの測定下限値付近の流量値の信頼性を確認するため、同流量計の前後の配管を閉鎖し、流量が零の場合のドリフト出力値を確認した。この零点の測定は2回実施した。この結果、流量が零の場合のドリフト量は、0.0276～0.0287cm³/hで、データの変化幅は、0.0032～0.0039cm³/hであった。

零点のドリフト量は、上記の値の平均値0.028cm³/hとし、透水係数の計算に使用する流量は、透水試験中の測定値からこのドリフト量を引いた値とした。

今回行った定圧注水法の透水試験では、KPS-3-2区間および、KPS-6-3区間において、本計測装置の測定範囲内に入る測定結果が得られたが、KPS-3-3区間では測定限界以上、これら3区間以外では、測定限界以下の透水性を示したために、KPS-3-2、-6-3区間を除く各測定区間の透水係数の計算値は、参考値である。

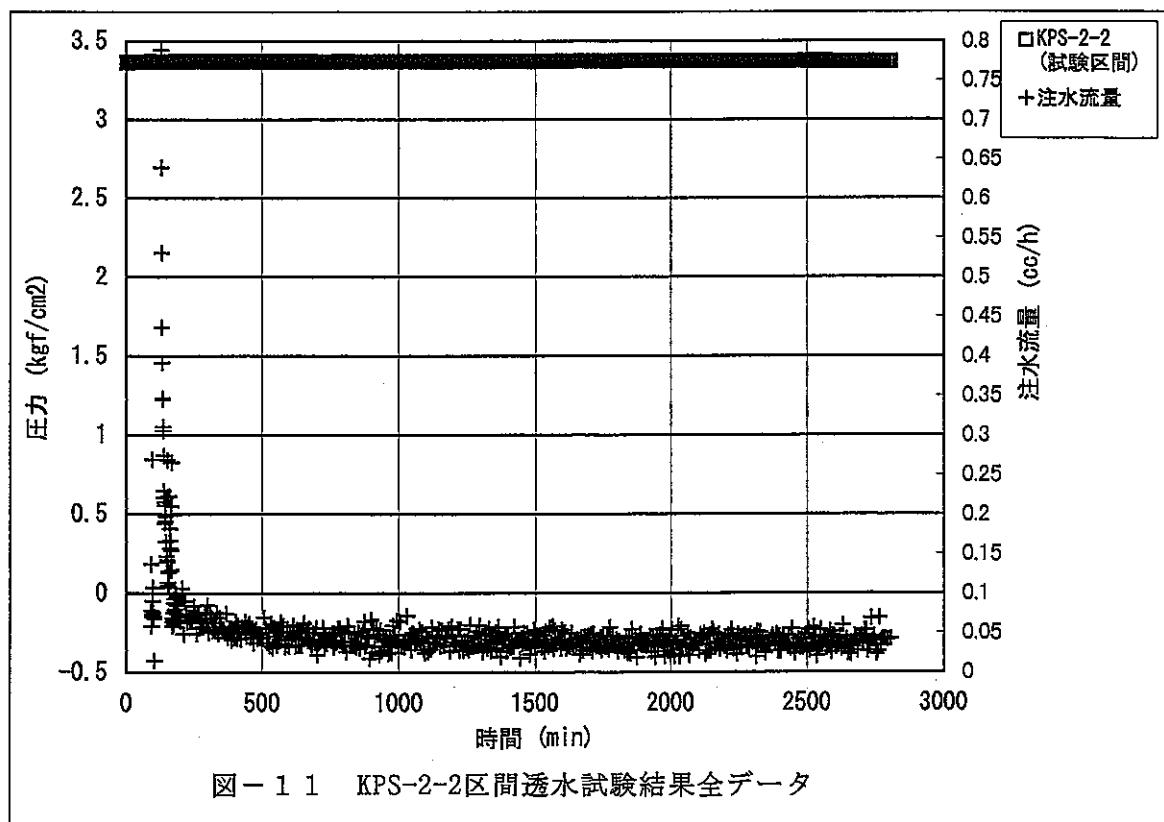
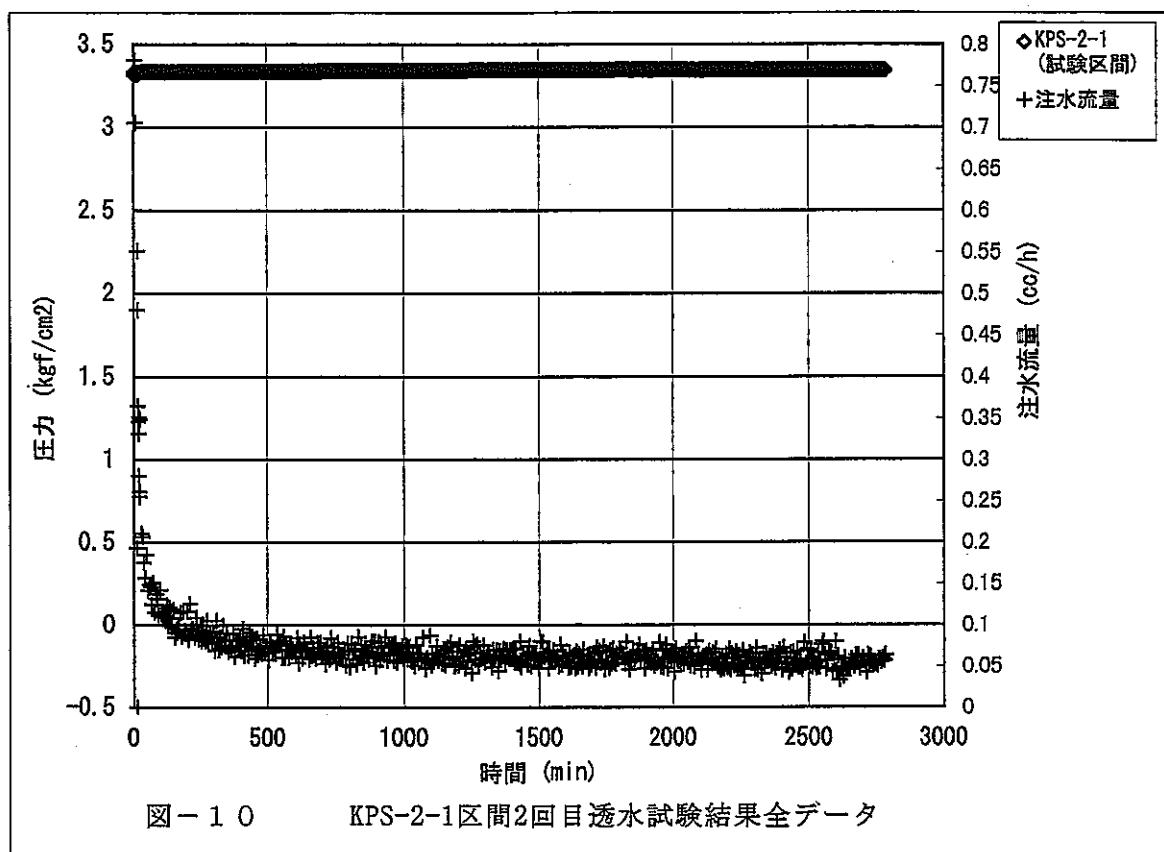
各測定区間の定圧注水試験結果による透水係数の算定条件と算定値を表-5に示す。

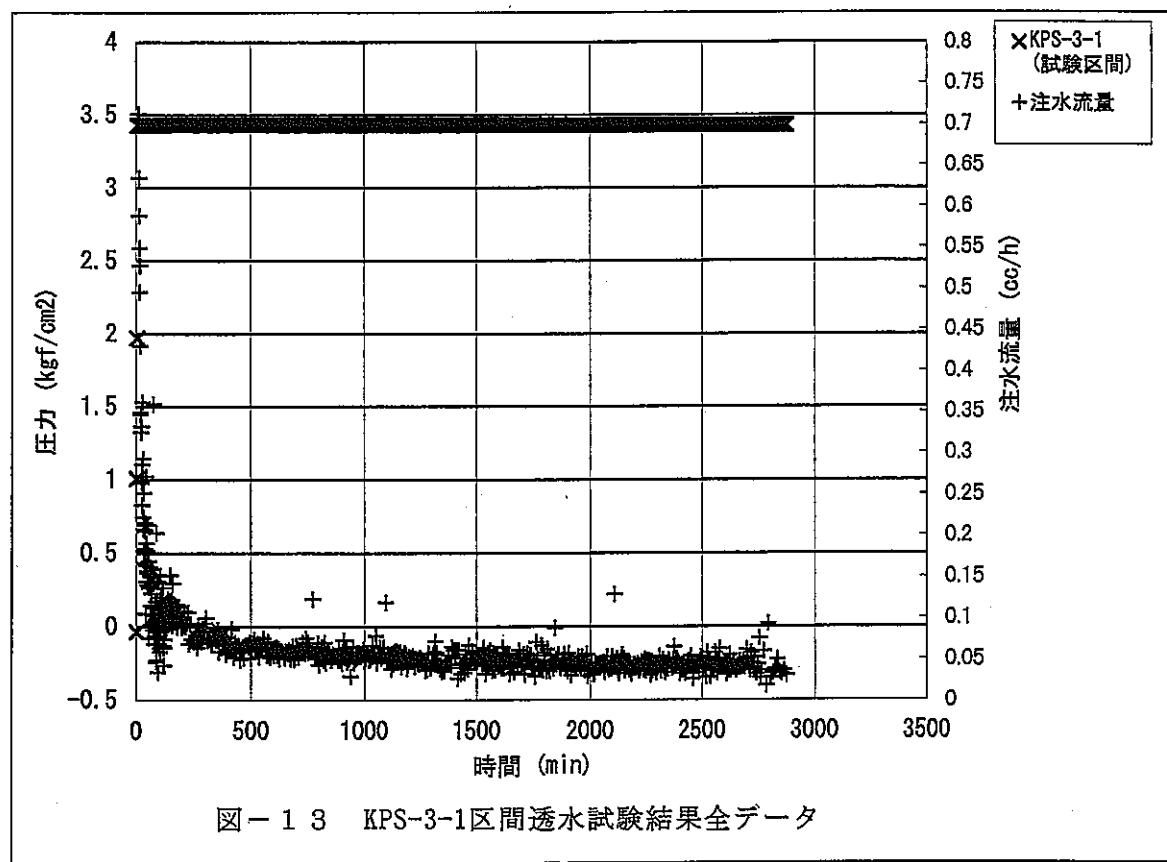
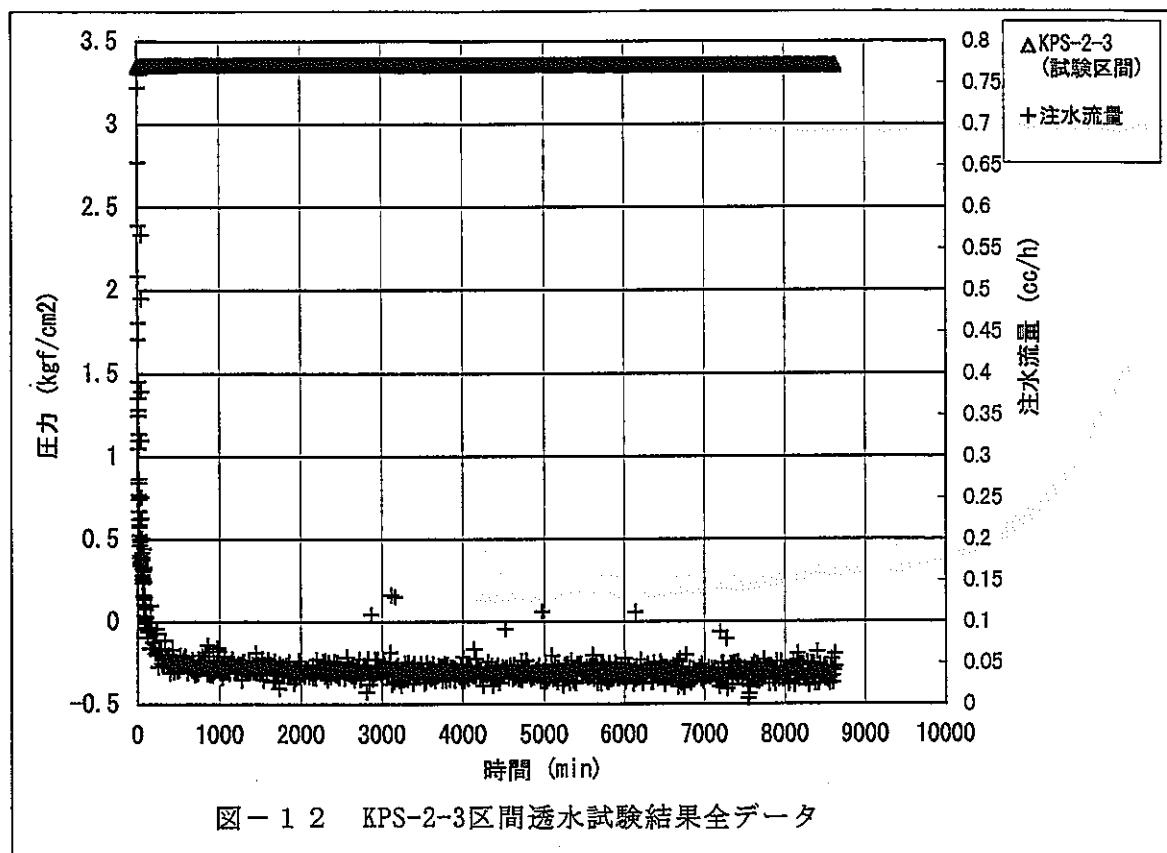
表-5 定圧注水試験結果の一覧表

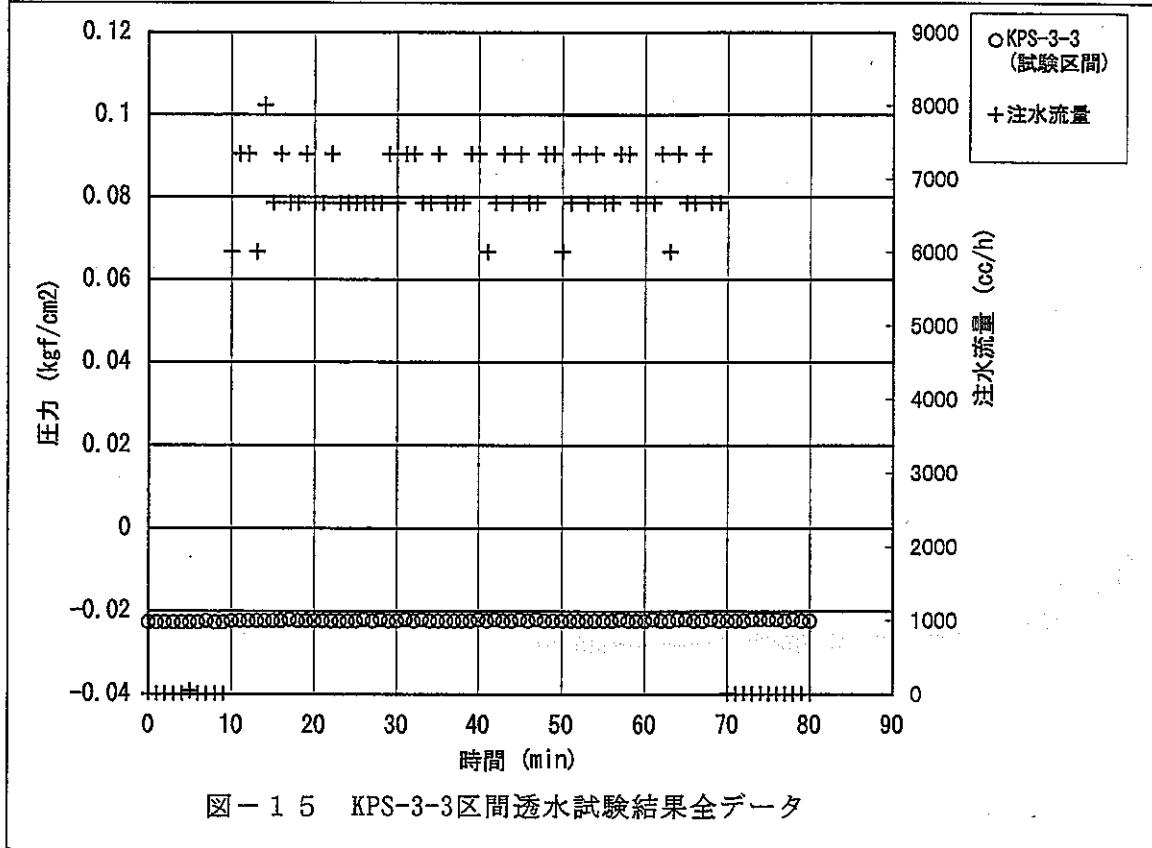
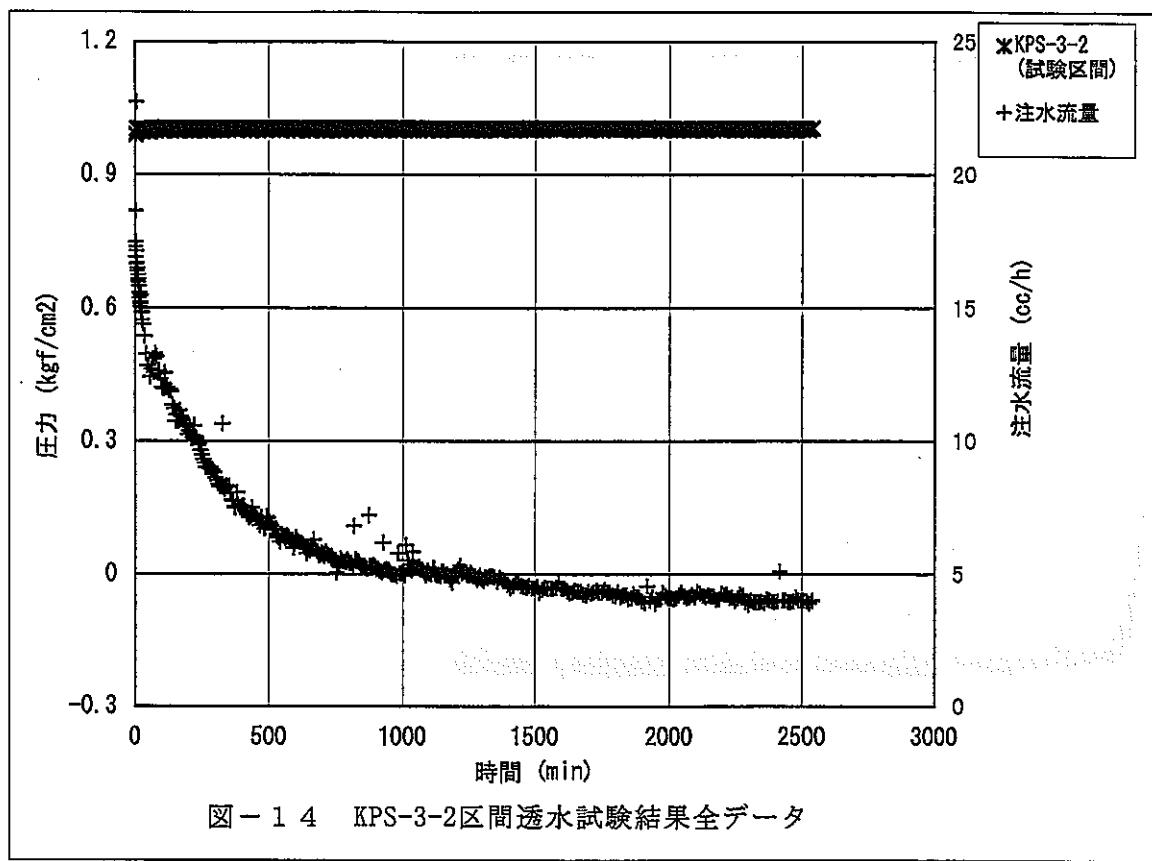
測定区間	区間深度 (cm)	初期間隙水 圧(kgf/cm ²)	注水圧力 (kgf/cm ²)	注水差圧 (cm)	注水流量 (cm ³ /s)	透水係数 (cm/s)
KPS-2-1	179.0	0.0786	3.346	3267.4	(6.94E-6)	(3.7E-11)
KPS-2-2	127.5	-0.0692	3.3694	3438.6	(3.33E-6)	(1.7E-11)
KPS-2-3	24.5	-0.0701	3.356	3426.1	(2.78E-6)	(1.4E-11)
KPS-3-1	125.5	-0.1543	3.4311	3585.4	(4.17E-6)	(2.0E-11)
KPS-3-2	71.0	-0.0167	1.0035	1020.2	1.12E-3	1.9E-8
KPS-3-3	29.0	-0.02272	-0.0223	0.42	(1.912)	(7.9E-2)
KPS-5-1	196.5	-0.047	3.3745	3421.5	(8.33E-7)	(4.2E-12)
KPS-5-2	118.0	-0.038	3.3379	3375.9	(4.17E-6)	(2.1E-11)
KPS-5-3	42.0	-0.0296	3.2952	3324.8	(1.67E-6)	(8.7E-12)
KPS-6-1	124.5	0.4025	3.3963	2993.8	(1.67E-6)	(9.6E-12)
KPS-6-2	65.0	-0.0262	3.3128	3339.0	(2.5E-6)	(1.3E-11)
KPS-6-3	26.5	-0.078	3.2831	3361.1	1.25E-4	6.4E-10

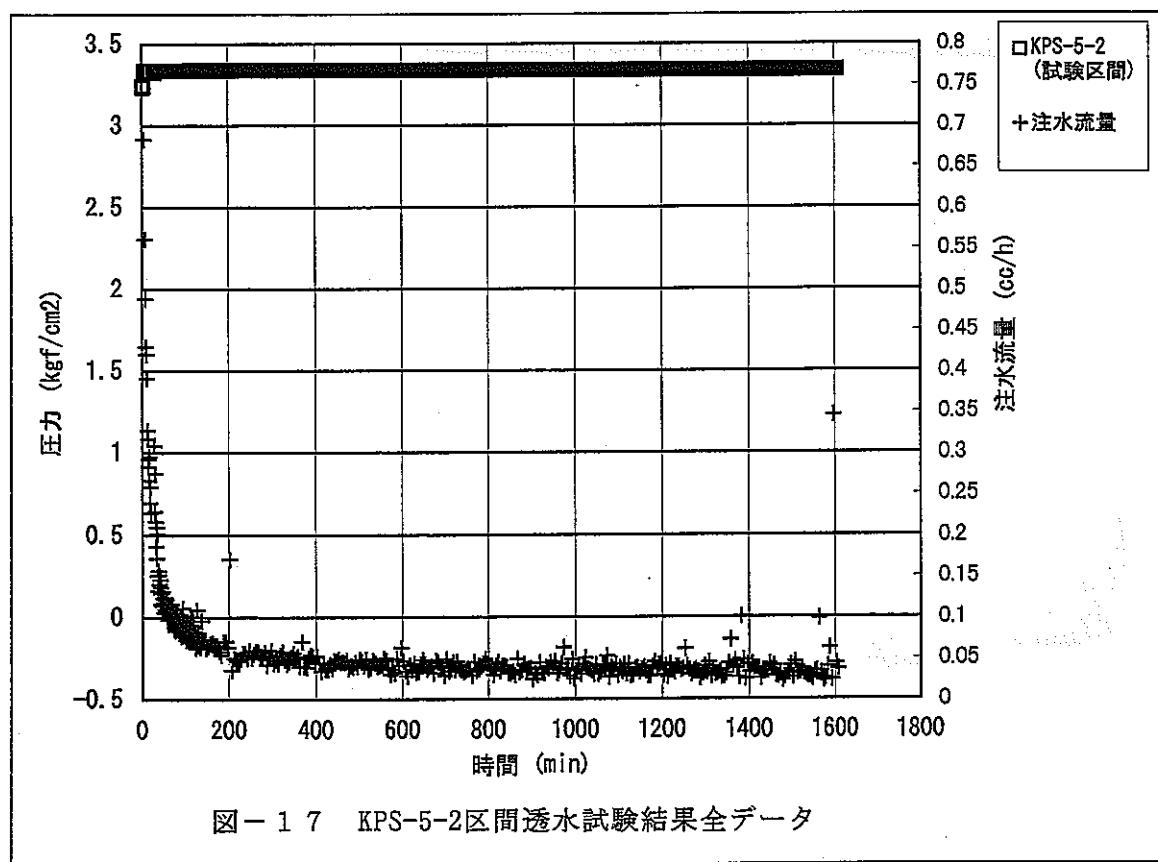
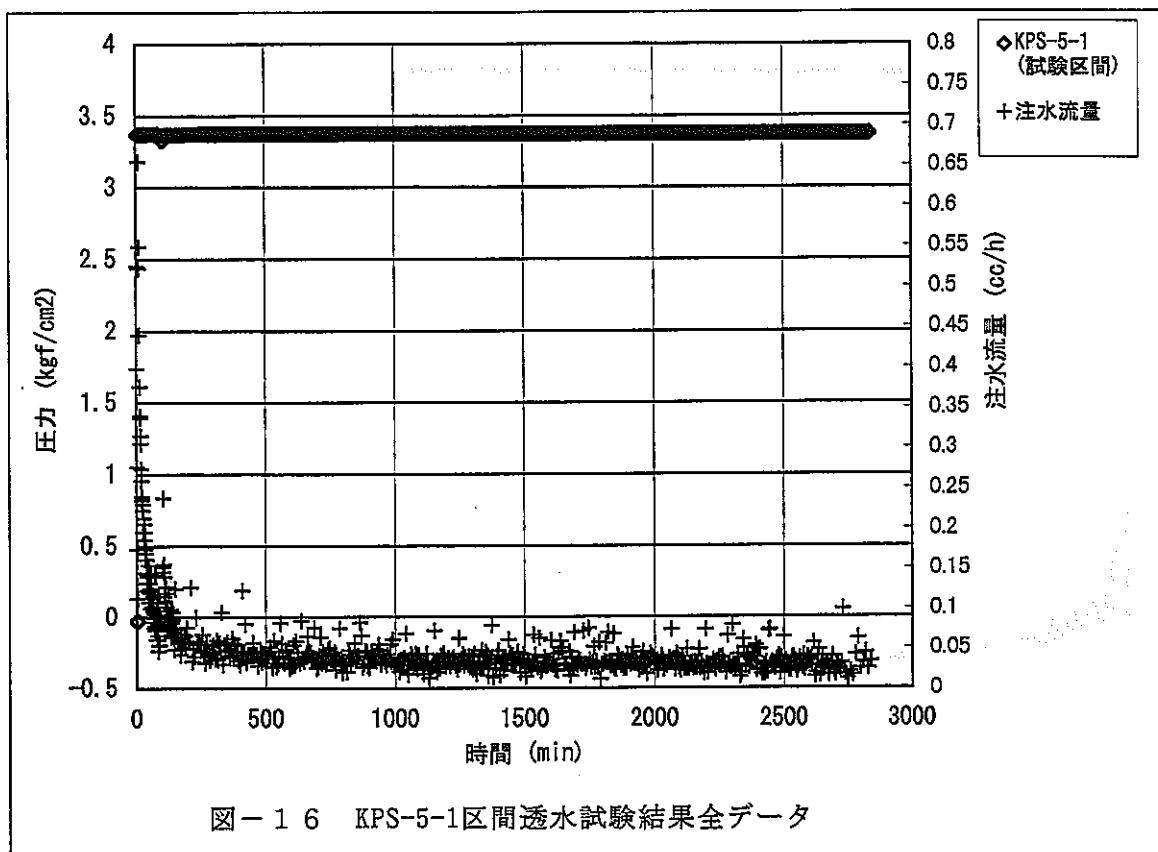
注) () 内の流量値は測定範囲外でありデータの信頼性が低い、

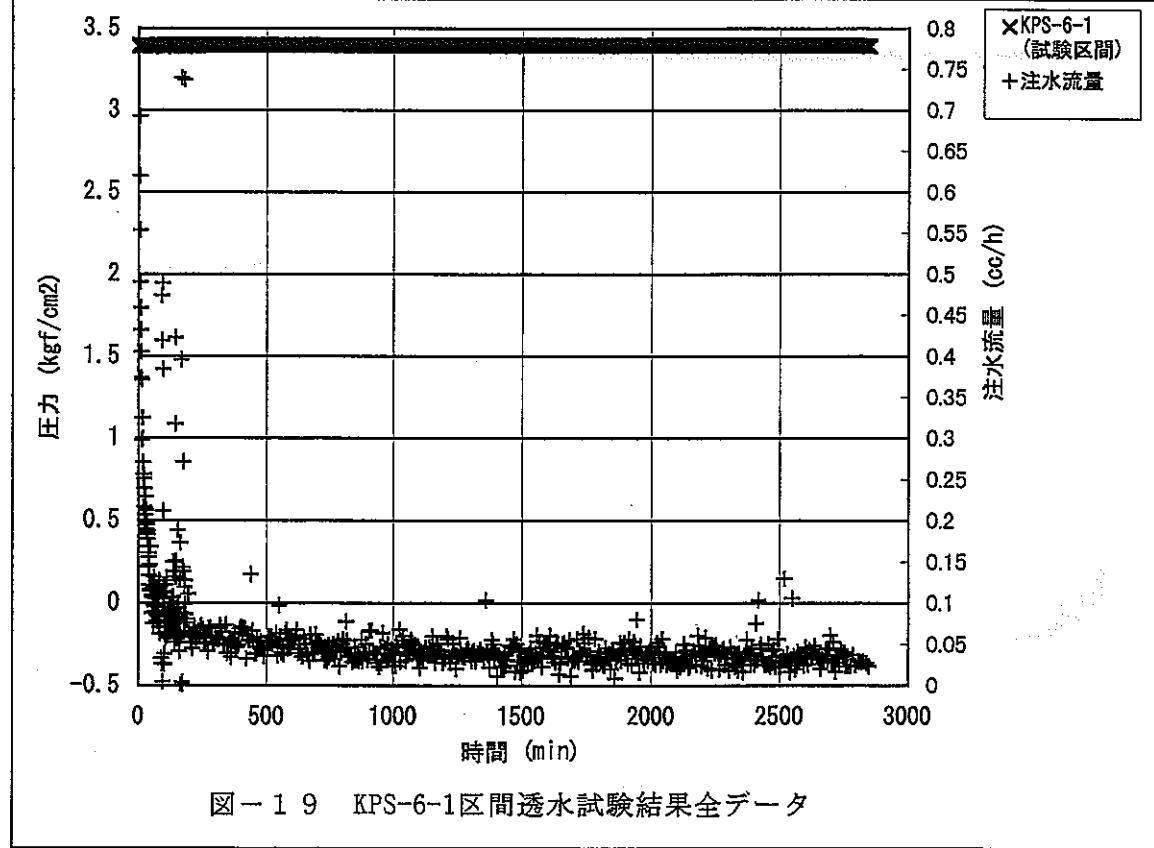
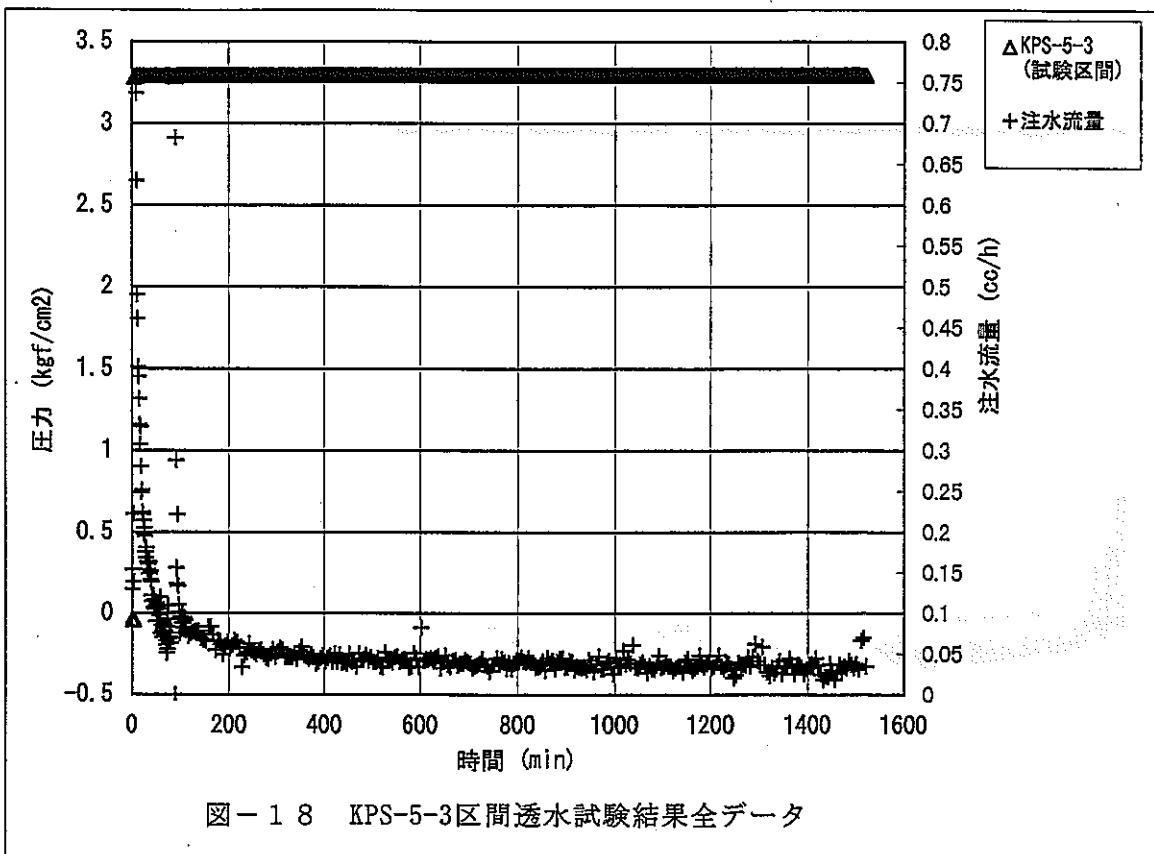
したがって、() 内の透水係数は参考値である











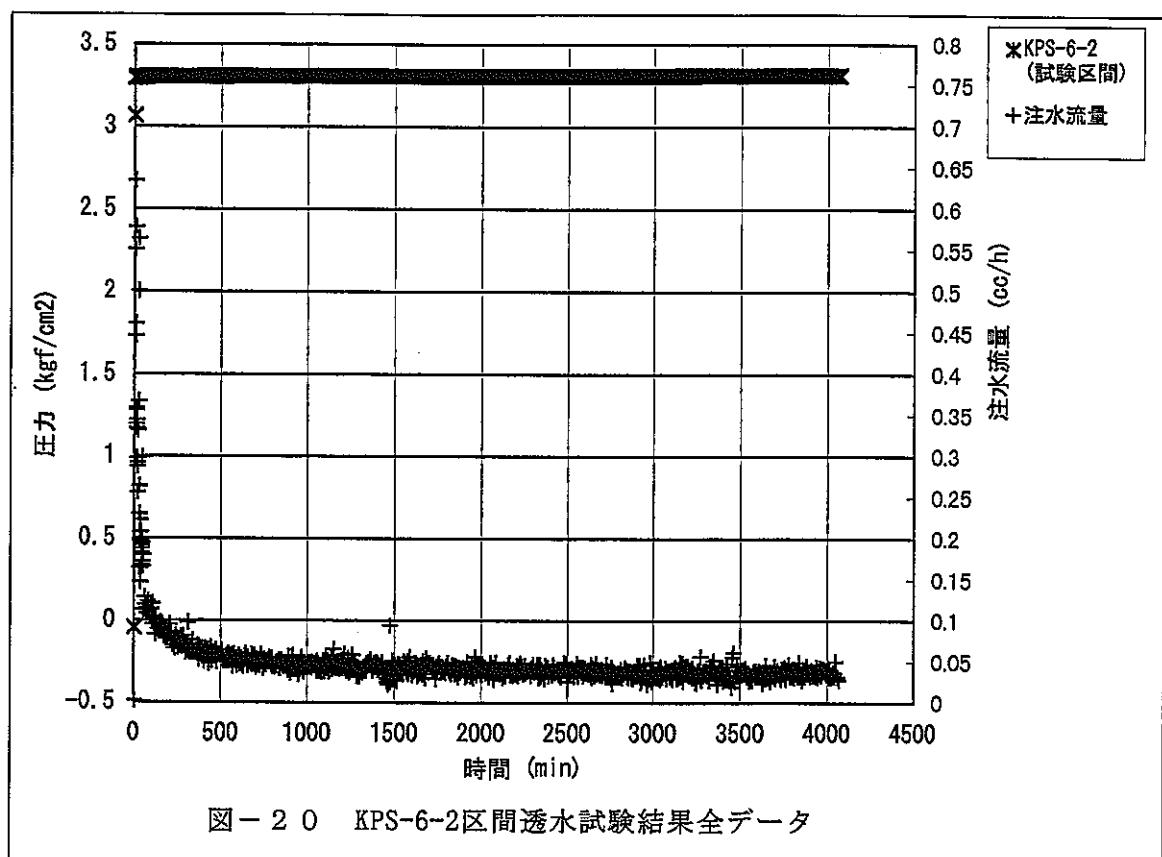


図-20 KPS-6-2区間透水試験結果全データ

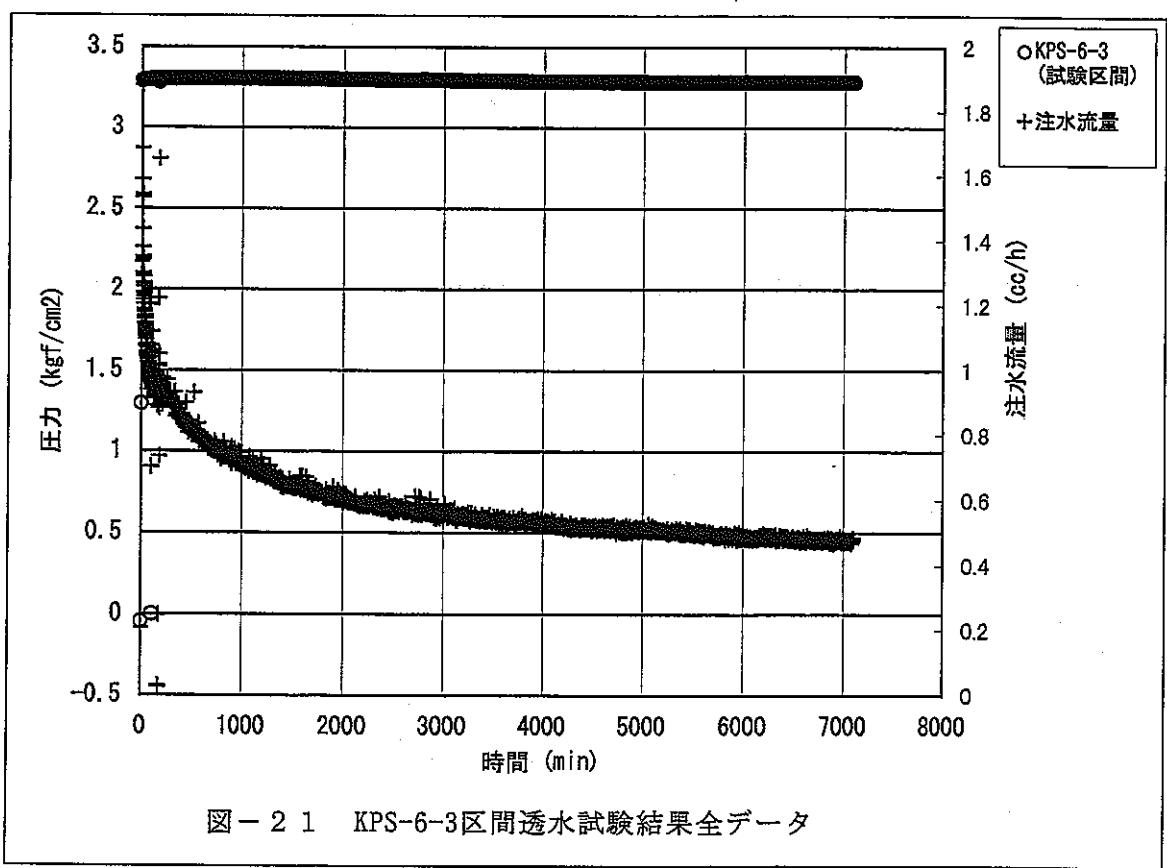


図-21 KPS-6-3区間透水試験結果全データ

3. 3. 3 非定常透水試験結果

今回の業務では、基本的に定圧注水試験法により透水試験を実施したが、今後、緩み領域における非定常透水試験法の適用性を検討するデータを取得するために、加圧注水による非定常透水試験を工程上適用可能な測定区間において実施した。

試験を実施する測定区間周辺の岩盤および測定配管系統内の圧力状態を均一化するために、非定常透水試験は、定圧注水試験の直後に実施した。したがって、定圧注水試験の注水圧力を初期隙水圧として、さらに0.4~0.5kgf/cm²程度の急速な加圧注水を行った後、測定区間の圧力が定圧注水試験の注水圧力まで回復する圧力の消散過程を測定した。また、KPS-3-2、-6-1、-6-3区間において、定圧注水試験の注水圧力が消散した状態で、非定常透水試験を実施し、定圧注水を行った後の状態との比較データを取得した。また、圧力の消散過程の測定は、極端に消散の遅い試験を除き、原則として試験初期に加えた圧力が90%以上消散するまで測定した。

十分に圧力の消散過程が測定できた場合の測定データは、試験前に定圧注水の実施されていない試験を除いて全て $t - \log H / H_0$ グラフで上に凸な曲線となっている。これは、測定区間周辺の隙水圧が定常状態よりも高い状態から、非定常透水試験を開始した影響が出ている。したがって、Cooper法の標準曲線法は適用できず、測定結果による透水係数の計算は便宜的に Hvorslev の非定常式により行った。また、 $t - \log H / H_0$ グラフの直線当てはめは、岩盤と測定系統内の貯留性の影響が大きく、試験初期の曲率が極端に小さい部分と、上に凸な曲率が明瞭になる試験末期の部分を除き行った。

今回の透水試験では、必要な配管の切換は全て水中または、配管に水を満たした状態で行ったので、測定配管系統内の水の貯留係数は、平成6年度および7年度に求めた値の中で、ナイロンチューブ内に空気を混入しない場合の値を用いた。この値は、表-6に示す。

試験結果は、表-7、および図-22~31に示す。

表-6 ナイロンチューブの注水量一圧力関係

注水量 cm ³	ΔQ cm ³	圧力 kgf/cm ²	ΔP kgf/cm ²	Pcm ^{5/kgf}
0		-0.0452		
0.118	0.118	0.14018	0.18538	0.63654
0.59	0.472	0.99383	0.85365	0.55292
0.826	0.236	1.45269	0.45886	0.51431
1.062	0.236	1.93101	0.47832	0.4934
1.298	0.236	2.50545	0.57444	0.41084
1.534	0.236	2.99864	0.49319	0.47851
1.77	0.236	3.48954	0.49091	0.47851
2.006	0.236	3.98731	0.49777	0.47412
2.242	0.236	4.48165	0.49434	0.47741
2.56107	0.31907	5.15	0.66835	0.47741

外挿データ

表-7 非定常透水試験結果の一覧

測定区間	透水試験開始	初期水頭差H0	T1	T2	H1/H0	H2/H0	$\ln(H1/H2)/(T2-T1)$	貯留量	仮想半径 θ^2	非定常試験透
	kgf/cm ²	kgf/cm ²	sec	sec				cm ^{5/kgf}	cm ²	cm/s
KPS-2-1	5.22025	0.45021	1785	13185	0.8393	0.40477	6.40E-05	0.57485	0.00018	5.7E-10
KPS-2-2	3.87053	0.50103	7275	168135	0.91374	0.5731	2.90E-06	0.56899	0.00018	2.5E-11
KPS-2-3	3.81883	0.46306	22410	141210	0.82596	0.39081	6.30E-06	0.57707	0.00018	5.6E-11
KPS-3-1	3.95843	0.5274	12450	145650	0.84444	0.40138	5.58E-06	0.4734	0.00015	4.1E-11
KPS-3-2	1.51057	0.50608	60	600	0.64255	0.14834	2.71E-03	0.53314	0.00017	2.2E-08
KPS-3-2,2	0.45958	0.47972	1850	4850	0.49389	0.39084	7.80E-05	0.57316	0.00018	6.9E-10
KPS-5-1	3.93904	0.5646	66812	588812	0.80675	0.40078	1.34E-06	0.56946	0.00018	1.2E-11
KPS-6-1	0.62254	0.60911	30646	329986	0.93567	0.8521	3.13E-07	0.43479	0.00014	2.1E-12
KPS-6-3	3.76871	0.48638	875	3365	0.80723	0.39609	2.86E-04	0.36736	0.00012	1.6E-09
KPS-6-3,2	0.53414	0.57185	64780	239980	0.80474	0.50256	2.69E-06	0.42842	0.00014	1.8E-11

注) T1、T2 : 加圧注水後の経過時間
 H1、H2 : T1、T2時の測定区間圧力 (または水頭)

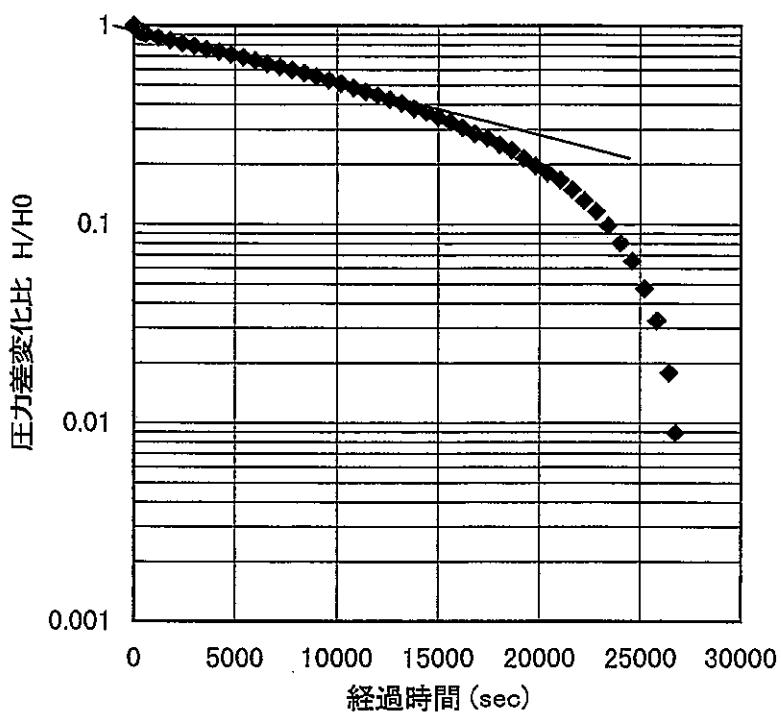


図-22 KPS-2-1区間非定常透水試験結果

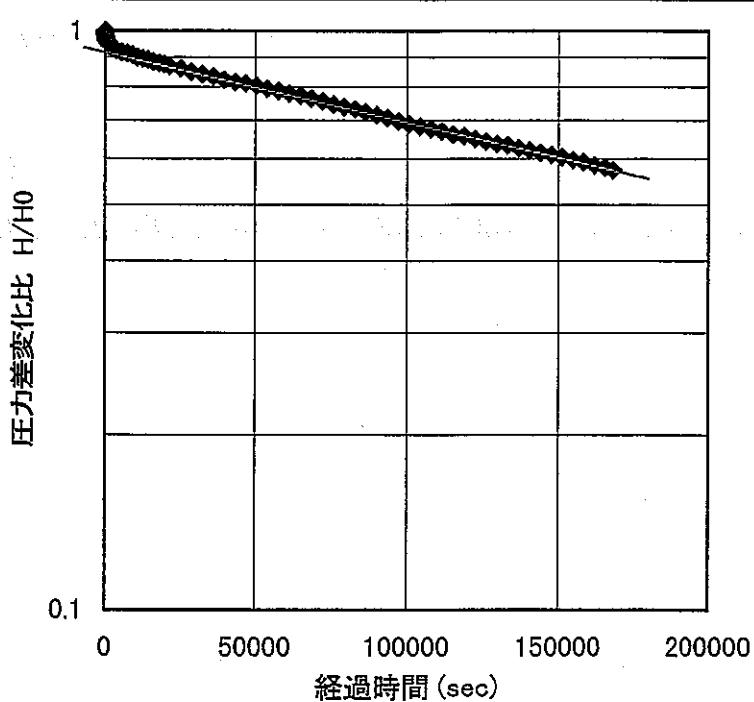


図-23 KPS-2-2区間非定常透水試験結果

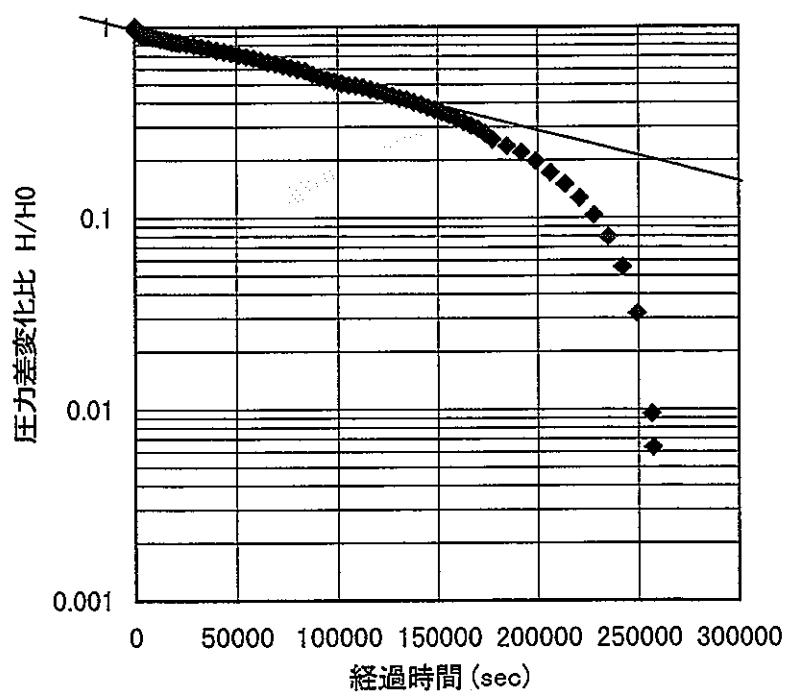


図-24 KPS-2-3区間非定常透水試験結果

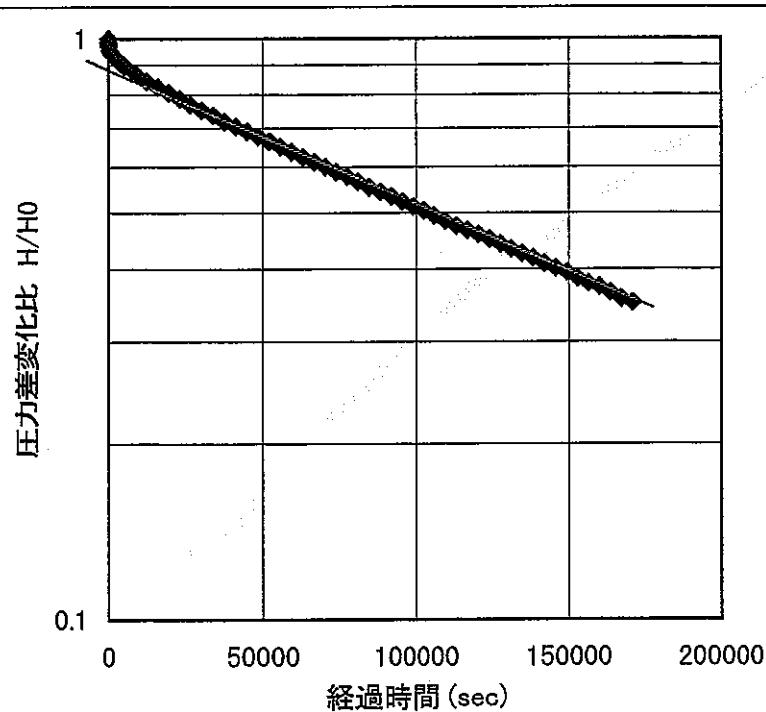


図-25 KPS-3-1区間非定常透水試験結果

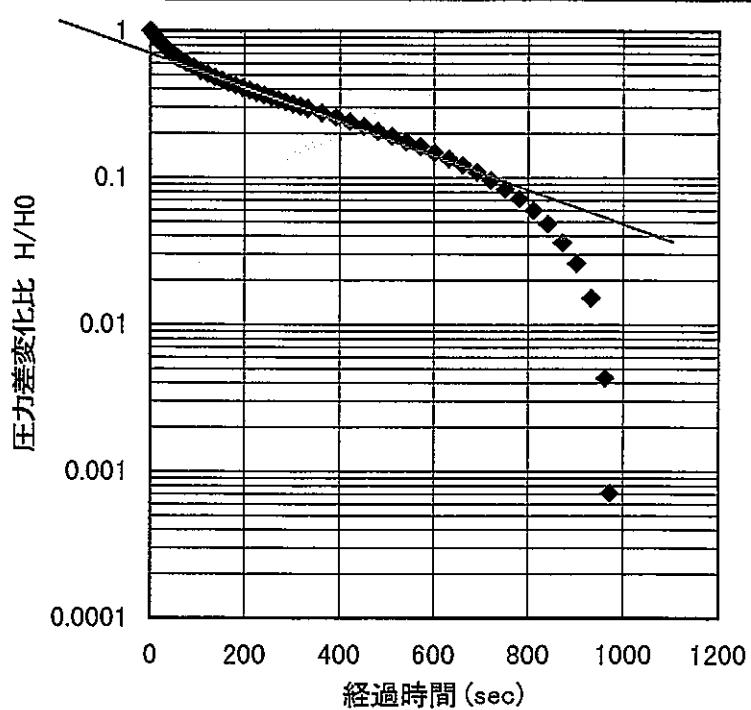


図-26 KPS-3-2区間非定常透水試験結果(1回目)

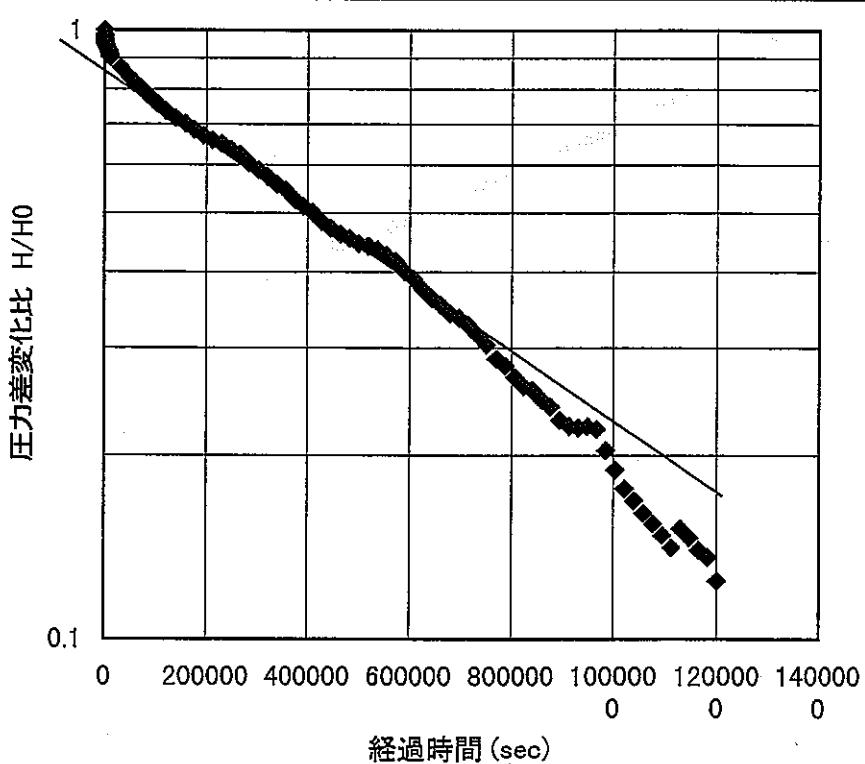


図-27 KPS-5-1区間非定常透水試験結果

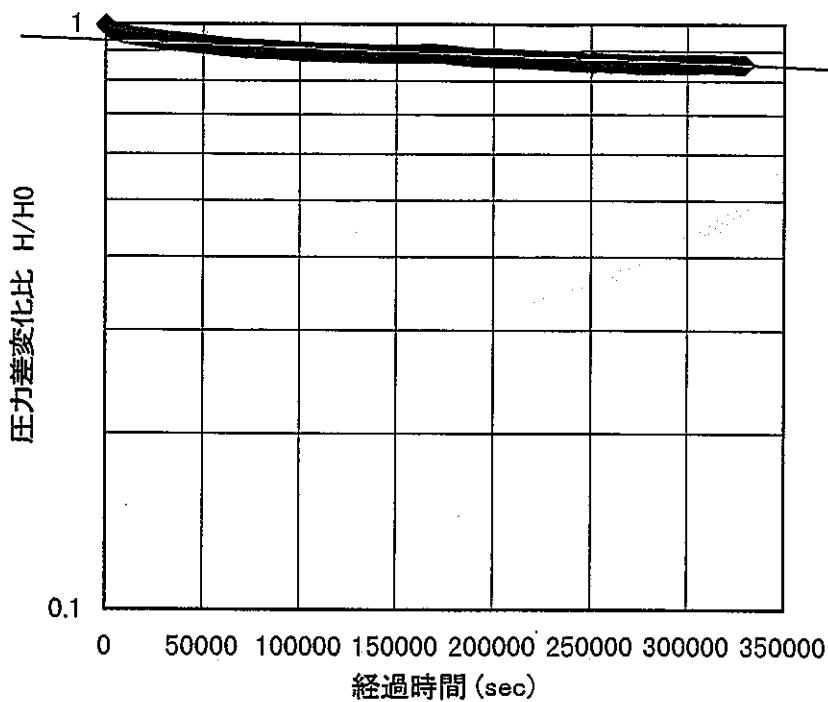


図-28 KPS-6-1区間非定常透水試験結果

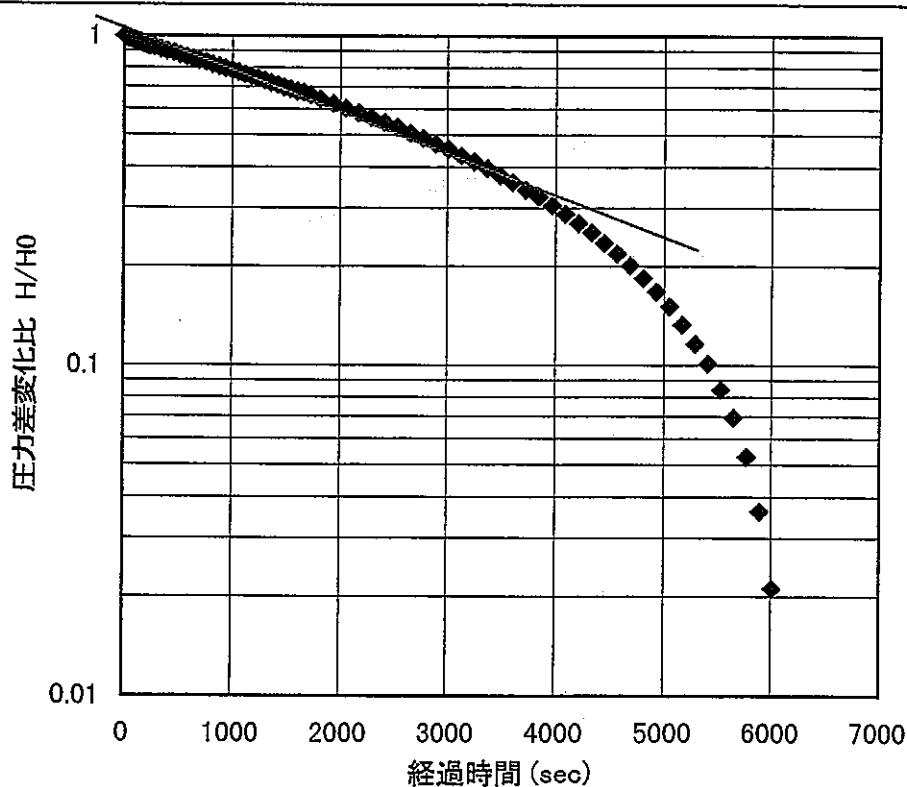


図-29 KPS6-3区間非定常透水試験結果

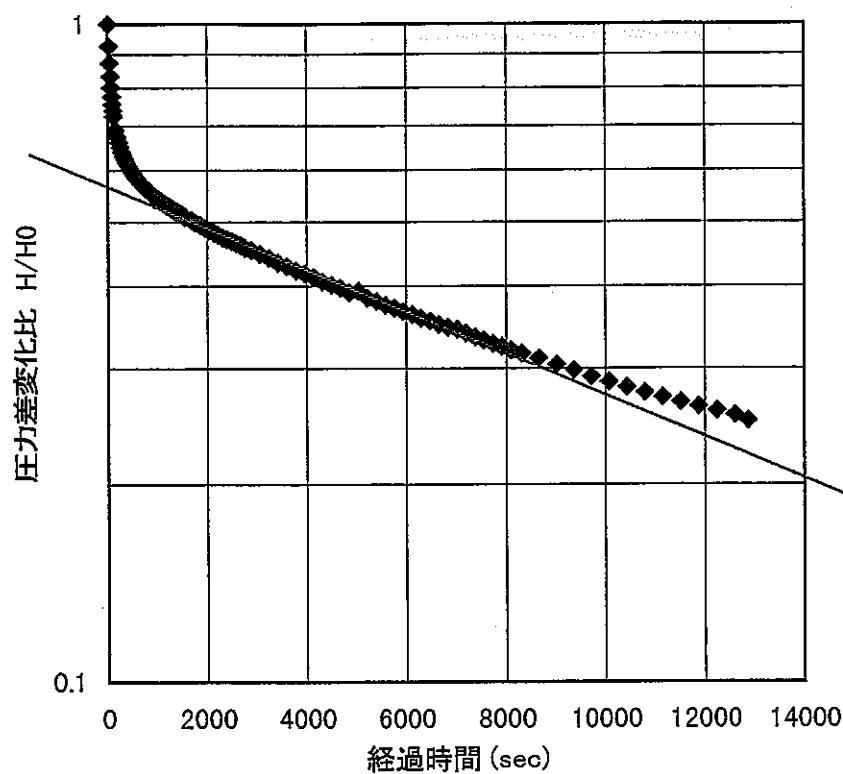


図-30 KPS-3-2区間非定常透水試験結果(2回目)

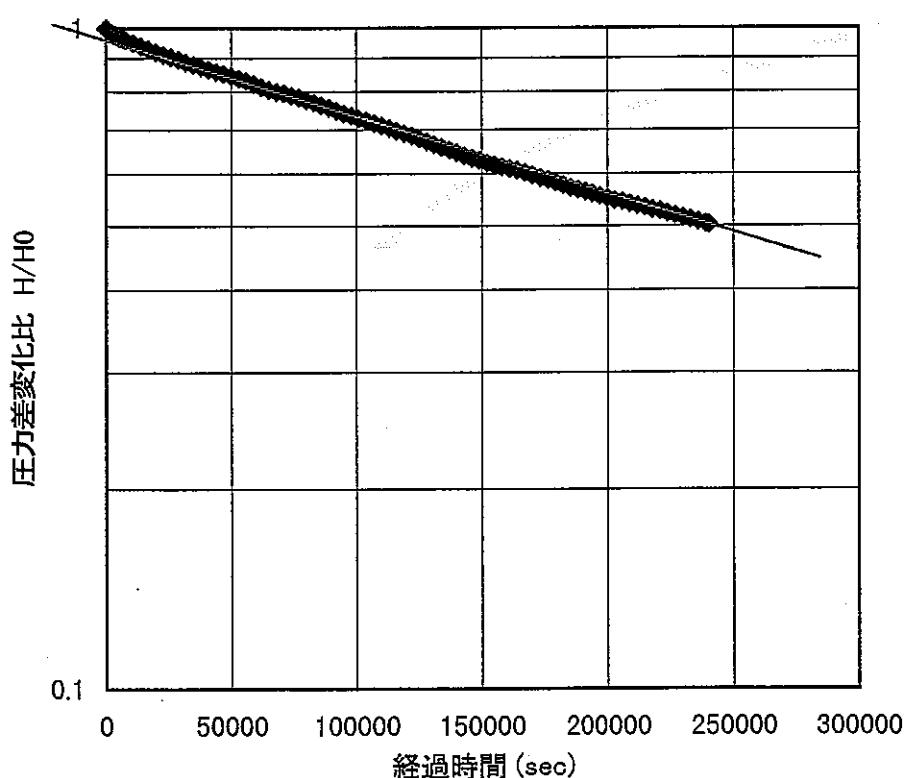


図-31 KPS6-3区間非定常透水試験結果(2回目)

4. 考察

4. 1 間隙水圧

(1) 気圧補正結果

間隙水圧の測定に使用した間隙水圧計は、KPS-5-1区間を除いて受圧面の背面に大気が導入されている。よって、間隙水圧計はその測定値に気圧変動の影響を受け、気圧が上昇・下降すると見掛け上測定圧力が下降・上昇する。したがって、気圧変動に対し $1\text{hPa}=0.00102\text{kgf/cm}^2$ として圧力計の指示値に加・減算することによって気圧変動の影響を補正することができる。間隙水圧測定結果（図-6、8）に対して気圧補正した結果から、得られる各測定区間の間隙水圧の特徴を以下に述べる。なお、気圧補正後の間隙水圧測定結果を図-7、9に示す。

- ①KPS-3-2区間とKPS-3-3区間は、気圧と同じ傾向の増加・減少が残り、大気（坑道壁面）と分離されていないことを示している。
- ②上記の2区間を除くその他の測定区間は全て、気圧と同じ傾向の変動が小さい経時変化を示し、これらの測定区間と坑道壁面の気圧とがKPS-3-2、-3-3区間に比べて分離されていることを示す。
- ③KPS-2-1区間は、試錐孔口からの深度も深く、坑道壁面の気圧と分離されているが、間隙水圧の安定が比較的早い特徴を示している。
- ④KPS-6-3区間は、KPS-3-2および、KPS-3-3区間とその他の測定区間との中間の透水係数を示し、試錐孔口にも近い位置にあるが、単純な間隙水圧の経時変化（図-9）からは、同時に測定した他の測定区間に比べて坑道壁面の大気圧との連結性が高い傾向を明確に認めることはできない。この測定区間に使用した間隙水圧計のドリフトにより測定値の上昇・下降傾向が見かけ上つぶれてしまっているものと考えられる。

間隙水圧は、気圧の上昇・下降に対応して変動し、その応答特性は坑道壁面と測定区間との水理的な連結の程度を表すと考えられる。

気圧補正を行った間隙水圧（図-7、9）の気圧の影響を示す波形の振幅と、気圧の波形の振幅との比を、KPS-3-2、-3-3、-5-2、-5-3、-6-3区間について求めた結果を図-32に示す。上記以外の測定区間は、間隙水圧の単調な上昇又は下降傾向が卓越し、気圧と同じ傾向を示す波形が明瞭に読みとれなかった。また、波形の読みとることができた測定区間でも、KPS-3-2、-3-3区間以外の区間は、波形の振幅が小さく、その上に測定値の単調な減少傾向があるために、波形の凹部・凸部の頂点の読みとりに誤差があるものと考える。

測定区間の透水性が高くなると、基本的に振幅比が大きくなると考えられるが、以下に示す特徴のため、今回の測定データのみでは、透水性と振幅比に正の相関があると認めにくい。また、下記の特徴は3. 3. 1項および上記の④に述べた事項と一致している。

⑤KPS-3-3区間の振幅比がこの区間の透水性に比べて小さい。

⑥KPS-6-3区間の振幅比は、振幅比の値のばらつきが大きい。

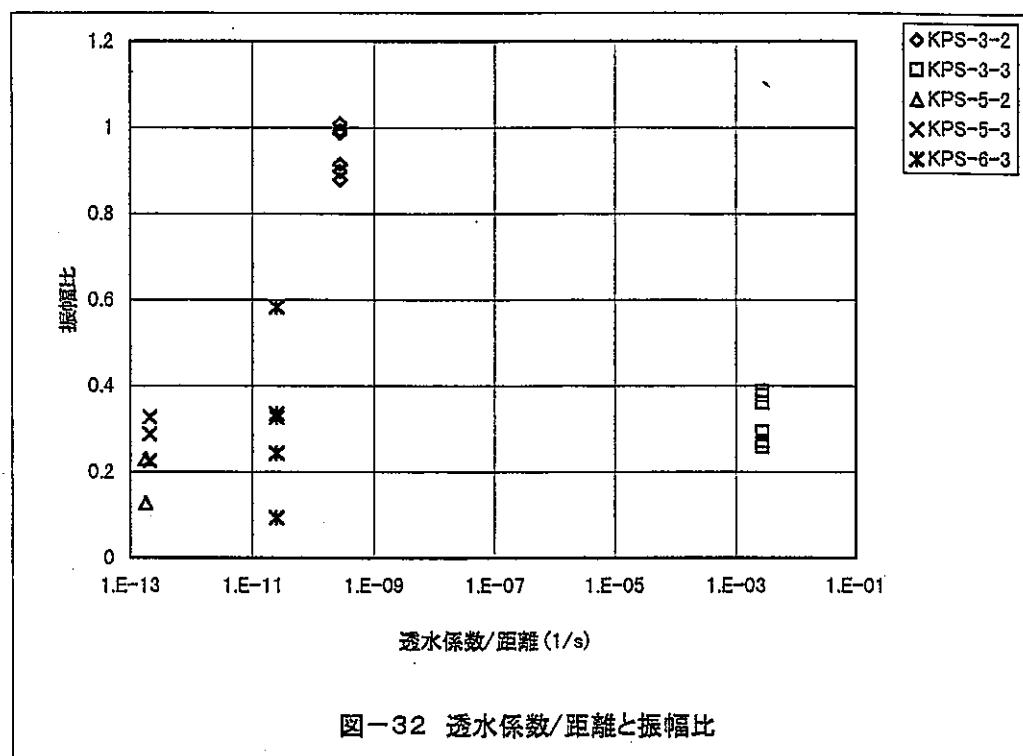


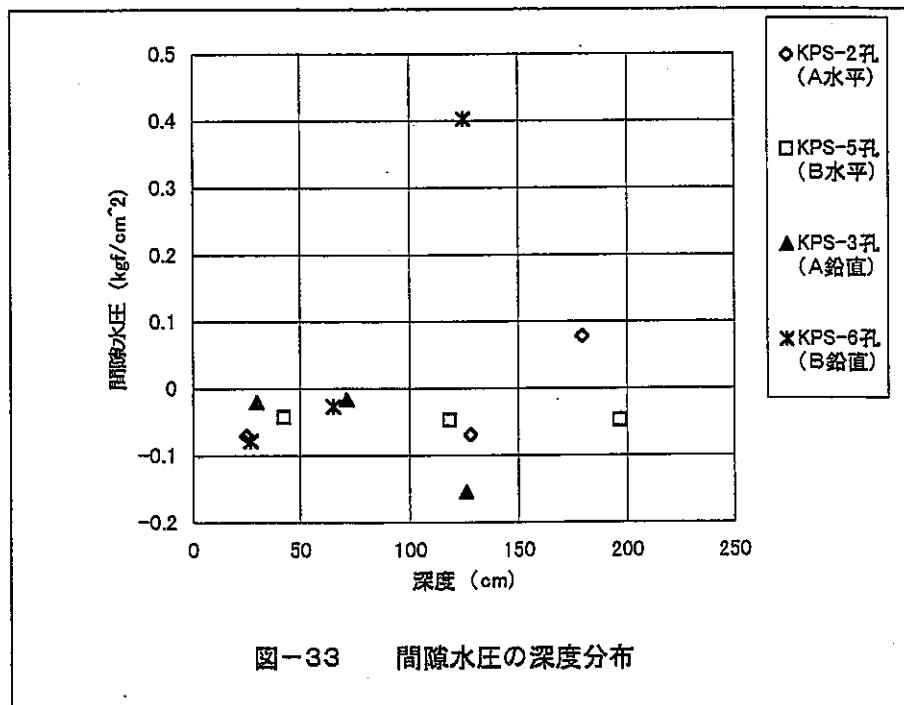
図-32 透水俓数/距離と振幅比

(2) 間隙水圧の深度分布 (図-33 参照)

① A断面の水平孔 (KPS-2) では、深度方向に間隙水圧が上昇する傾向がみられるが、鉛直下向き孔 (KPS-3) では、上から 2 測定区間が静水圧分布を示し、最も深度の深い測定区間の圧力が低くなっている。

② B断面では、水平孔 (KPS-5) の間隙水圧は深度方向に変化が認められないが、鉛直下向き孔 (KPS-6) の間隙水圧が深度方向に上昇する傾向が認められる。

A断面とB断面の距離は、約 8 m 程度であるが、間隙水圧の分布は異なった傾向を示している。



4. 2 透水係数の深度分布および透水係数と亀裂状態の相関

- ①今回の試験箇所では、鉛直下向き孔 (KPS-3、6) は、深度が浅くなると透水係数が大きくなる傾向が認められるが、水平孔 (KPS-2、5) は、全ての測定値が試験装置の測定下限値以下の非常に低い透水性を示しており、試錐孔の掘削方向により、透水係数の分布に変化がみられた（図-34参照）。
- ②鉛直下向き孔における坑道壁面付近の透水係数は、A断面（スムースプラスティング区間）に掘削されたKPS-3孔の方が、B断面（普通発破区間）に掘削されたKPS-6孔よりも大きい値が得られた（図-34参照）。
- ③KPS-3-3区間は亀裂の集中部分に当たり開口亀裂があるため、透水係数が $7.9 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ で非常に高い透水性を示した（表-8参照）。
- ④上記の試験区間を除き今回の試験箇所では、透水性と亀裂の有・無に相関関係は認められなかった（表-8参照）。

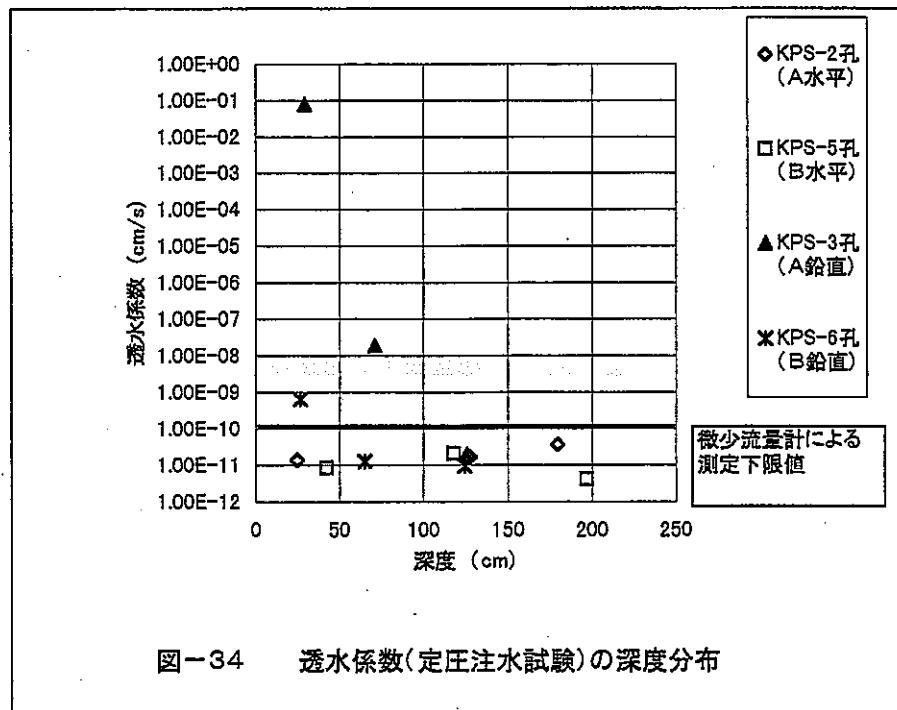


表-8 透水係数と亀裂状態

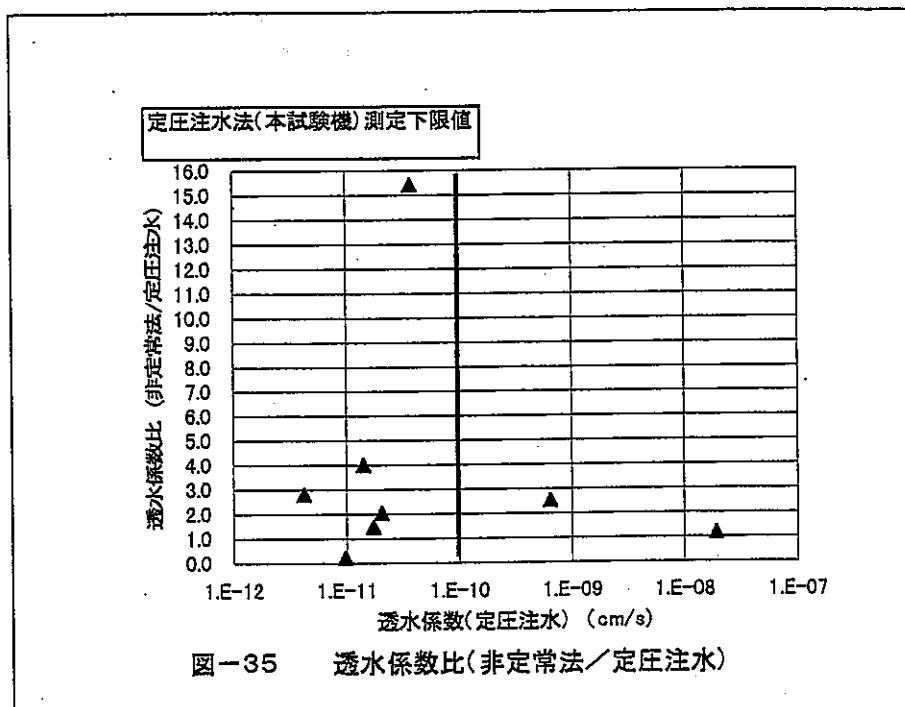
試錐孔No.	測定区間No.	区間深度 (cm)	亀裂の状況	透水係数 (cm/s)
KPS-2 (水平)	1	179.0	有り	(3.7E-11)
	2	127.5	有り	(1.7E-11)
	3	24.5	有り	(1.4E-11)
KPS-3 (鉛直)	1	125.5	有り	(2.0E-11)
	2	71.0	有り	1.9E-8
	3	29.0	有り(亀裂集中部)	(7.9E-2)
KPS-5 (水平)	1	196.5	有り	(4.2E-12)
	2	118.0	有り	(2.1E-11)
	3	42.0	有り	(8.7E-12)
KPS-2 (鉛直)	1	124.5	無	(9.6E-12)
	2	65.0	無	(1.3E-11)
	3	26.5	無	6.4E-10

(注) : ()内は参考値である

4. 3 透水試験

本調査では、12個の測定区間に対する定圧注水試験と、8個の測定区間に対する非定常透水試験を実施した。定圧注水試験から計算した透水係数に対する、非定常透水試験から計算した透水係数の比は、極端に大きいまたは小さいものを除くと概略1倍から4倍の値を示した（図-35参照）。

各透水試験方法についてデータの解釈および透水試験の装置と方法について若干の考察を行う。また、各透水試験の考察結果に基づき、緩み領域における透水試験の実施方法についても述べる。



4. 3. 1 定圧注水試験

(1) 解析方法

従来、定圧注水試験データの解析は、定常状態および疑似定常状態の圧力値、流量値をHvorslev の定常式に代入して行ってきた。

今回の調査では、微少流量計の追加により疑似定常状態と判断する前の過渡期のデータがより詳細に取得できたので、今回の取得データに対して非定常解析を実施した。

T. W. Doe、J. E. Geier¹⁾によるとパイプ状流れ場で定圧注水を行うと、流量Qと経過時間tの関係は、 $Q \propto 1/t^{0.5}$ となり、 $\log t - \log Q$ プロット上で減衰勾配が0.5の直線となる。放射状流れ、および球状流れの場合、 $\log t - \log Q$ プロット上で上述の0.5よりも勾配の小さな曲線となる。したがって、解析手法は次に示すとおりである。

- ①流量データと経過時間を $\log t - \log Q$ 曲線にプロットする。
- ②十分な注水時間の経過後、 $\log t - \log Q$ 曲線上で流量値の減衰勾配が、0.5よりも小さい直線部分が認められる場合、この直線部から後のデータに対して放射状流れ ($\log t - P/Q$ 曲線のプロット) 球状流れ ($Q - 1/t^{0.5}$ 曲線のプロット) の解析を行う。

測定データを $\log t - \log Q$ グラフにプロットした結果、KPS-2-1、-3-2、-6-3、区間の定圧注水試験データに0.5以下の勾配を示す直線部分が認められた。ただし、KPS-2-1区間の直線後のデータは、流量測定値のばらつきが大きいので解析から除外した。

KPS-3-2、-6-3区間の $\log t - \log Q$ 、 $\log t - P/Q$ 、 $Q - 1/t^{0.5}$ の各グラフを図-36～図-43に示す。また、表-8に解析結果を示す。KPS-3-2、-6-3区間以外の区間の $\log t - \log Q$ グラフを参考資料として巻末付録に示す。

表-9 定圧注水試験の解析結果の一覧

解析手法	KPS-3-2	KPS-6-3
放射状流れ 透水係数(cm/s)	3.2E-8	1.7E-9
放射状流れ 比貯留係数(1/cm)	8.2E-9	1.4E-10
球状流れ 透水係数(cm/s)	9.3E-9	4.6E-10
球状流れ 比貯留係数(1/cm)	3.1E-4	7.6E-6
Hvorslev の定常式	1.9E-8	6.4E-10

今回の非定常解析の結果では、次ぎに示す特徴が認められた。

- ①KPS-3-2区間KPS-6-3区間共にほぼ同じ経過時間上で $\log t - P/Q$ プロット、 $Q - 1/t^{0.5}$ プロット上の直線が認められたため、流れ形状の区別はできなかった。
- ②測定終了までのデータに対して、非定常解析が可能であったことから、今回の測定データは厳密には疑似定常状態に至っていないし、境界条件の影響も受けていないと考えられる。
- ③解析手法により計算される透水係数値に一定の傾向がみられ、球状流れの透水係数を1とすると、Hvorslev式で1.4～2倍、放射状流れの解析で3.4～3.7倍の値となった。
- ④今回の測定データでは、各プロット上の直線解析から乖離する傾向を得られなかつたが、このような検討によって、測定データのより詳細な情報を得ることができ、定圧注水の終了判定などの根拠をより明確化できる可能性があると考えられる。

(2) 試験装置

今回の調査では、事業団所有の水理学的緩み領域透水計測装置に、大成基礎設計(株) 所有の容量1～0.05cm³/hの微少流量計を付加して計測を実施した。この結果、 1×10^{-10} cm/sのオーダーの透水係数の測定が可能であることが確認できた。ただし、この微少流量計の測定下限値付近では、測定値のばらつきが0.01～0.02cm³/h程度出ていることも明らかになった。しかし、3.3.2項にも述べたように、流量が零の時の微少流量計の出力のばらつきは、高々0.004cm³/h程度なので、計測装置の圧力源や、配管系統の改善により、測定下限値付近のデータの精度を上げる可能性があるものと考える。

上記の微少流量計に限らず、データの質を改善し、計測装置の耐久性を向上させるための改良点を以下に列記しておく。

- ①計測装置の圧力源として、電動コンプレッサーの圧縮空気を供給しているが、湿度の高い坑道内で使用しているために、吐出される圧縮空気に多量の水分が含まれ、調圧器の調圧能力、耐久性に影響があることが今回の試験中確認された。したがって、コンプレッサーからの吐出空気の水落とし装置を付加する必要があると考える。
- ②現在の計測装置は、コンプレッサーからの圧縮空気を2段の調圧器を通して、使用しているが、今回、これを3段にすることにより、流量測定データのばらつきを小さくすることができることを確認した。

③今回②の処置を実施した後も上述の0.01～0.02cm³/h程度のデータのばらつきがさけられなかつた。この原因として、現在の計測装置の主たる配管材料であるナイロンチューブが圧力の微少な変動に対応してチューブ内の水の貯留量を変化させている影響が考えられる。したがつて、主として多点式パッカーから計測装置までの配管材料の剛性を高くすることにより、データのばらつきを小さくできる可能性があると考える。

④また、配管系統内の圧力変化に対する貯留率が小さくなれば、間隙水圧測定時の圧力の安定に必要な時間も若干短縮される可能性がある。また、間隙水圧計を受圧面背面に大気圧の変動を受けない構造のものすると、間隙水圧データの整理作業が短縮化される。ただし、配管材料の剛性を大きく変えたり、間隙水圧計の構造を変えた場合、現在の配管材料との比較により、これらの変更が圧力測定値に与える影響を事前に室内実験で確認しておくことが望ましい。

4. 3. 2 非定常透水試験

(1) 解析方法

今回実施した非定常透水試験結果は、次に示すように要約できる。

- ①定圧注水試験の後に実施した試験において圧力消散を初期加圧の90%まで測定したデータは、 $t - \log H/H_0$ グラフで上に凸な曲線となり、一般的に測定区間の圧力が間隙水圧よりも高すぎる状態で実施した試験の特徴を示している。これらのデータは、従来の透水係数の計算式に本来は当てはめにくいデータである。したがって、便宜的にHvorslev式による透水係数の計算を行ったが、計算値の妥当性を検討する根拠が希薄になっている。
- ②定圧注水後の圧力減衰のない比較データを取得するために、定圧注水を実施せず加圧注水を行う非定常透水試験を実施した。この結果の $t - \log H/H_0$ グラフ上の勾配 $\log(H_1/H_2)/(t_2 - t_1)$ は、定圧注水試験後に実施した非定常透水試験結果に比べ2オーダー程度小さくなつた。このため、定圧注水を実施しない状態での非定常透水試験結果は、ばらつきが大きくなる可能性がある。
- ③定圧注水試験結果との比較から、定圧注水を実施した状態での非定常透水試験結果は、透水係数を概略オーダー評価するための指標としては使用できると考える。

(2) 測定方法および測定器

非定常透水試験結果の信頼性を向上させるためには、非定常透水試験を行う測定区間周辺の圧力を定圧注水を同時にやっている場合と同様に維持するか、定圧注水を終了したことによる測定区間周辺の圧力低下を考慮したデータ解析が必要となる。また、定圧注水を事前に実施しない場合は、その測定結果のばらつきを小さくする必要がある。非定常透水試験を行う場として、事前に定圧注水を行うか否かの違いにより、測定器内部の条件の違いと岩盤の条件の違いが生じると考えられる。これらを要約すると次のとおりである。

- ①測定区間周辺の圧力を定圧注水を同時にやっている状態に維持するためには、非定常試験用の注水と同時に測定区間に定圧注水を実施するか、周辺の他の測定区間から定圧注水を同時にやい、圧力を維持することが考えられる。しかし、試験を実施している測定区間に定圧注水を同時にやうことは、測定器の配管内の貯留量が複雑に変化することや、配管系が複雑になることから困難と考える。また、他の測定区間からの注水により周辺岩盤の圧力を一定にすることも、岩盤の透水性の低さから考えて非常に長い予備注水時間を必要とし、現実的には困難であ

る。

②したがって、次善の方法として定圧注水を事前に行った状態での透水試験結果を解析する手法を調査することが考えられる。

③事前に定圧注水を行わないで、非定常透水試験を行う場合、計測装置の主たる配管材料であるナイロンチューブの圧力の無負荷状態からの膨張率を過小評価していることが考えられるが、表-6に示す貯留量変化率の室内試験結果からは、非定常透水試験の圧力減衰速度が2オーダー遅くなるほどの過小評価の可能性は低いと考える。

④測定区間の数に比べ測定器の数が少ないため、一連の測定作業の中で配管の切換を行わざるを得ない。配管切換を極力水中で行うなど配管内に空気が混入しないように注意して作業を実施したが、配管内に残った空気の圧縮性が、事前に定圧注水を行わない非定常透水試験データに悪影響を及ぼしている可能性は残る。ただし、配管系の改良により空気の混入を少なくすることはできるが、圧力が0 kgf/cm²付近で配管内に残留している気泡を完全に除去することは困難である。

⑤坑道壁面付近の岩盤に掘削した試錐孔を利用して、透水試験を実施するために、試錐孔の掘削作業や多点式パッカーの設置作業時に測定区間に気泡が混入し、この気泡がパッカー設置時の注水により完全には除去されていないことも考えられる。この場合、データのばらつきを小さくするためには、非定常透水試験の前に定圧注水を行うことにより、測定区間周辺の圧力を上昇させ、気泡を圧縮しておくことが望ましい。

4. 3. 3 まとめ

上述の考察から、坑道壁面近傍における水理学的ゆるみ領域計測装置を使用した透水試験の方法について以下に要約する。

- ①現在の水理学的ゆるみ領域計測装置を用いて透水試験を実施する場合、微少流量計（容量 $1 \sim 0.05 \text{cm}^3/\text{h}$ ）の増設と配管材料の剛性を上げると同時に圧力源の安定化対策を行い、定圧注水試験を基本手法として試験を実施する。
- ②定圧注水試験で取得したデータに対しては、非定常解析などの解析を行い、今後の試験方法および解析の根拠を検討するための知見を蓄積する。
- ③定圧注水試験において注水流量が、流量計の測定下限値以下の流量となる場合は、定圧注水試験後に非定常透水試験を実施し、透水係数の参考値を取得する。
- ④本計測装置を用いた透水試験結果の代表性は測定区間周辺に限定される。坑道壁面との水理的な連結性を求めたり、透水性の分布領域を把握するためには、坑道内の気圧変化に対する間隙水圧の応答を利用したり、孔間透水試験を実施する必要がある。このためには、①に述べた機器の改良だけでなく、間隙水圧計の高精度な機種への交換が必要であり、信号源となる水圧または流量波形の種類により送水機構の新規開発が必要と考える。

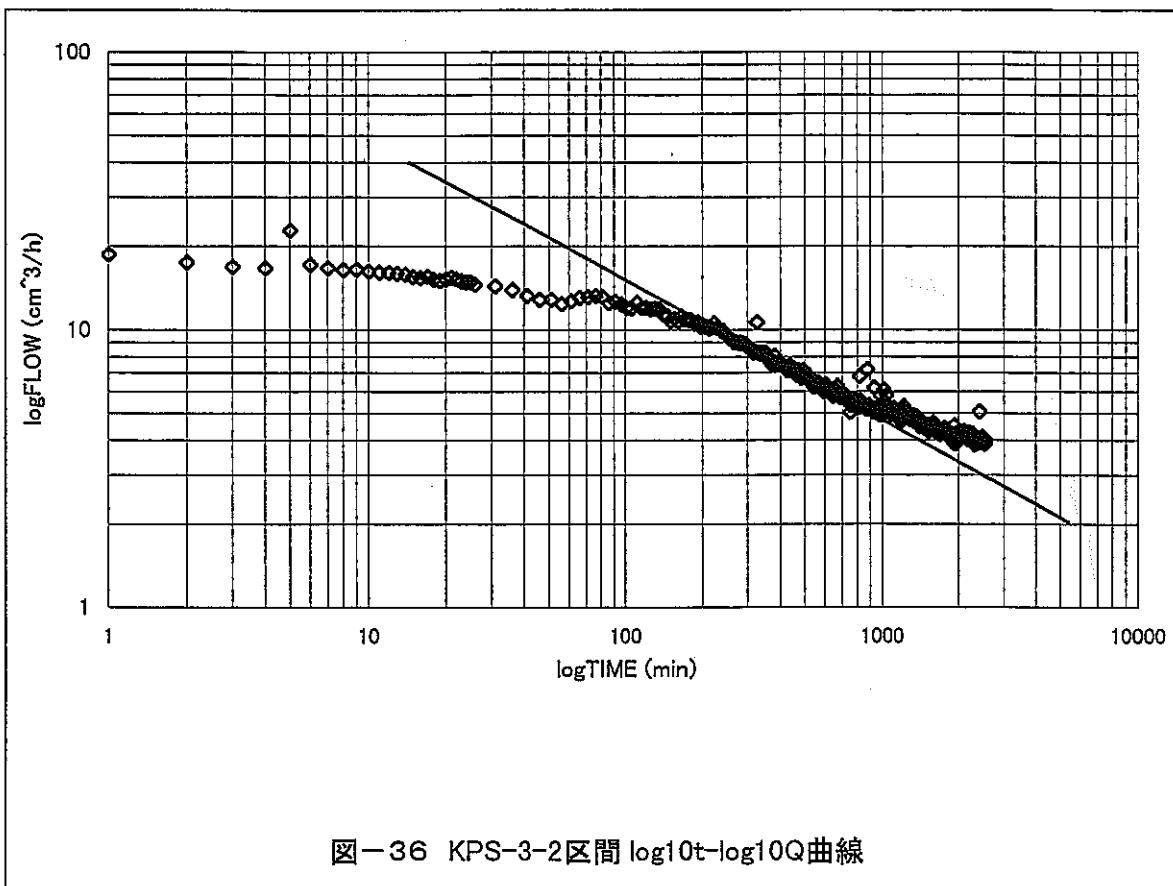


図-36 KPS-3-2区間 $\log_{10}t-\log_{10}Q$ 曲線

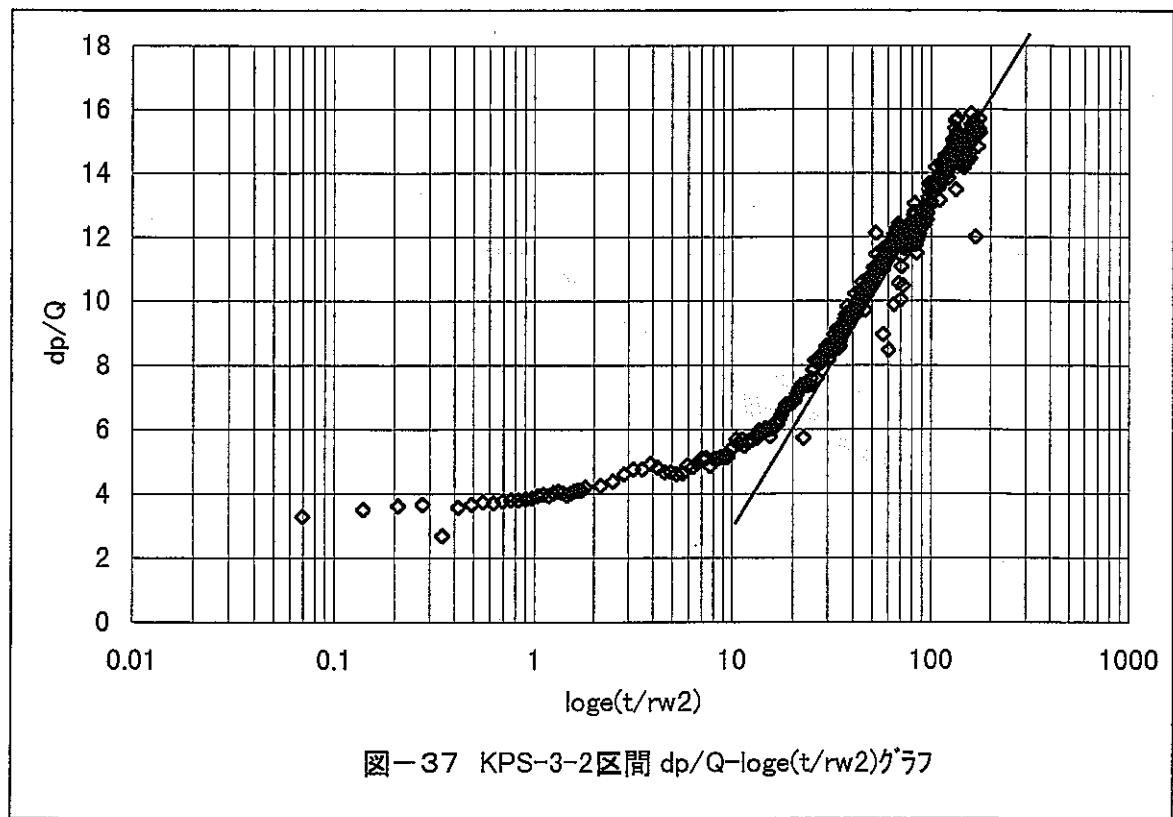


図-37 KPS-3-2区間 $dp/Q-\log(t/rw2)$ グラフ

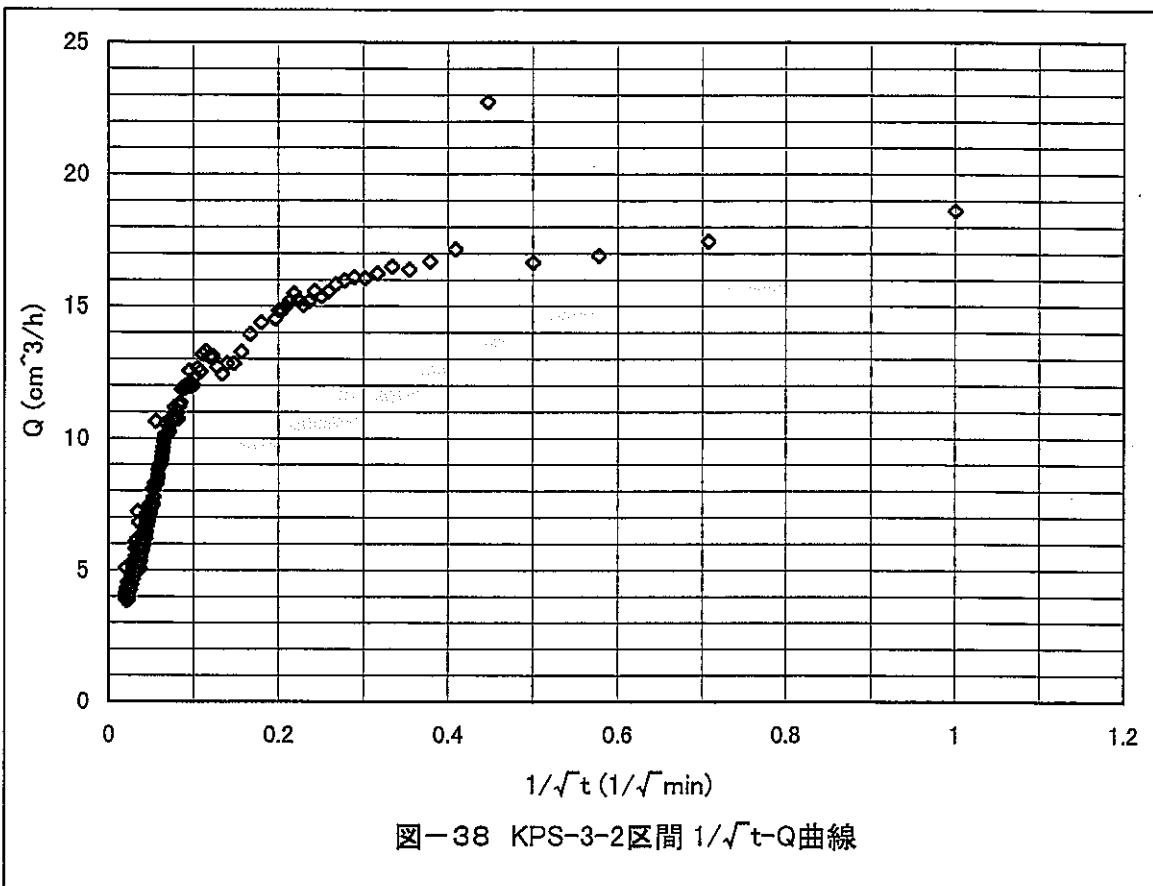


図-38 KPS-3-2区間 $1/\sqrt{t}$ - Q 曲線

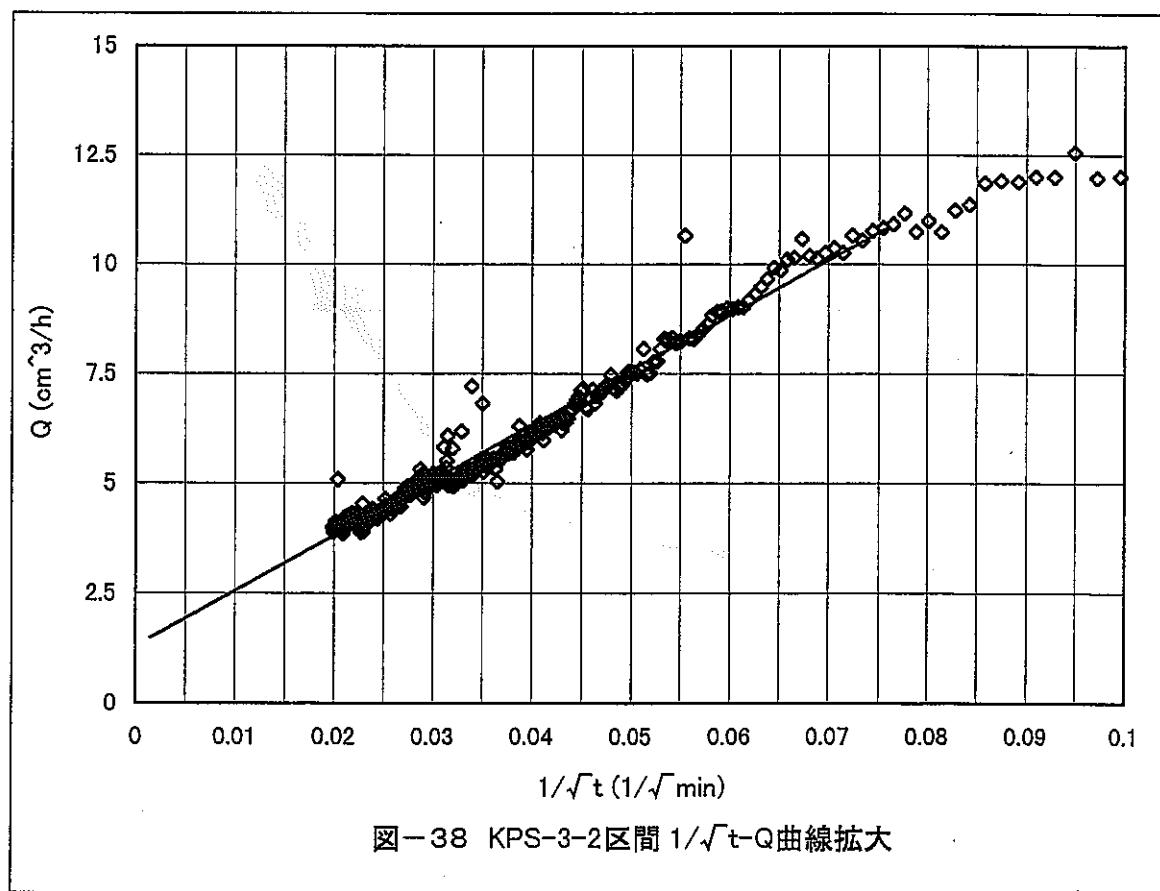


図-38 KPS-3-2区間 $1/\sqrt{t}$ - Q 曲線拡大

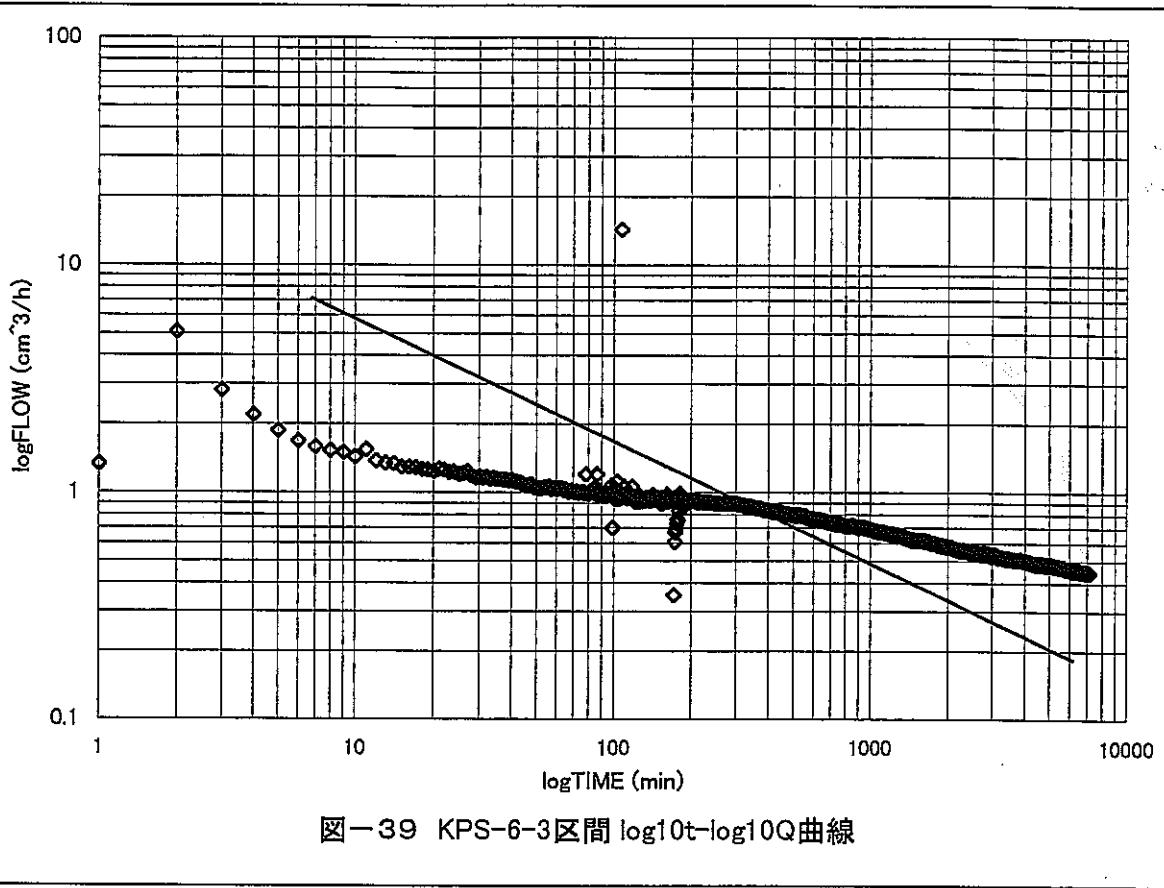


図-39 KPS-6-3区間 $\log_{10}t-\log_{10}Q$ 曲線

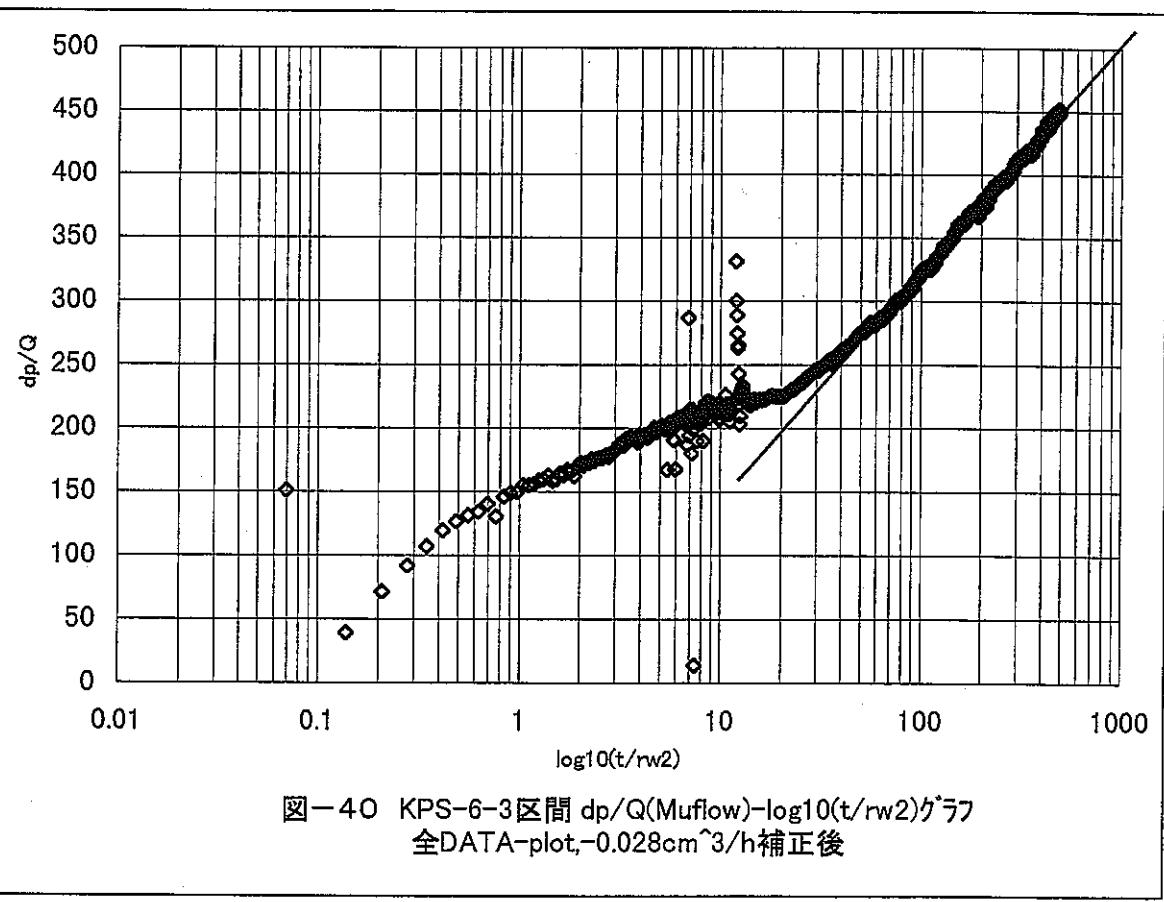


図-40 KPS-6-3区間 $dp/Q(\text{Muflow})-\log_{10}(t/rw2)$ グラフ
全DATA-plot,-0.028 cm^3/h 補正後

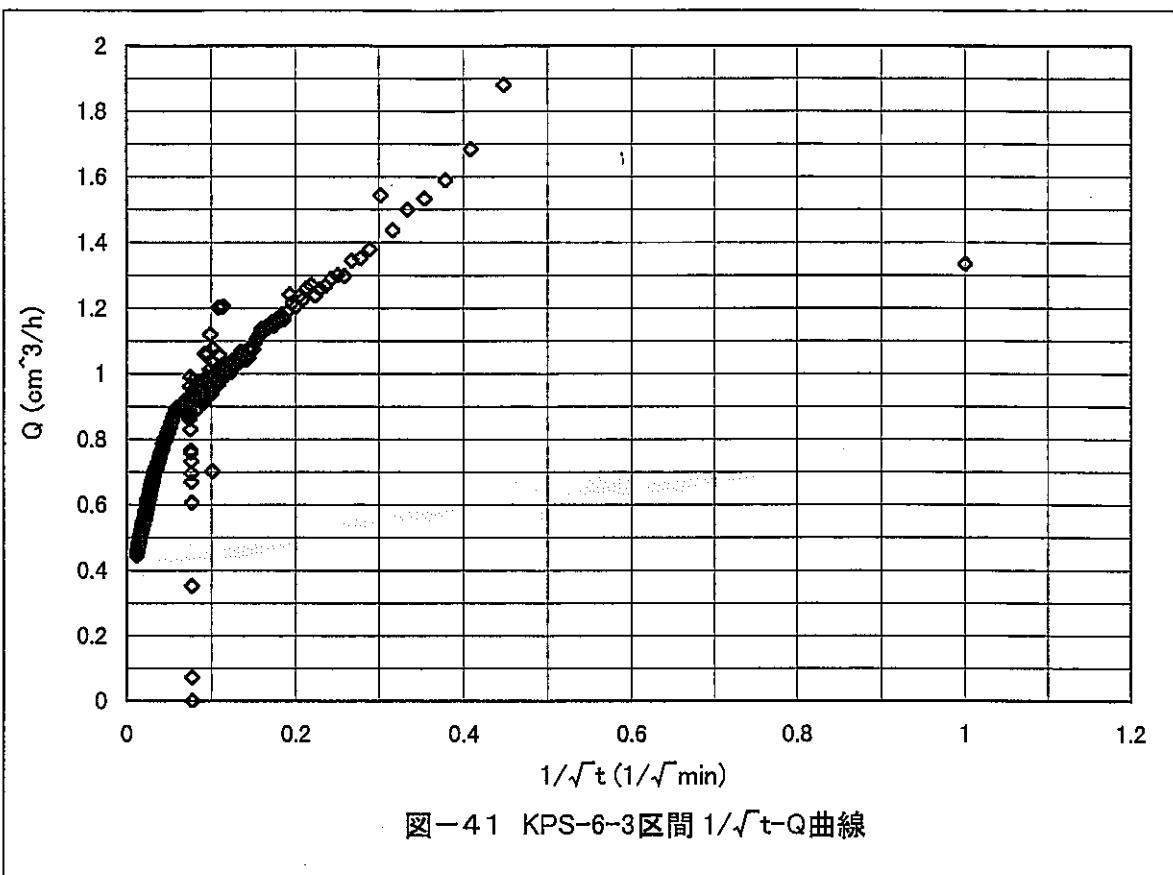


図-41 KPS-6-3区間 $1/\sqrt{t}$ - Q 曲線

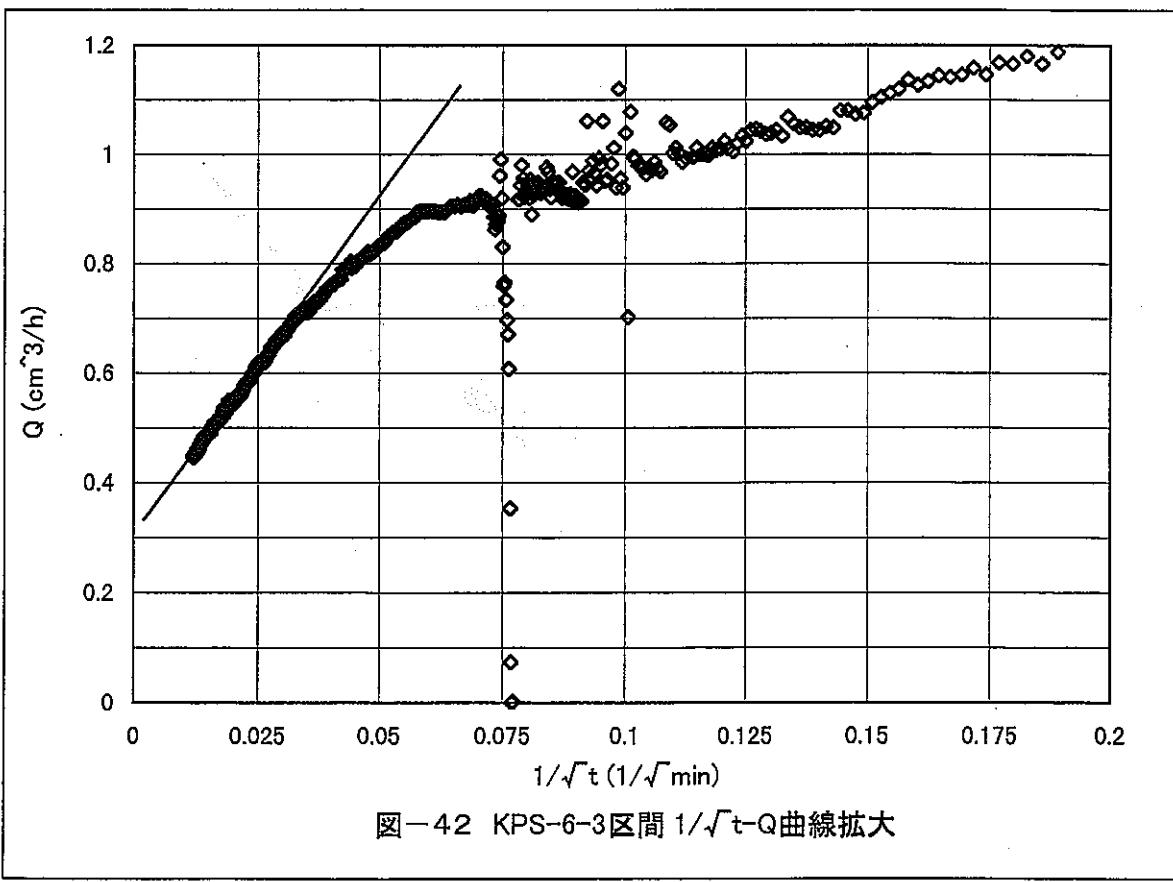


図-42 KPS-6-3区間 $1/\sqrt{t}$ - Q 曲線拡大

5. あとがき

釜石鉱山 250m レベル坑道において、掘削影響試験の一環として試験坑道周辺の水理学的特性を調査し、水理学的影響領域を定量的に把握することを目的として、水理学的緩み領域計測装置を用いて透水試験を実施した。

A断面とB断面では、間隙水圧の分布は異なった傾向を明らかに示した。

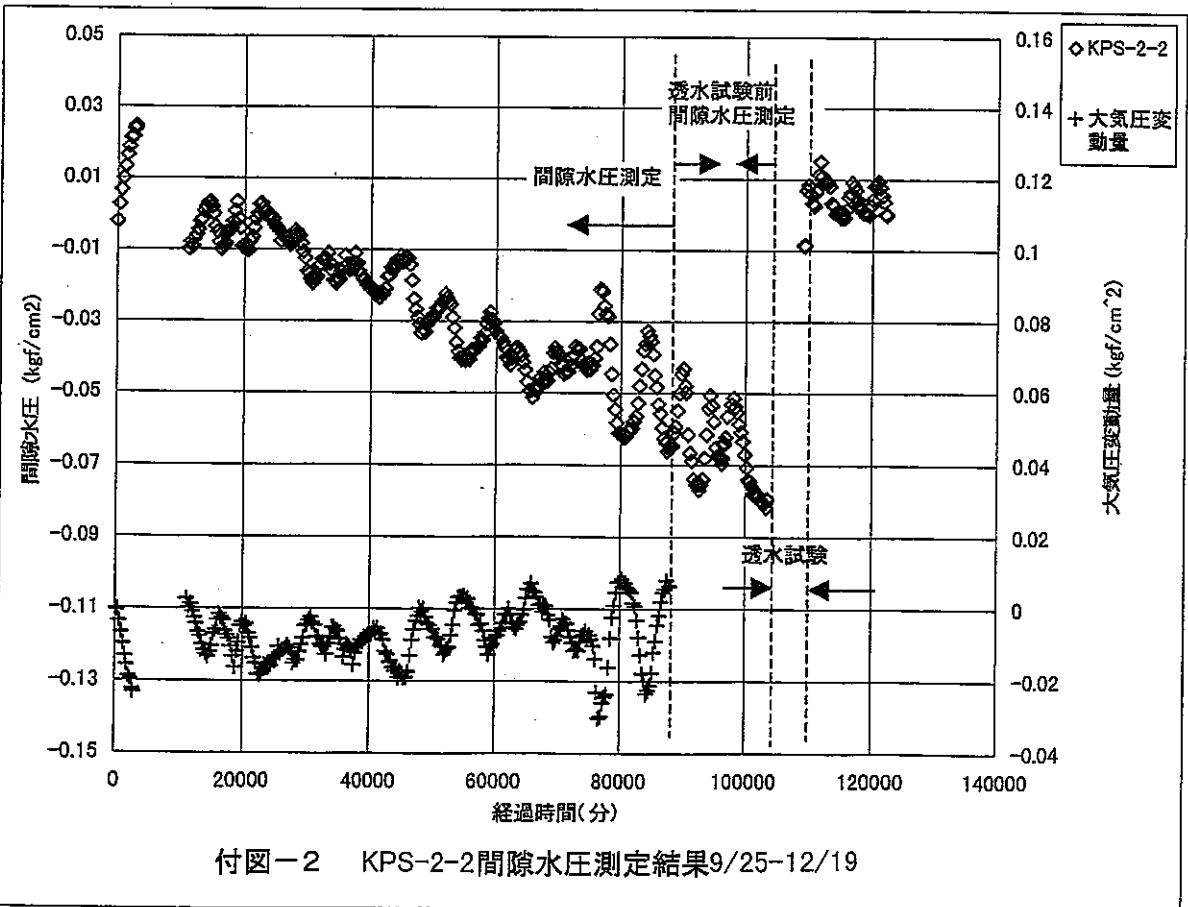
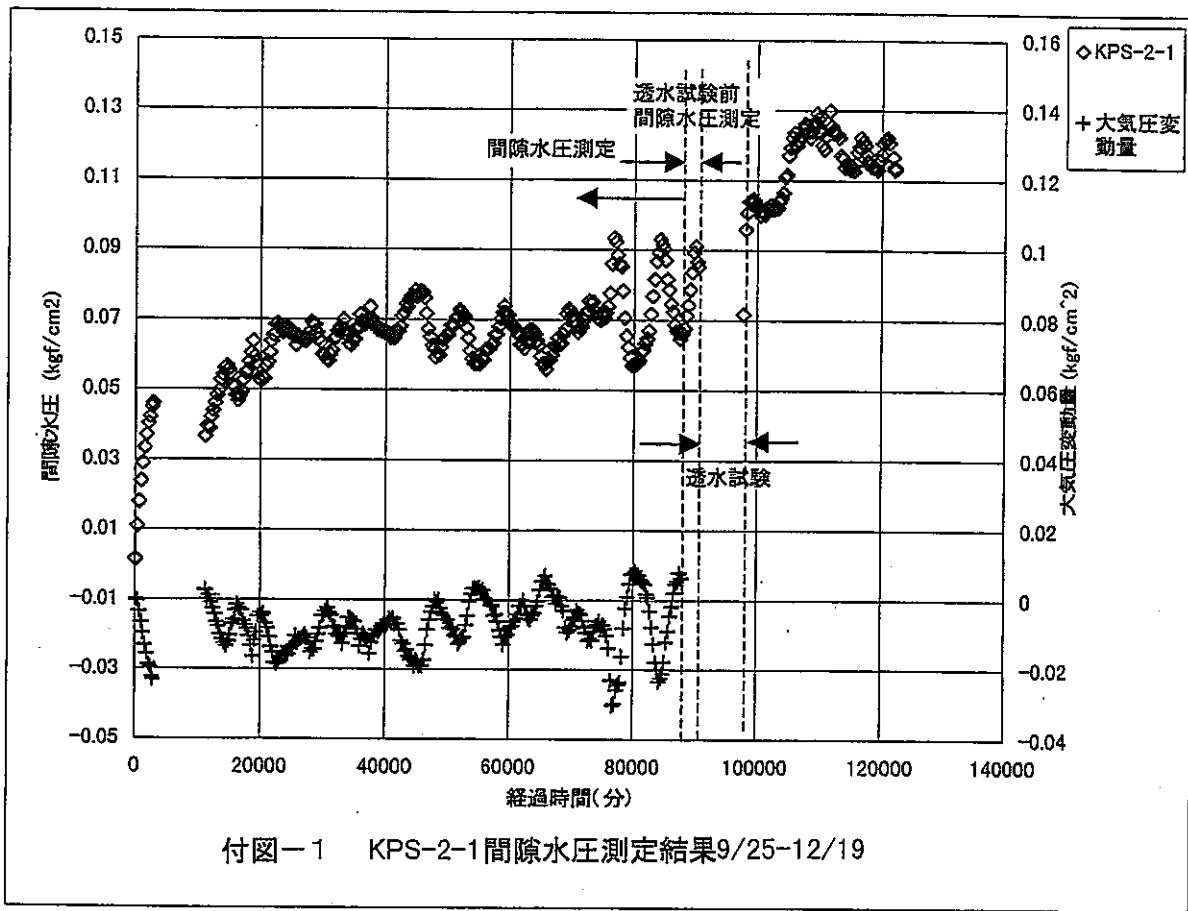
今回の試験箇所では、試錐孔の掘削方向により、透水係数の分布に変化がみられた。

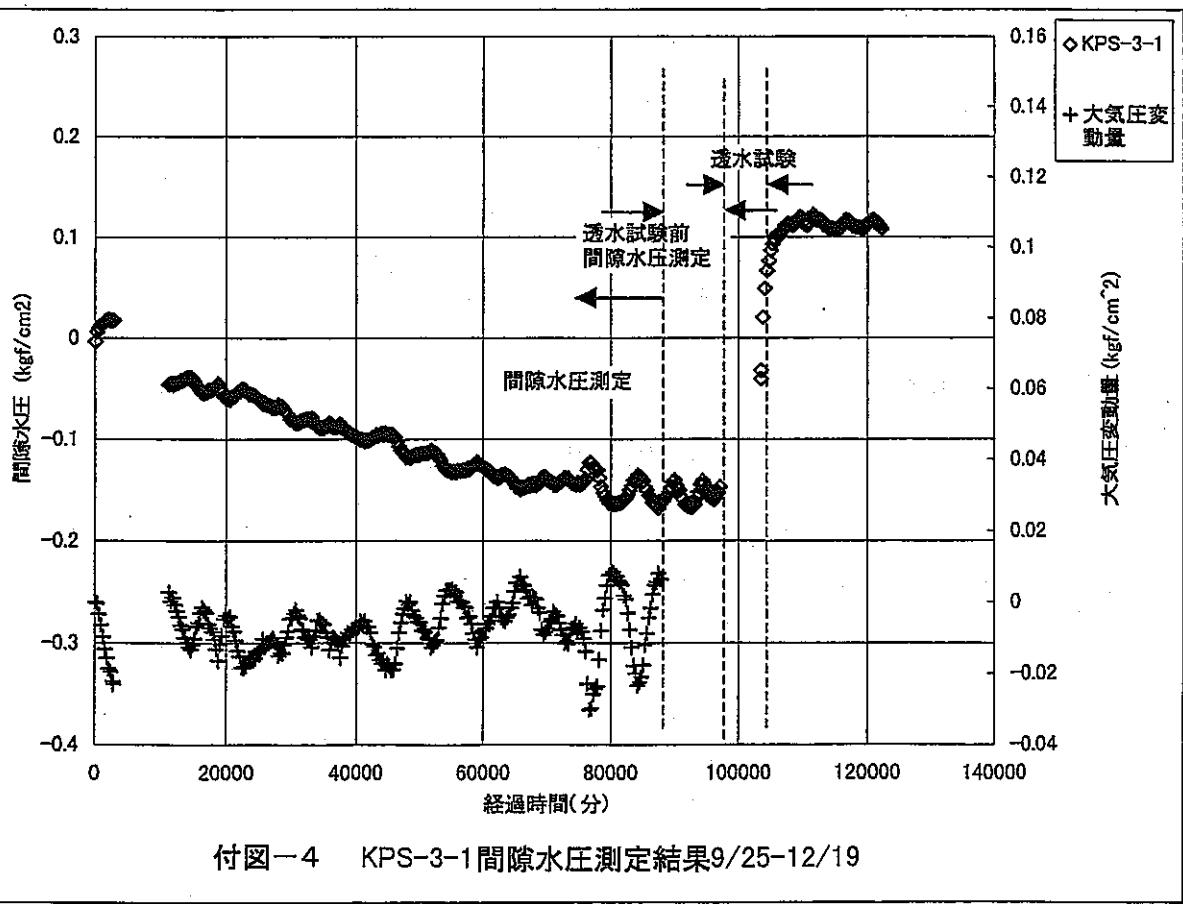
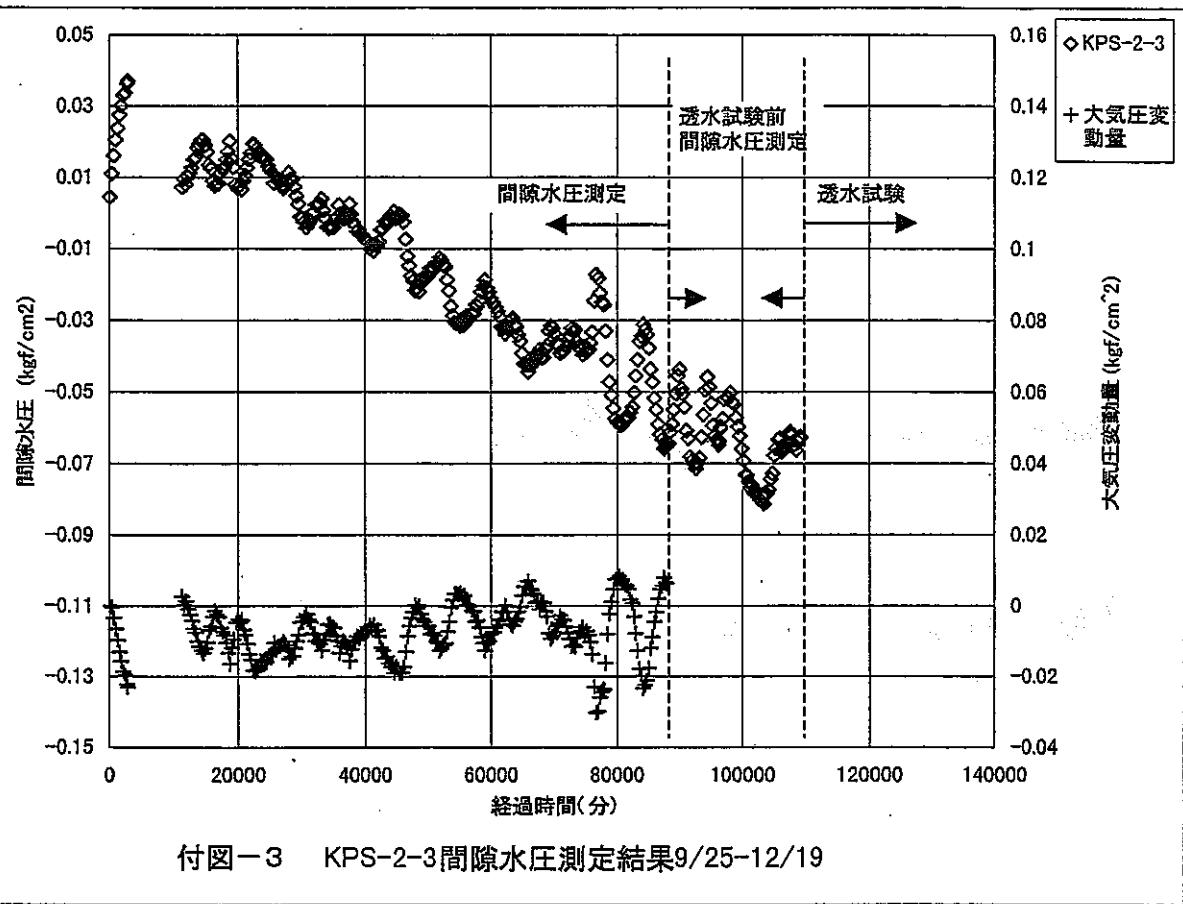
巻末付録

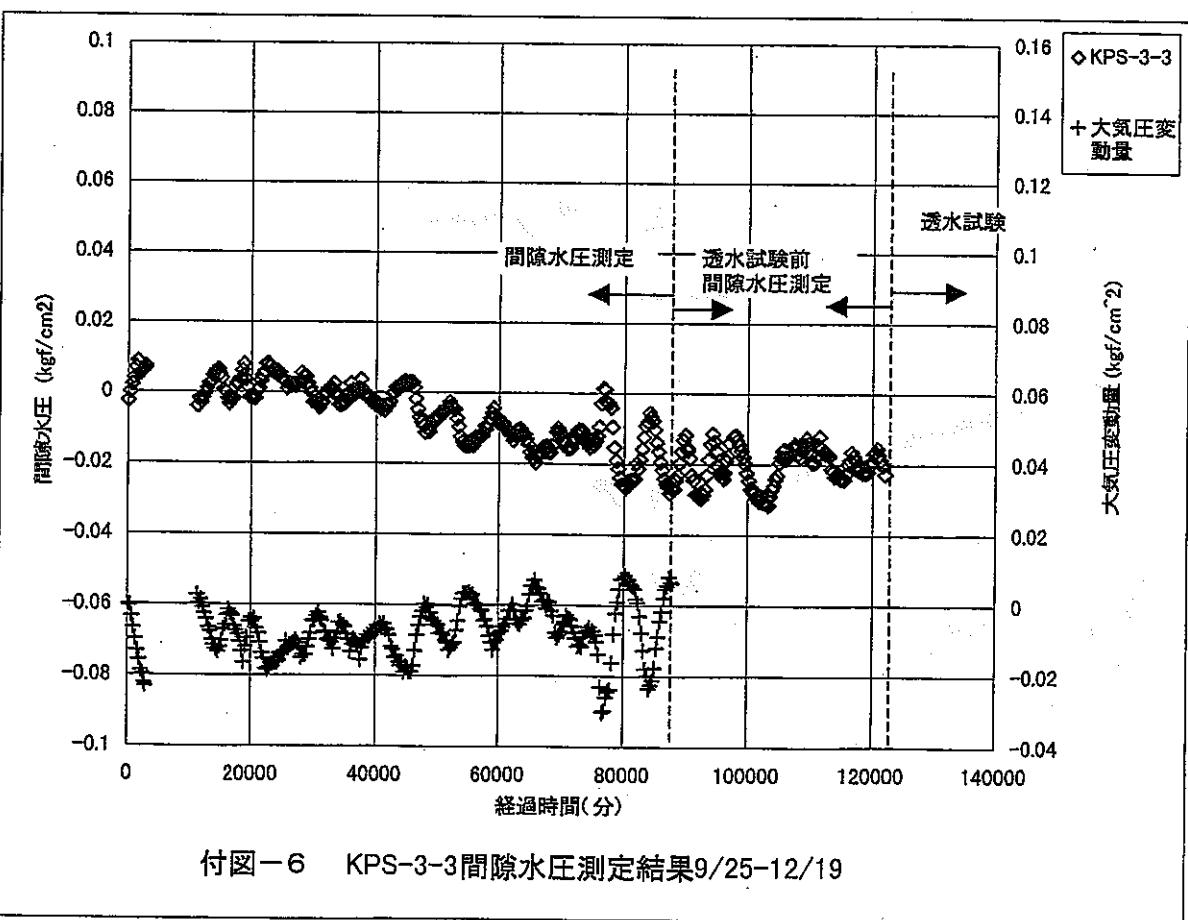
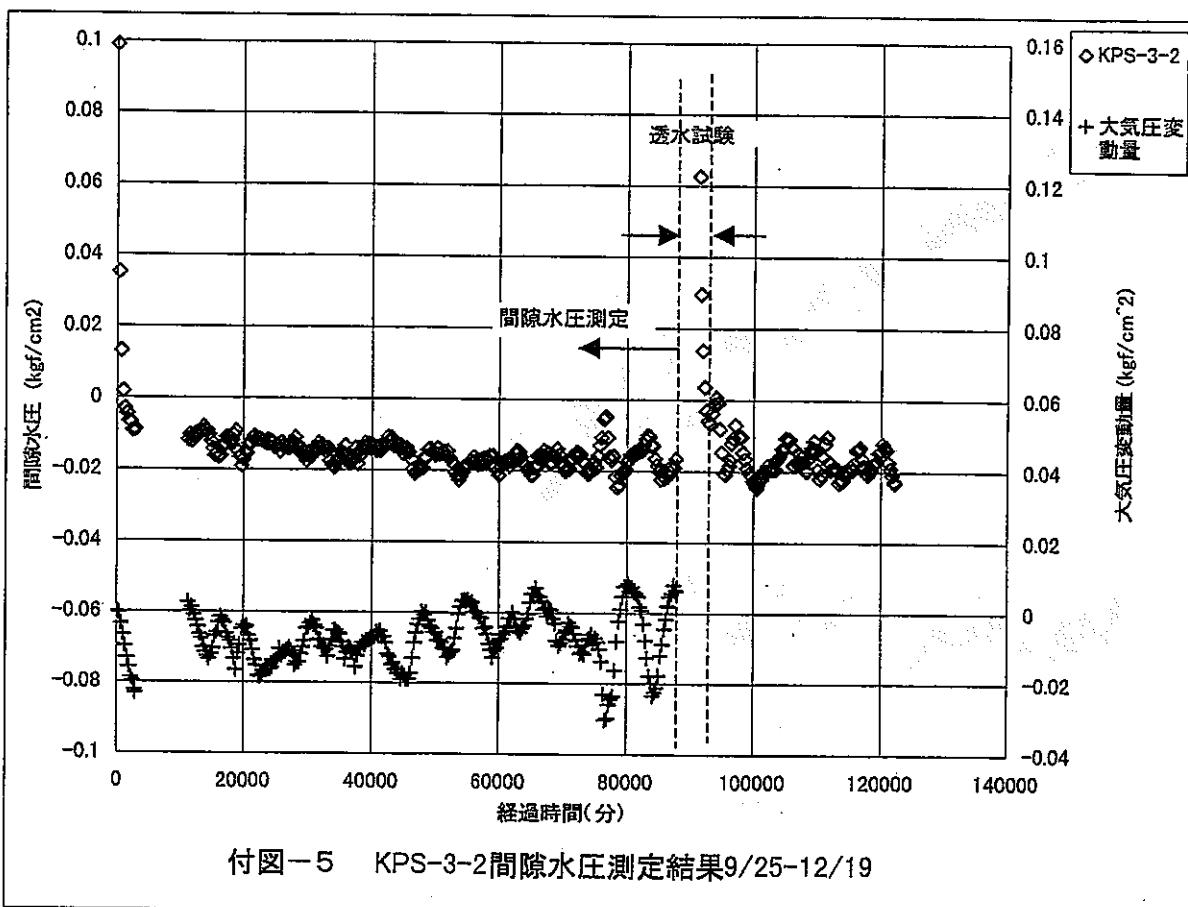
- (1) 間隙水圧測定結果
- (2) 定圧注水試験非定常解析図
- (3) 写 真 集

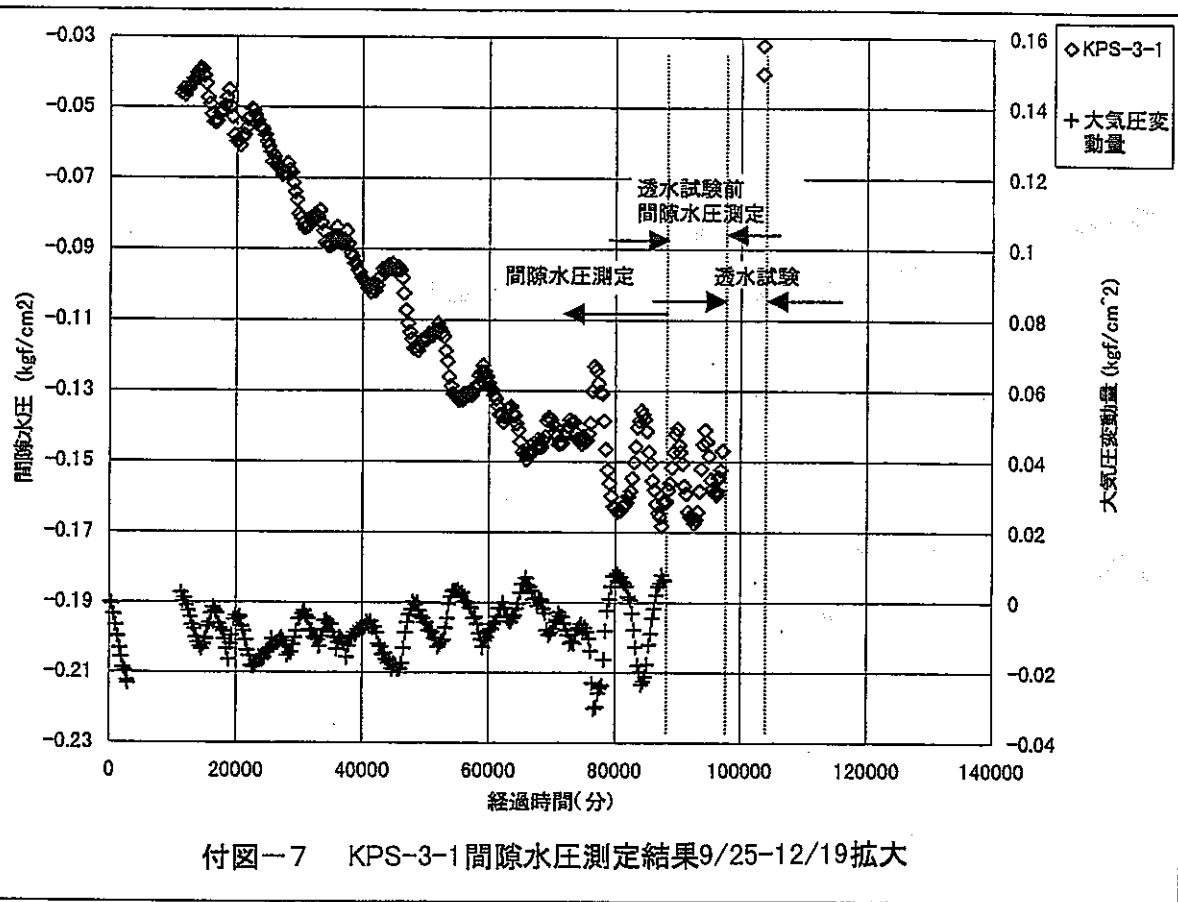
(1) 間隙水圧測定結果

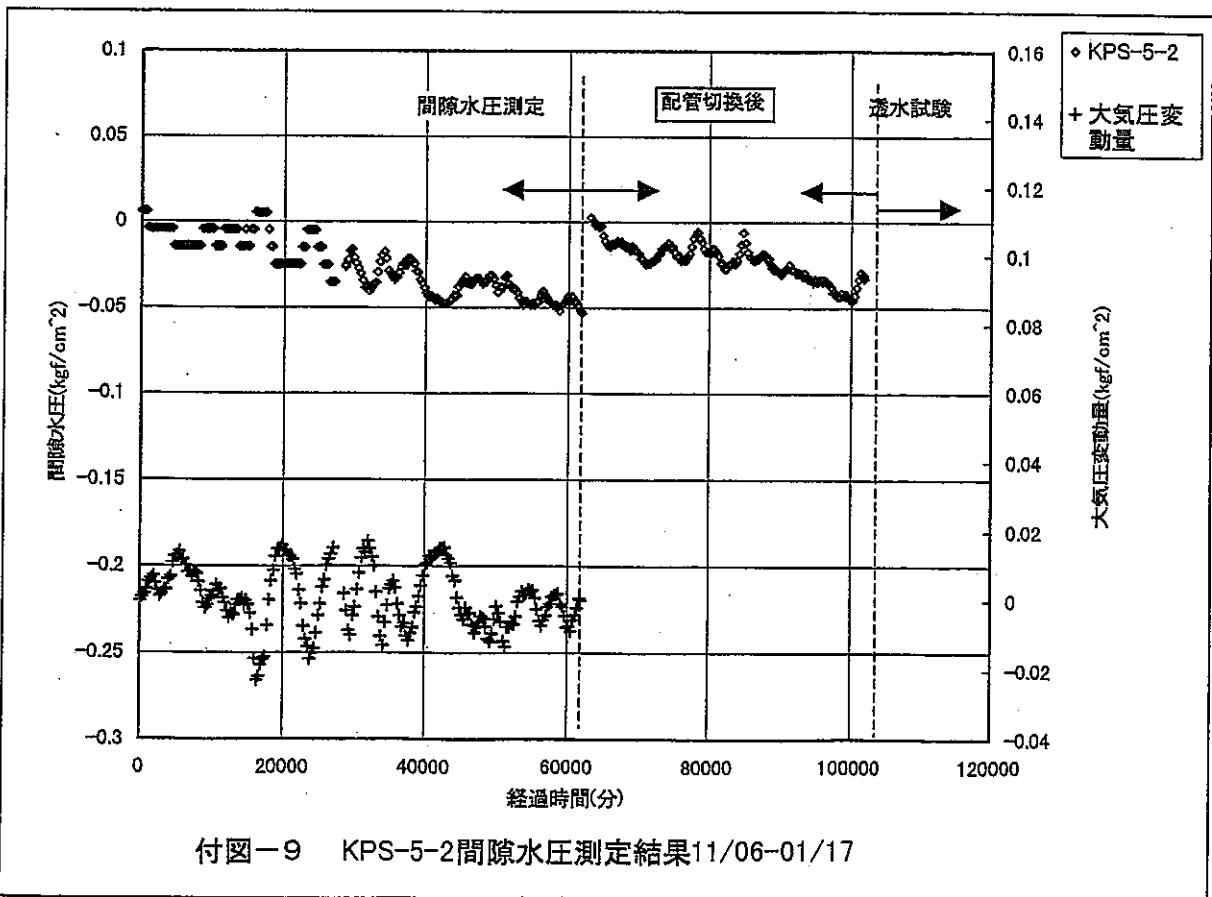
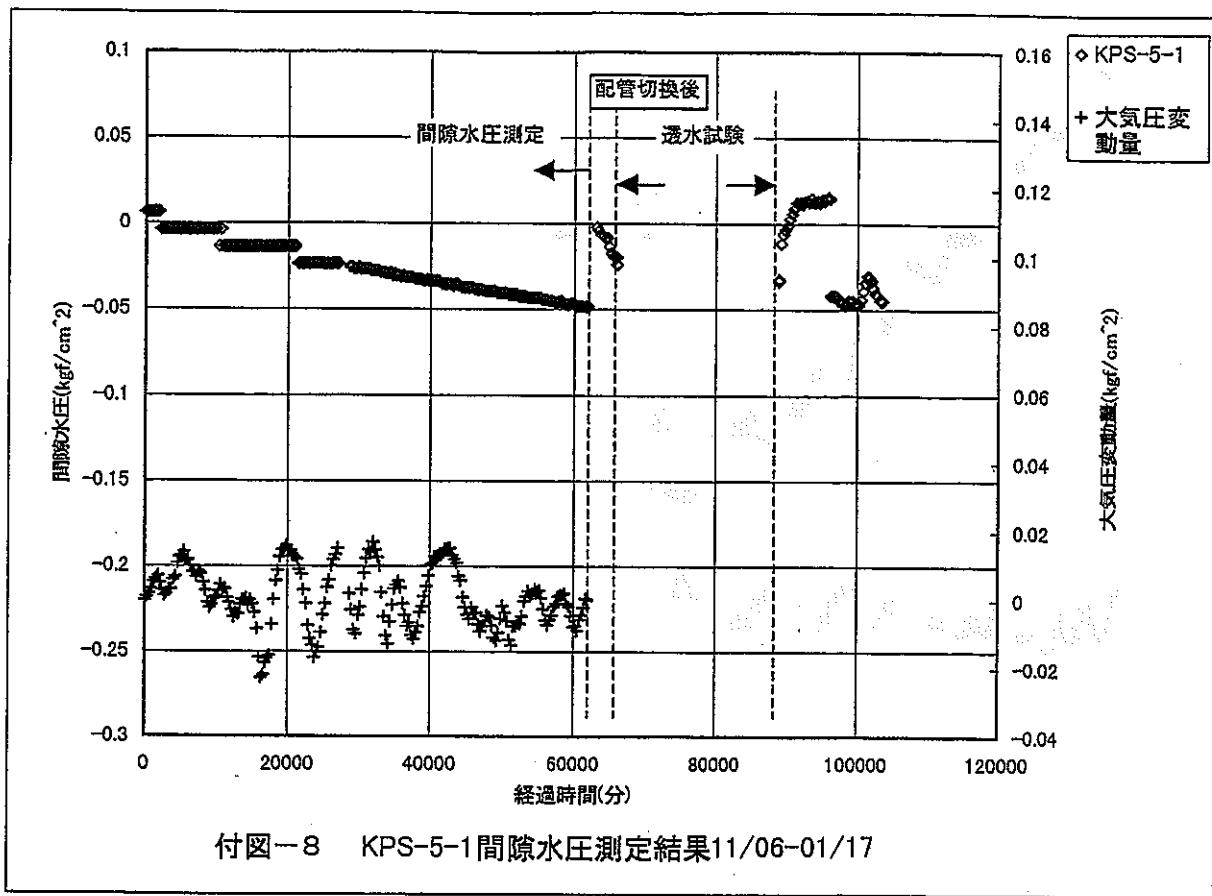
・付図-1	KPS-2-1間隙水圧測定結果9/25-12/19	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
・付図-2	KPS-2-2間隙水圧測定結果9/25-12/19	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	53
・付図-3	KPS-2-3間隙水圧測定結果9/25-12/19	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
・付図-4	KPS-3-1間隙水圧測定結果9/25-12/19	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
・付図-5	KPS-3-2間隙水圧測定結果9/25-12/19	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	55
・付図-6	KPS-3-3間隙水圧測定結果9/25-12/19	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	55
・付図-7	KPS-3-1間隙水圧測定結果9/25-12/19拡大	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	56
・付図-8	KPS-5-1間隙水圧測定結果11/06-01/17	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57
・付図-9	KPS-5-2間隙水圧測定結果11/06-01/17	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57
・付図-10	KPS-5-3間隙水圧測定結果11/06-01/17	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	58
・付図-11	KPS-6-1間隙水圧測定結果11/06-01/17	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	58
・付図-12	KPS-6-2間隙水圧測定結果11/06-01/17	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
・付図-13	KPS-6-3間隙水圧測定結果11/06-01/17零点補正後	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59

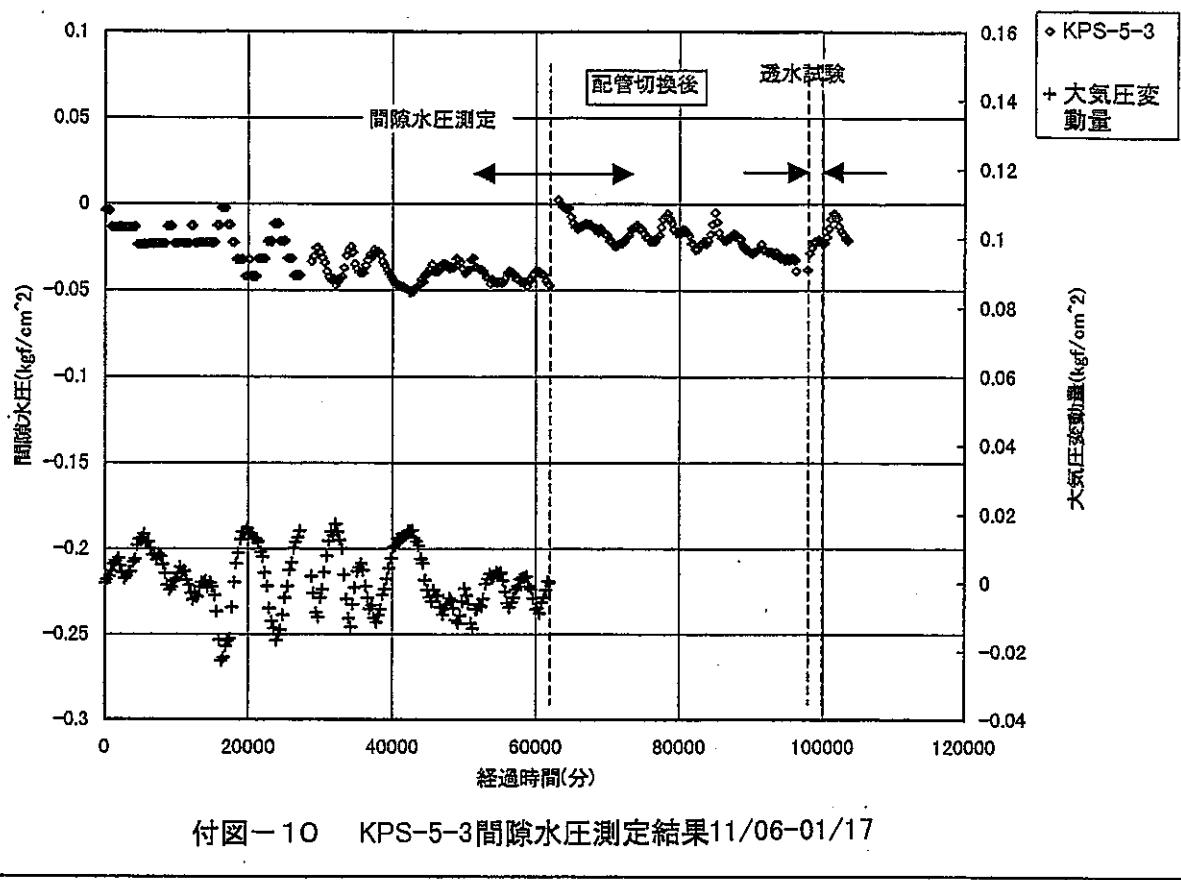




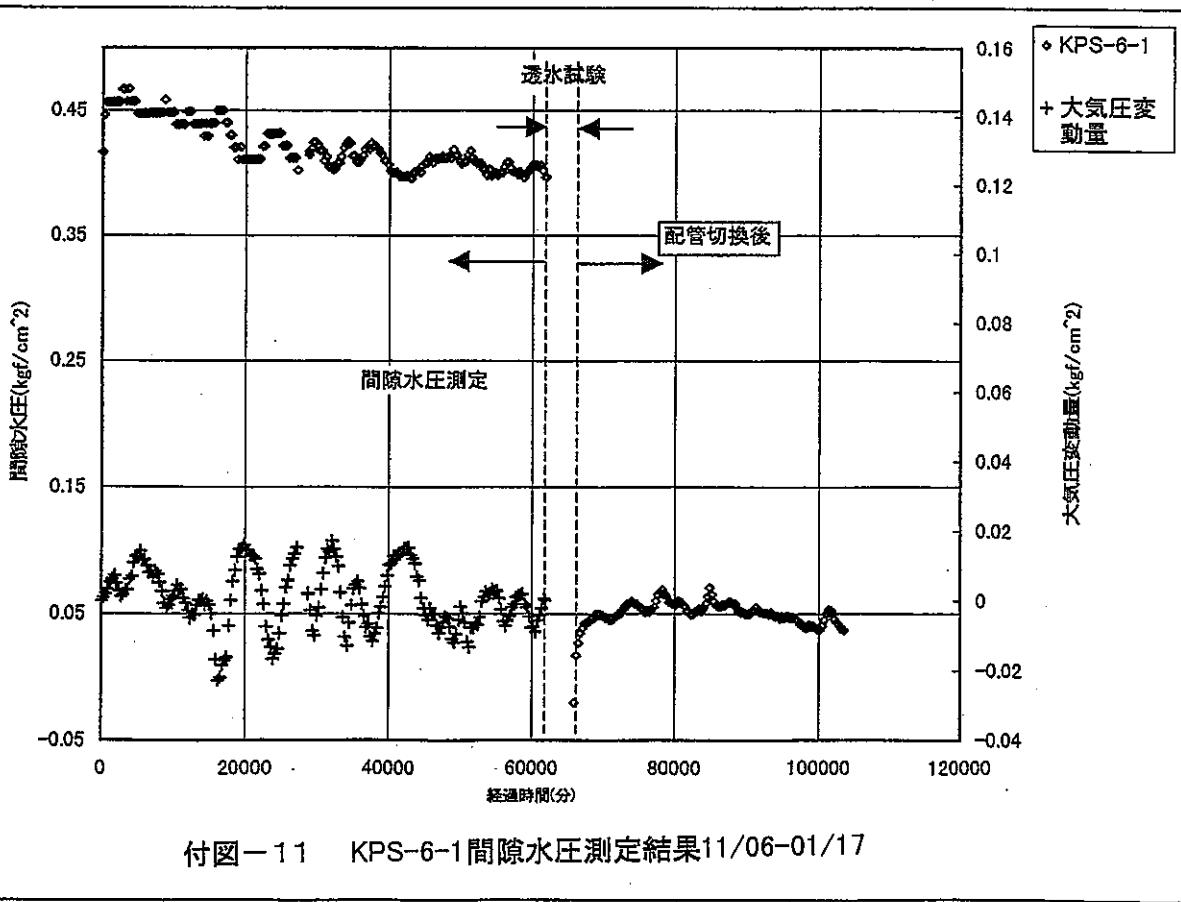




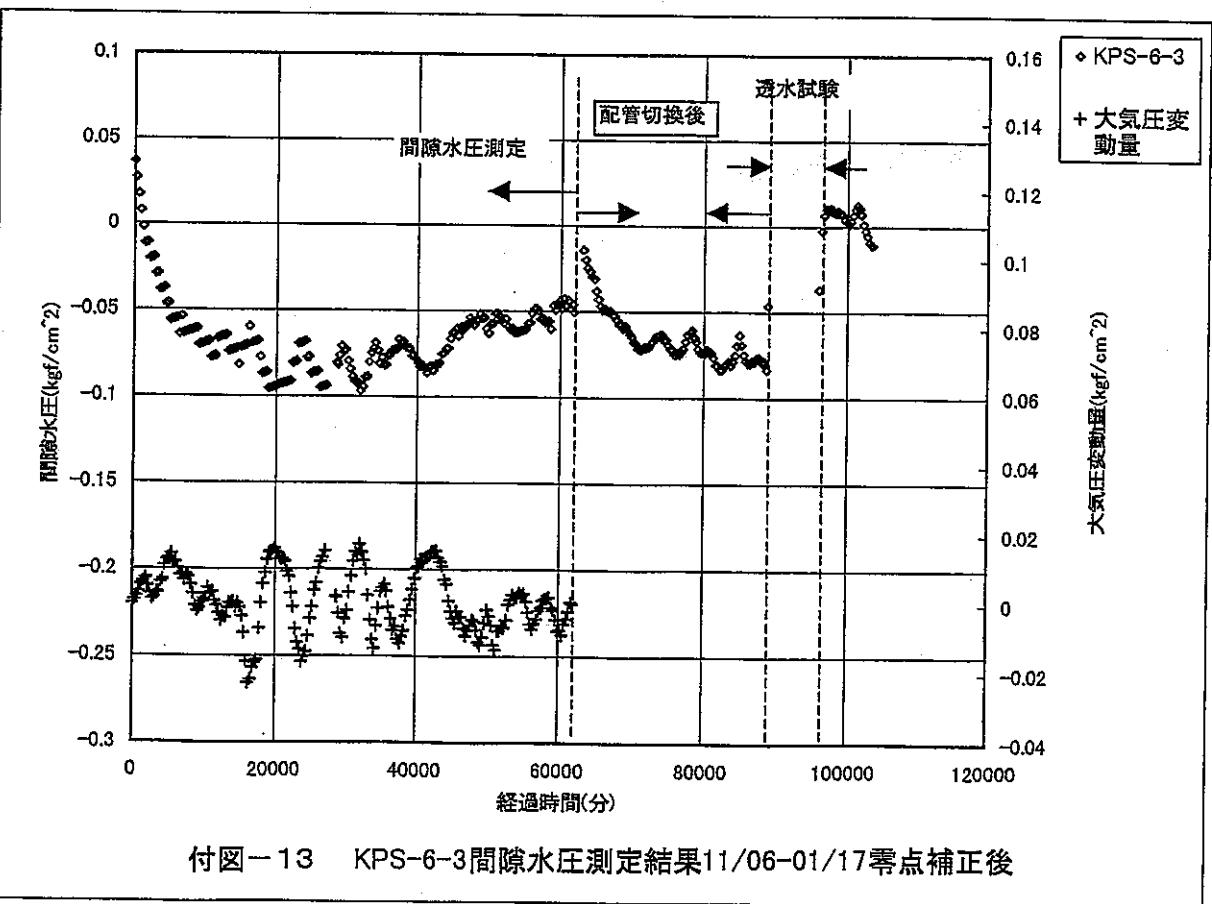
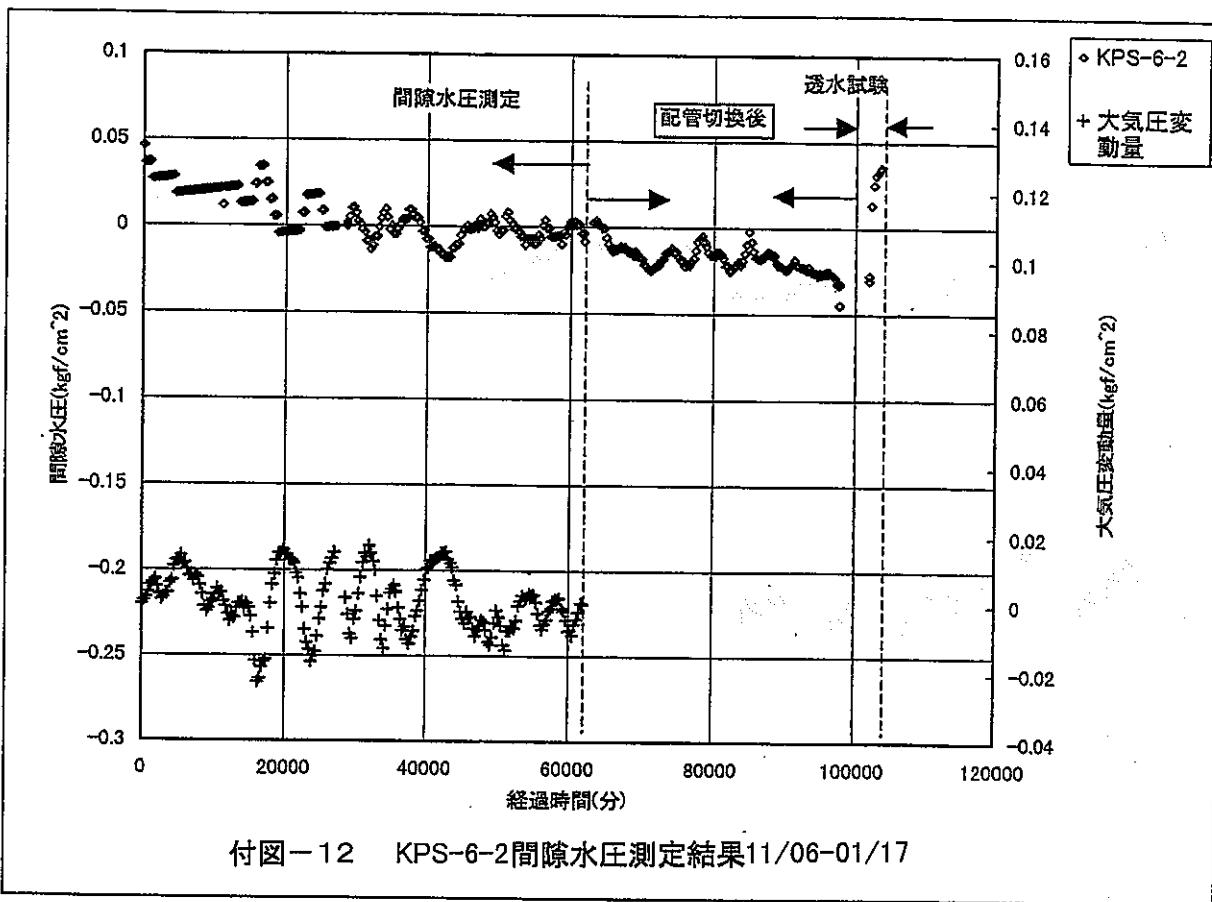




付図-10 KPS-5-3間隙水圧測定結果11/06-01/17

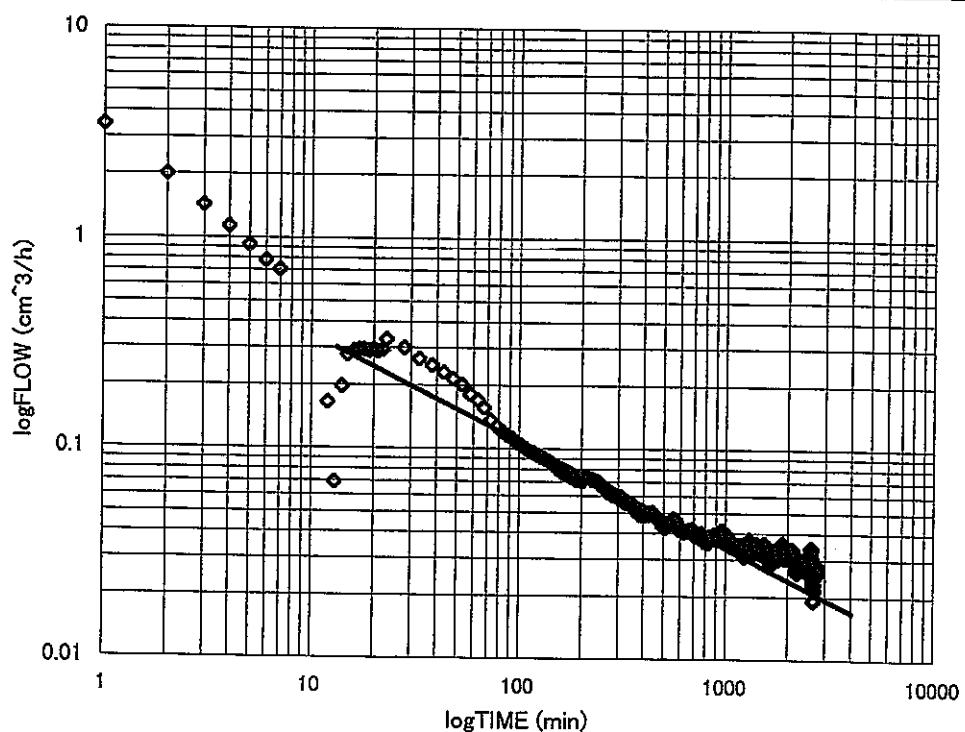


付図-11 KPS-6-1間隙水圧測定結果11/06-01/17

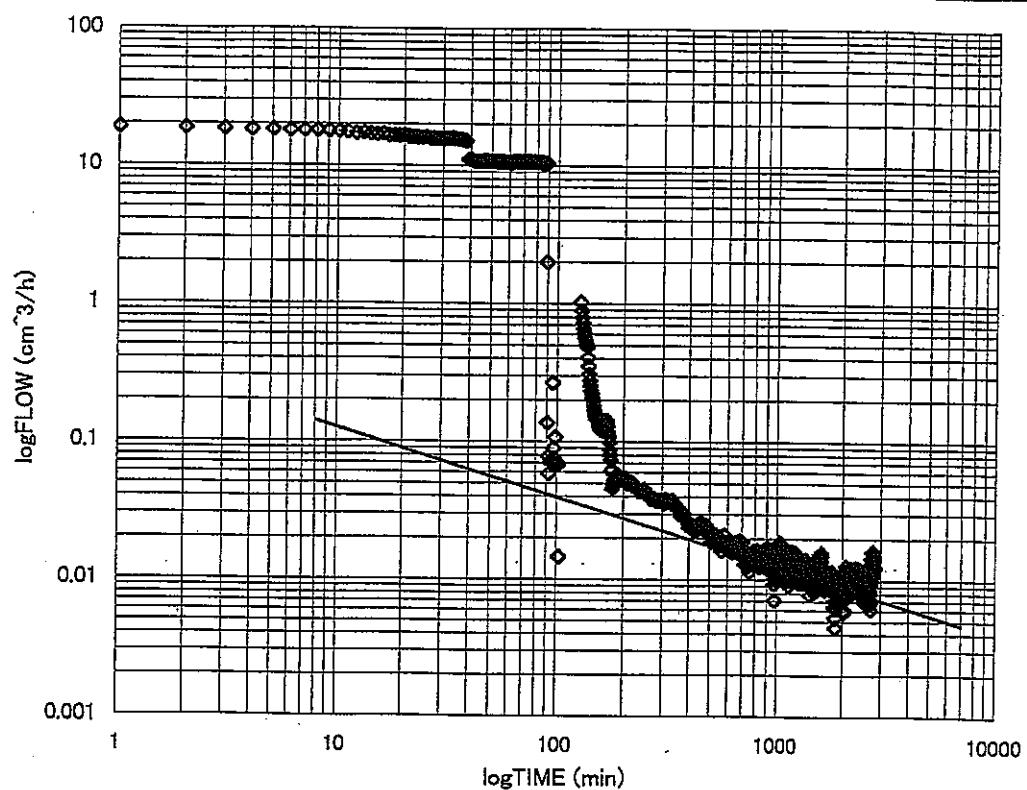


(2) 定圧注水試験非定常解析図

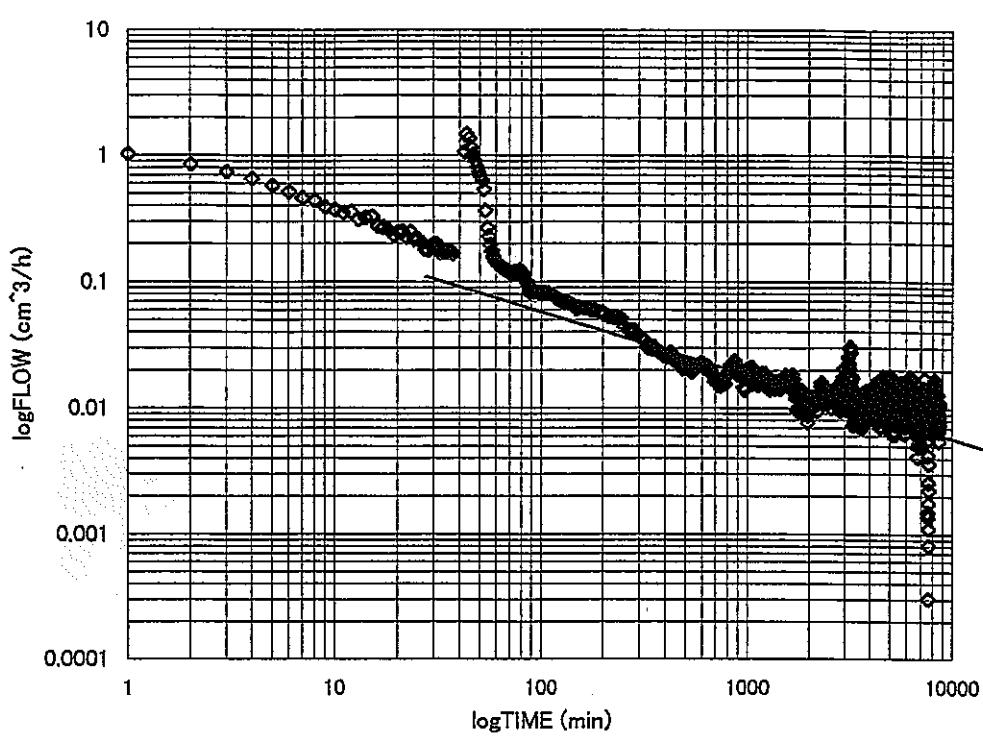
・付図-14	KPS-2-1区間 log10t-log10Q曲線	6 1
・付図-15	KPS-2-2区間 log10t-log10Q曲線	6 1
・付図-16	KPS-2-3区間 log10t-log10Q曲線	6 2
・付図-17	KPS-3-1区間 log10t-log10Q曲線	6 2
・付図-18	KPS-5-1区間 log10t-log10Q曲線	6 3
・付図-19	KPS-5-2区間 log10t-log10Q曲線	6 3
・付図-20	KPS-5-3区間 log10t-log10Q曲線	6 4
・付図-21	KPS-6-1区間 log10t-log10Q曲線	6 4
・付図-22	KPS-6-2区間 log10t-log10Q曲線	6 5



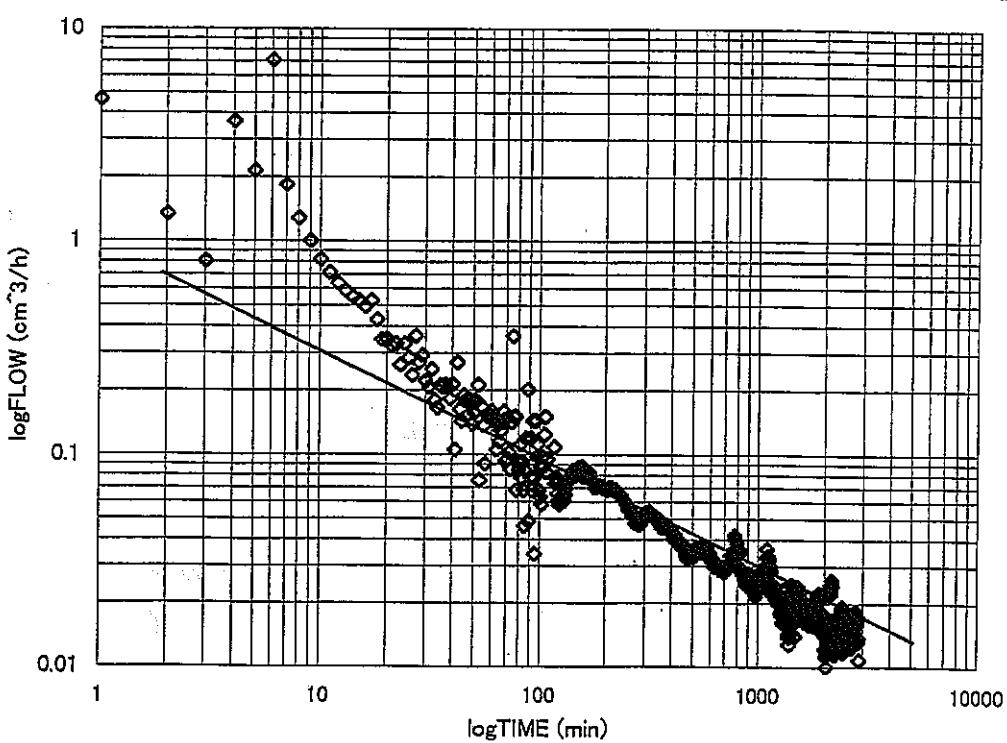
付図-14 KPS-2-1区間 $\log_{10}t-\log_{10}Q$ 曲線



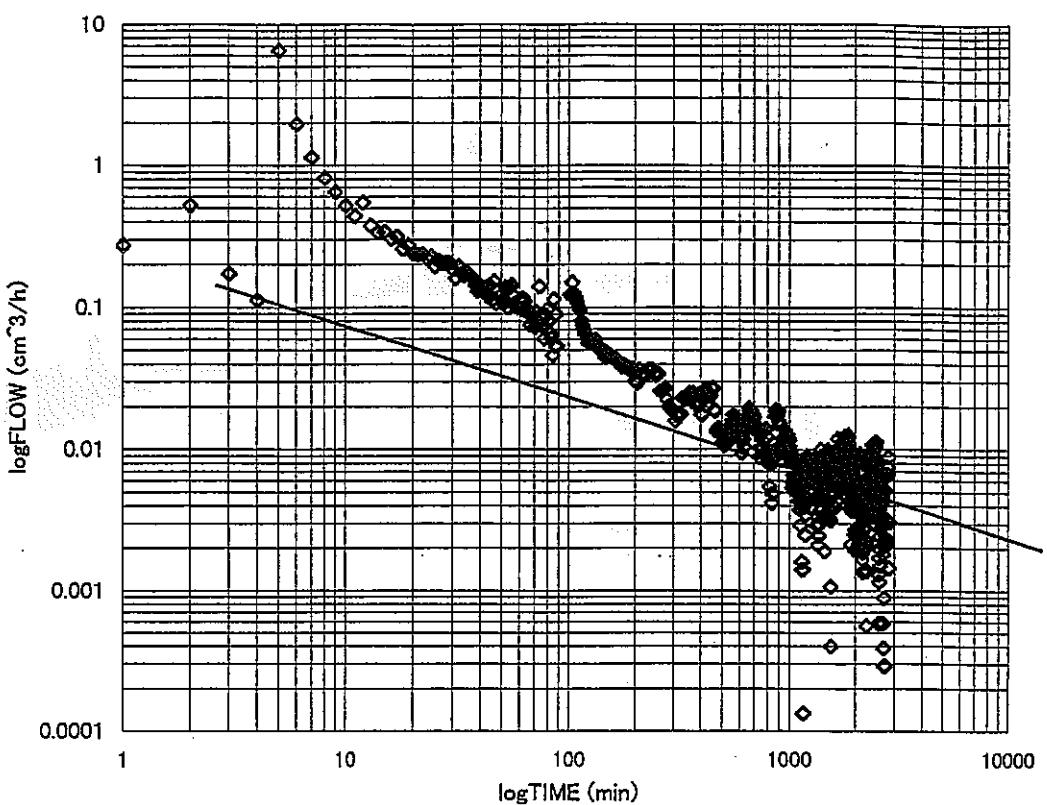
付図-15 KPS-2-2区間 $\log_{10}t-\log_{10}Q$ 曲線



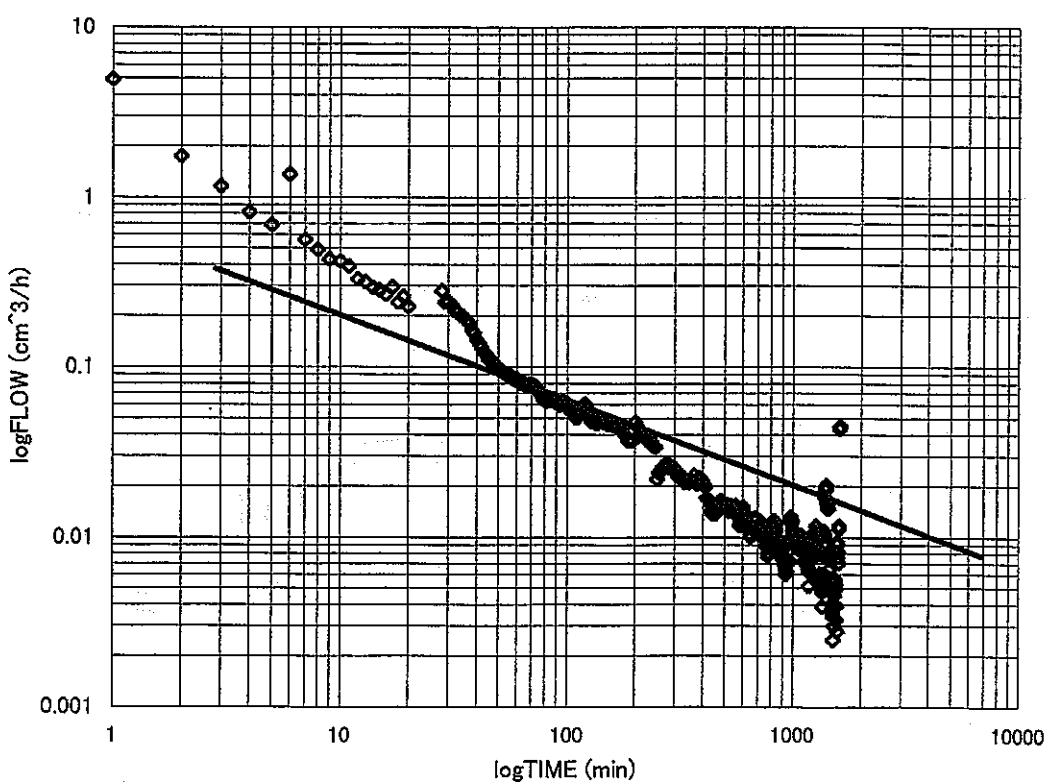
付図-16 KPS-2-3区間 $\log_{10}t-\log_{10}Q$ 曲線



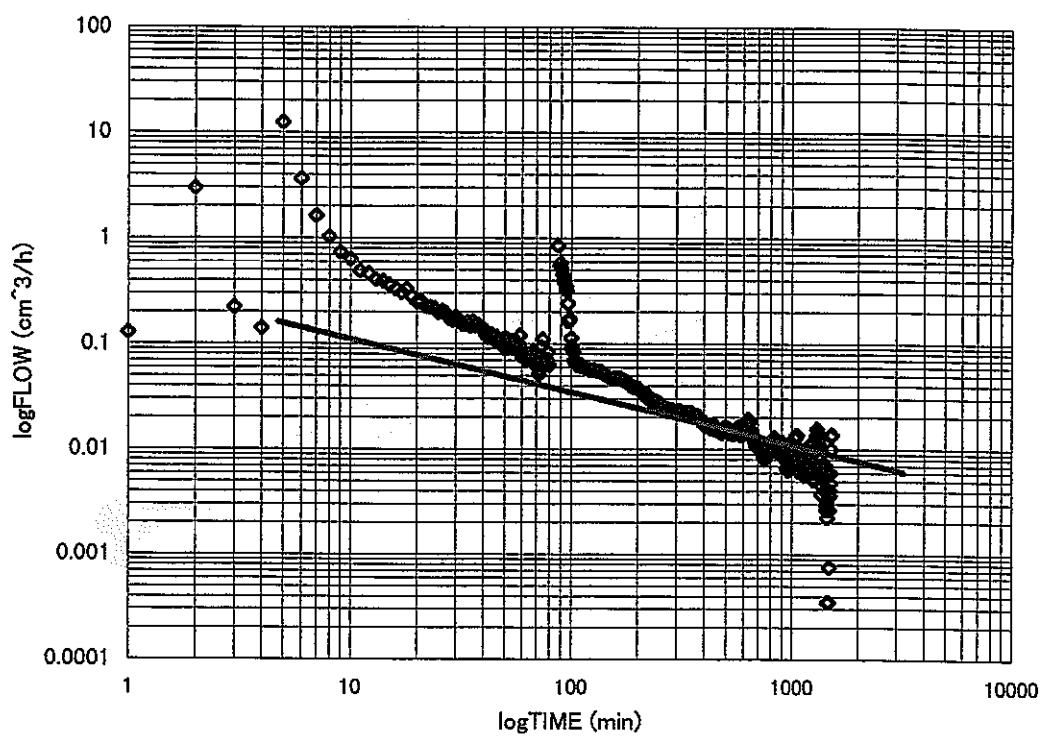
付図-17 KPS-3-1区間 $\log_{10}t-\log_{10}Q$ 曲線



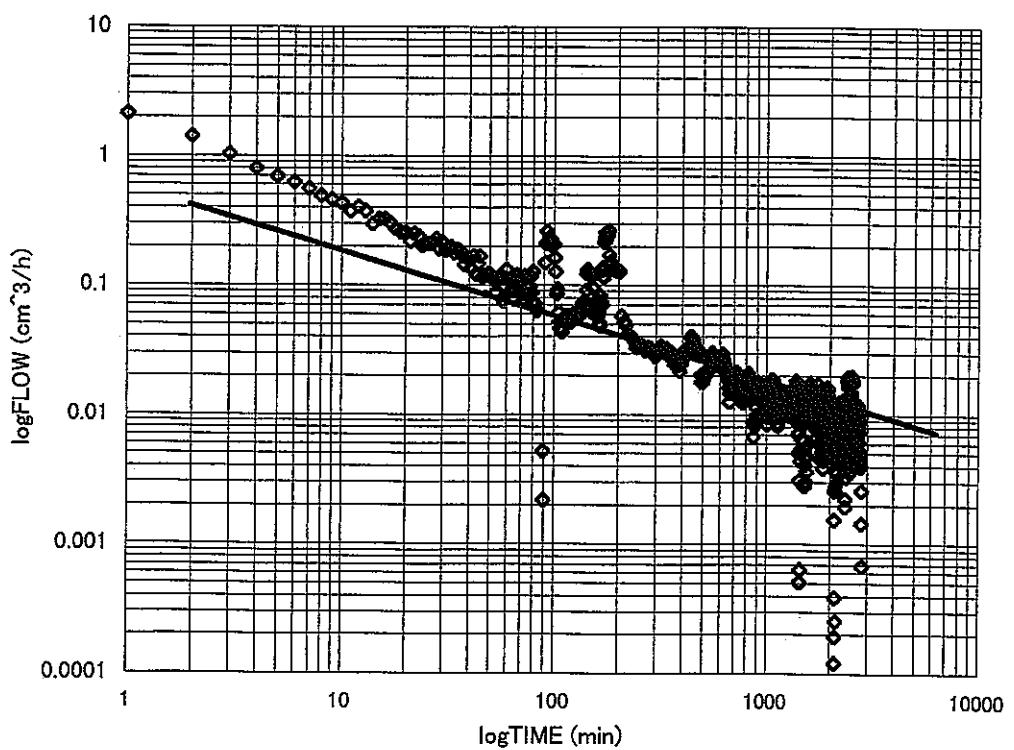
付図-18 KPS-5-1区間 $\log 10t$ - $\log 10Q$ 曲線



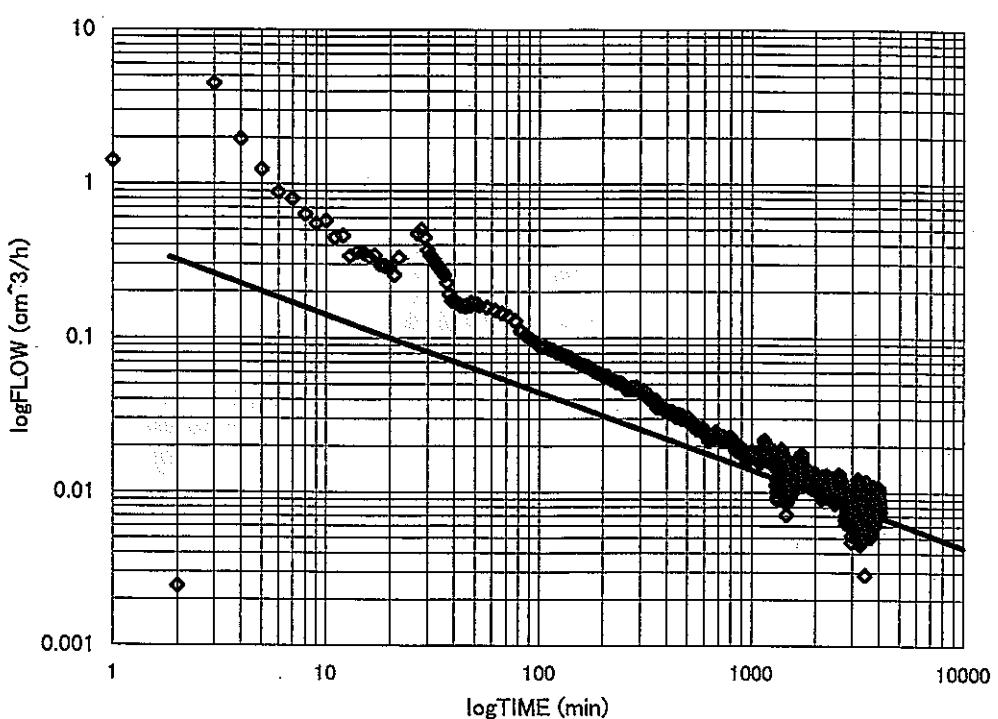
付図-19 KPS-5-2区間 $\log 10t$ - $\log 10Q$ 曲線



付図-20 KPS-5-3区間 $\log 10t-\log 10Q$ 曲線



付図-21 KPS-6-1区間 $\log 10t-\log 10Q$ 曲線



付図-22 KPS-6-2区間 $\log 10t$ - $\log 10Q$ 曲線

(3) 写 真 集	
・写真-1 多点式パッカー	6 7
・写真-2 多点式パッカー設置	6 7
・写真-3 レジン注入作業	6 8
・写真-4 浮き石防護工	6 8
・写真-5 透水試験状況 (定水圧制御装置、流量計ユニット)	6 9
・写真-6 透水試験状況 (流量計ユニット、圧力計ユニット、記録装置)	6 9

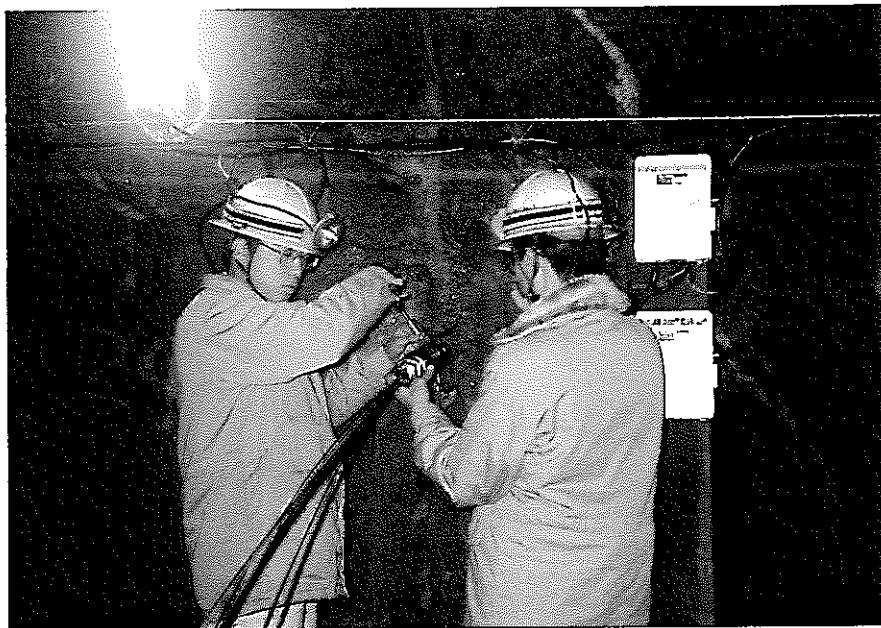


写真-1 多点式パッカー



写真-2 多点式パッカー設置

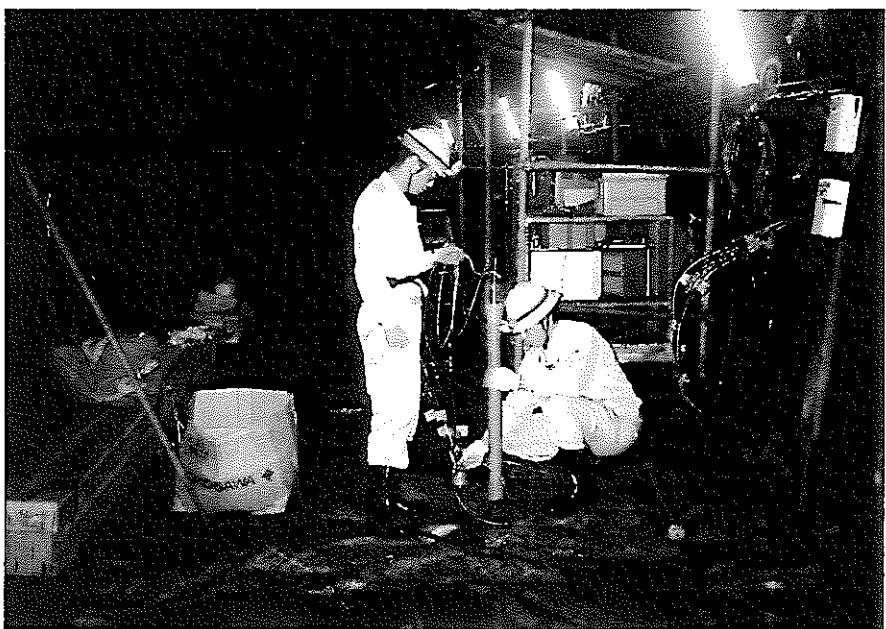


写真-3 レジン注入作業



写真-4 浮き石防護工

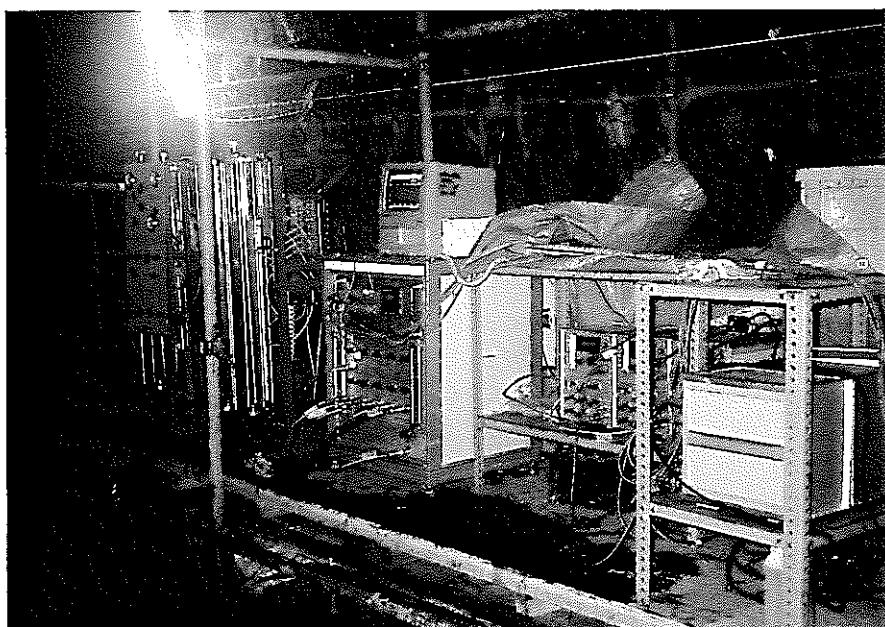


写真-5 透水試験状況
(定水圧制御装置、流量計ユニット)

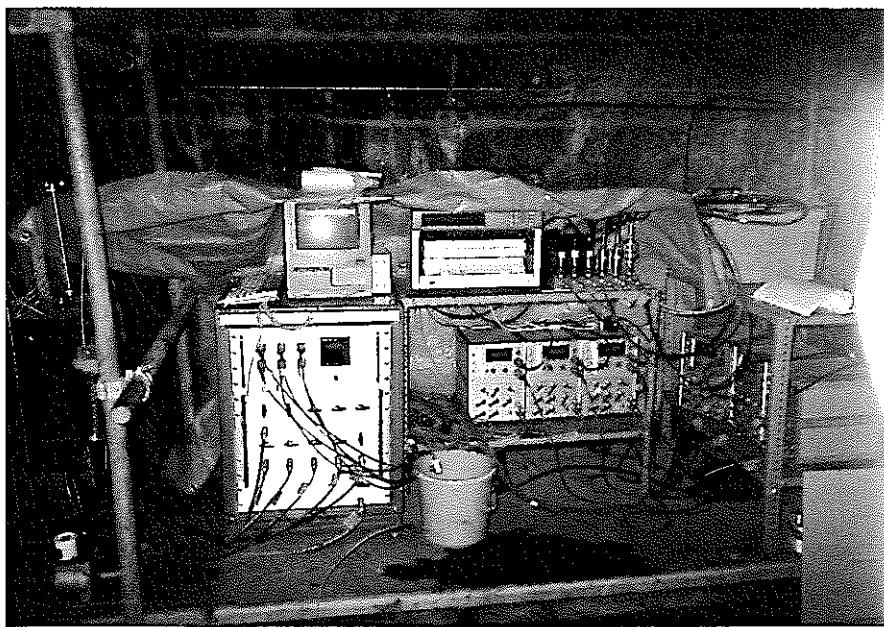


写真-6 透水試験状況
(流量計ユニット、圧力計ユニット、記録装置)