

釜石鉱山におけるグラウト技術の適用試験

(動力炉・核燃料事業団 研究委託内容報告書)

概要

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
Σ	J1100 96-002	97.11.28
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		

1996年3月

鹿島建設株式会社

釜石鉱山におけるグラウト技術の適用試験

(動力炉・核燃料事業団 研究委託内容報告書)

概 要

1996年3月

鹿島建設株式会社

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

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

釜石鉱山におけるグラウト技術の適用試験

日比谷 啓介* 戸井田 克* 塩釜 幸弘*
山本 拓治* 升元 一彦* 古市 光昭**

要 旨

グラウトは、岩盤中の透水性を改良する技術であり、特に、地下深部に掘削された空洞周辺やプラグ構築部周辺に発生するゆるみ域への適用が考えられる。今回、釜石鉱山においてベントナイトを注入材料としたグラウト試験を行い、地下深部岩盤への適用性を評価した。具体的には、注入孔（長さ5m）から濃度0.2～8.0wt%のベントナイトスラリーをP=1.0～1.5（MPa）で注入し、周辺の観測孔（長さ7m）2孔でモニタリングを行った。注入前後に注入孔での透水試験および観測孔間のトモグラフィ（電磁波、比抵抗）試験の結果を対比することによって注入効果を評価した。

主な試験結果を以下に示す。

- 1) ベントナイトスラリーの注入により、注入孔周辺の透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec から $10^{-8} \sim 10^{-9}$ cm/secに改良された。
- 2) スラリー濃度が大きくなる程ベントナイトスラリーの注入量や注入速度は減少し、スラリー濃度が8.0wt%では、ほとんど注入できない状態になった。
- 3) 電磁波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィによって、ベントナイトスラリーの注入範囲を推定できた。

本報告書は、鹿島建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の内容である。
契約番号：070D0132

事業団担当部課室および担当者 東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室 室長 石川 博之

* 鹿島建設（株）技術研究所

** 鹿島建設（株）建設総事業本部 原子力室

Clay grouting experiment at the Kamaishi Mine

K. Hibiya*, M. Toida*, Y. Shiogama*,
T. Yamamoto*, K. Masumoto*, M. Furuichi**

Abstract

Grouting technique is used to improve the hydraulic conductivity of rock mass. Especially, for improving the disturbed zone which are caused by the excavation of cavern and the plug installation of adits, grouting will be useful. Properties required for grouting are to have low permeability and long-term durability.

The purpose of experiments using bentonite materials were executed at the Kamaishi mine is to evaluate the applicability of bentonite grouting to the geological conditions in deep underground rock mass. Bentonite slurry of 0.2~8.0wt% was injected by the pressure of 1.0~1.5 (MPa) at the injection borehole ($\ell = 5\text{m}$), and the monitoring was executed at the two observation boreholes ($\ell = 7\text{m}$), which were drilled at the distance of 3~5m from the injection borehole.

The Lugeon tests for injection borehole and tomography measurements between observation boreholes were executed before grouting and after grouting. The applicability of bentonite grouting was discussed based on these results.

The results of grouting experiments are as follows :

- 1) By bentonite grouting, the hydraulic conductivity of injection boreholes were improved form $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$ to $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{cm/sec}$.
- 2) Injection rate and injection amount of bentonite slurry decreased with the increase of bentonite content, and bentonite slurry of 8.0wt% could be hardly injected in the fractured rock mass.
- 3) Radar tomography and resistivity tomography were useful techniques for surveying the injection area of bentonite slurry.

Work performed by KAJIMA Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works, Hiroyuki Ishikawa

* : Kajima Technical Research Institute

** : Kajima Corporation, Nuclear Power Dept.

目 次

1. はじめに	1
2. 試験場所	2
3. 試験フロー	6
4. 実施内容	9
4.1 試験レイアウト	9
4.2 岩盤特性調査	12
4.2.1 コア観察	13
4.2.2 孔内観察	14
4.2.3 透水試験	22
4.2.4 トモグラフィー試験	26
4.3 グラウト注入試験	35
4.3.1 注入材料	39
4.3.2 グラウト注入	43
4.4 効果確認試験	54
4.4.1 孔内観察	55
4.4.2 透水試験	58
4.4.3 トモグラフィー試験	60
4.4.4 滴水量測定	68
5. 考 察	70
5.1 粘土系グラウトの基本性能について	70
5.1.1 注入材料	70
5.1.2 注入濃度	70
5.1.3 注入圧力	70
5.2 注入効果について	70
5.2.1 注入孔周辺の透水性の変化	70
5.2.2 注入溶液の粘性を考慮した透水性評価	71
5.2.3 注入範囲の評価	73

5.3 試験フローについて	81
6. まとめと今後の課題	83
6.1 まとめ	83
6.2 今後の課題	83
参考文献	85

表 一 覧

表-4.1	亀裂観察結果	10
4.2	試錐用使用機械	10
4.3	孔内観察使用機器	16
4.4	透水試験用機器	24
4.5	透水試験結果（グラウト注入前）一覧	25
4.6(1)	トモグラフィー試験使用機器	31
4.6(2)	トモグラフィー試験使用機器	32
4.7	注入用機器一覧	37
4.8	グラウト材料の特性	40
4.9	注入溶液の粘性（KBG-3）	42
4.10	注入溶液の粘性（KBG-6）	42
4.11	注入結果（KBG-3）	45
4.12	注入結果（KBG-6）	46
4.13	透水試験結果（注入前後の対比）	59
5.1	注入溶液の粘性と注入量（KBG-3）	75
5.2	注入溶液の粘性と注入量（KBG-6）	76
5.3	各注入濃度ごとの固有透水係数	77
5.4	グラウト溶液の電気伝導度	78

図 一 覧

図-2.1	試験位置 (平面図)	3
2.2	試験位置 (鳥かん図)	4
2.3	試験位置 (断面図)	5
3.1	試験フロー	8
4.1	試験位置の亀裂分布状況 (床盤)	11
4.2	孔内観察方法	15
4.3	亀裂分布状況 (KBG-1 ~ KBG-2)	17
4.4	亀裂分布状況 (KBG-3 ~ KBG-2)	18
4.5	亀裂分布状況 (KBG-4 ~ KBG-5)	19
4.6	亀裂分布状況 (KBG-6 ~ KBG-5)	20
4.7	亀裂群 A, B の分布状況 (模式図)	21
4.8	透水試験方法	23
4.9	電磁波トモグラフィー測定方法	29
4.10	比抵抗トモグラフィー測定方法	30
4.11	電磁波トモグラフィー測定配置図	33
4.12	比抵抗トモグラフィー測定配置図及び解析ブロック図	34
4.13	グラウト注入方法	36
4.14	湧水量測定模式図	38
4.15	クニゲルVAの粒径加積曲線	41
4.16	KBG-3 注入結果例 (B/W = 0.2wt%)	47
4.17	KBG-3 注入時のグラウト坑道底盤からのリーク状況	48
4.18	KBG-6 注入時のグラウト坑道底盤からのリーク状況	49
4.19	注入濃度と注入速度の関係 (KBG-3)	50
4.20	注入濃度と注入速度の関係 (KBG-6)	51
4.21	注入濃度と単位注入ベントナイト量の関係 (KBG-3)	52
4.22	注入濃度と単位注入ベントナイト量の関係 (KBG-6)	53
4.23	孔内観察結果例 (KBG-3)	56
4.24	孔内観察結果例 (KBG-6)	57
4.25	電磁波トモグラフィー解析結果 (KBG-1 ~ 2 断面)	62
4.26	電磁波トモグラフィー解析結果 (KBG-2 ~ 3 断面)	63
4.27	電磁波トモグラフィー解析結果 (KBG-4 ~ 5 断面)	64

4.28	電磁波トモグラフィー解析結果 (KBG-5 ~ 6 断面)	6 5
4.29	比抵抗トモグラフィー解析結果 (KBG-1 ~ 2 断面)	6 6
4.30	比抵抗トモグラフィー解析結果 (KBG-4 ~ 5 断面)	6 7
4.31	滴水量測定結果	6 9
5.1	固有浸透係数 (KBG-3)	7 9
5.2	固有浸透係数 (KBG-6)	8 0
5.3	試験フロー	8 2

1. はじめに

空洞の掘削に伴う亀裂からの湧水や、力学的、水理学的ゆるみ域の発生に伴い形成される地下水の卓越流路は、地下空間利用等の面からしばしばグラウト等による止水対策の対象となり得る。

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるグラウト施工では、周辺の地下水組成等の化学的地下水環境を極力乱さないようにする観点からセメント等を避けて粘土系材料を使用せざるを得ない場合も考えられる。粘土系グラウトは、主として亀裂等のめづまり効果を期待するものであるが、その止水効果、安定性及び改良範囲の性能の評価が重要となる。これらの性能は、亀裂の性状、注入圧及び濃度等に依存するために釜石原位置試験場においてこれらをパラメータとしたグラウト技術の適用試験を実施し、実岩盤条件下での粘土系グラウトの基本性能並びに我が国の岩盤への適用性およびトモグラフィーによるグラウト効果の確認に対する適用性を把握する。

2. 試験場所

本試験は、釜石鉱山内大峰 550レベル坑道の釜石原位置試験場において実施した。(図-2.1) 釜石鉱山NW坑道にある原位置試験場は、坑口から約4000mの地点である。550mレベル坑道の試験場は、NW坑道壁面観察によれば平均割れ目頻度は1.3m/本であり、 $N65^{\circ}E75^{\circ}NW$ に分布のピークをもつ1系統の割れ目が卓越している。試験場の平均被り厚さは300mであり、地圧の大きさは鉛直成分 8.9MPa, 水平成分の南北方向は18.2MPa, 東西方向15.3MPaである¹⁾。

本試験を行うに当たり、既存坑道であるNW坑道からトの字型の試験区域を新たに掘削・拡幅した。試験位置を図-2.1~2.3に示す。グラウト試験は掘削・拡幅した試験区域のうち、既存坑道に水平となるように配置し、坑道は高さ5m, 幅5m, 奥行10mである。

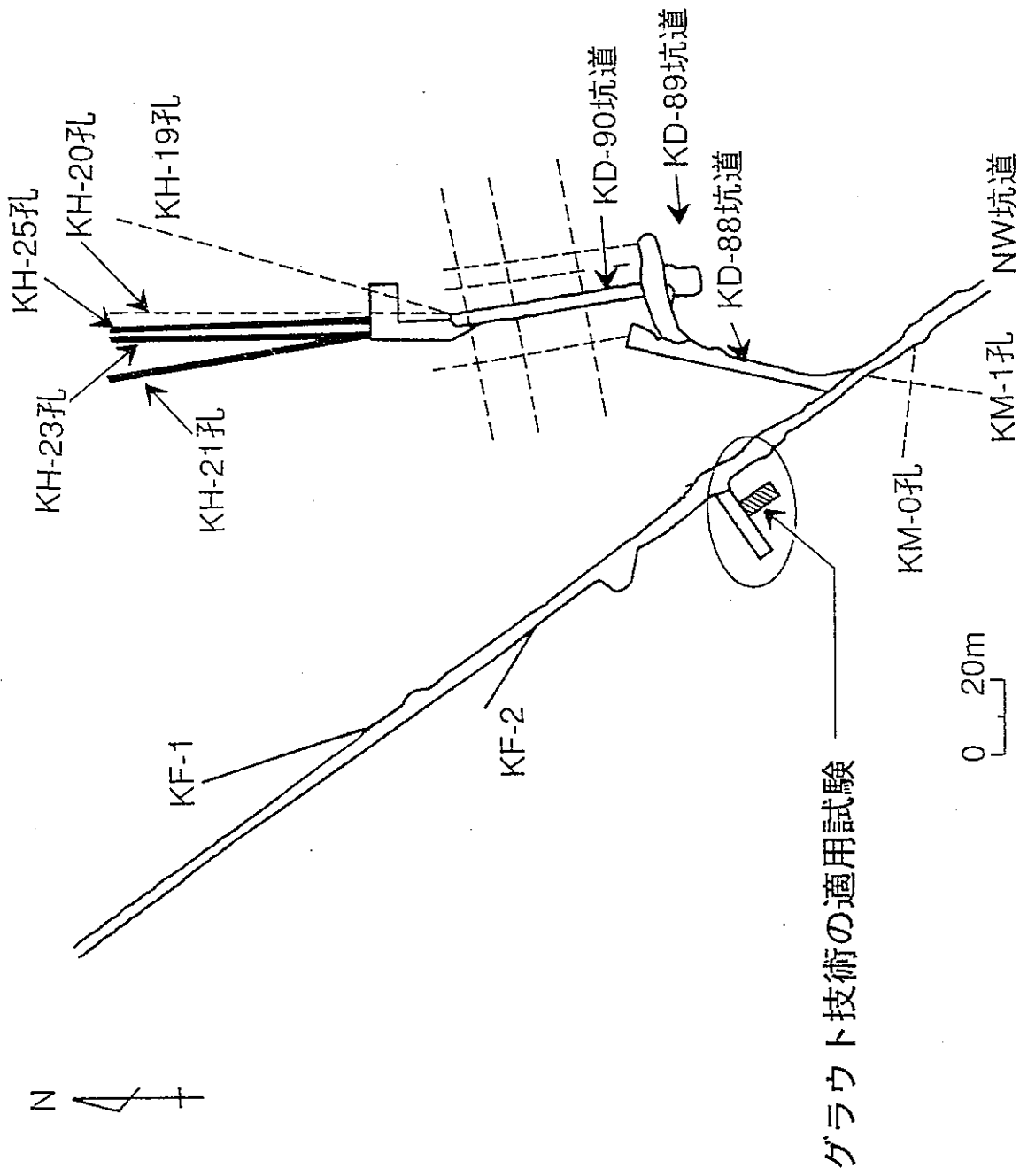


図-2.1 試験位置 (平面図)

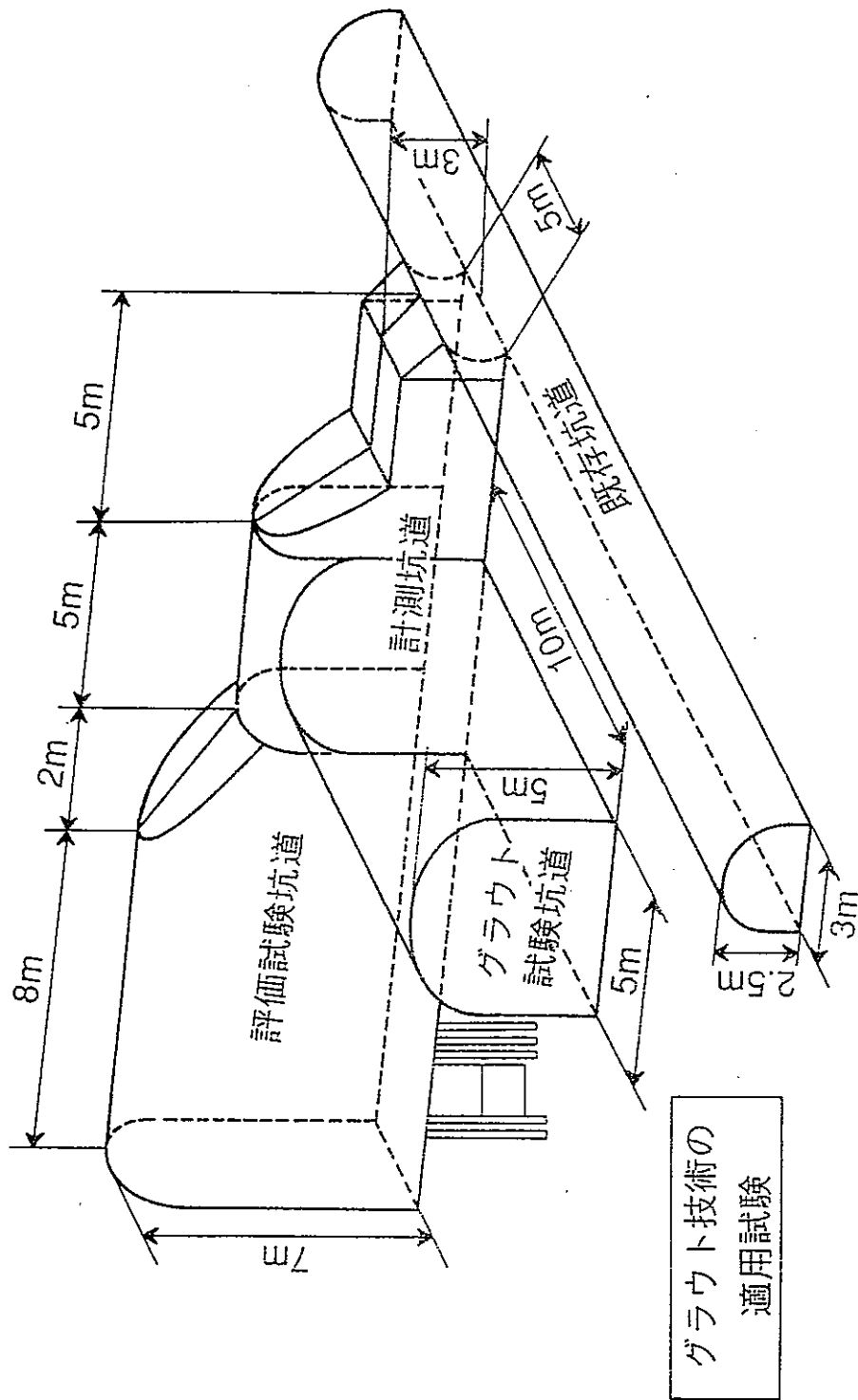


図-2.2 試験位置 (鳥かん図)

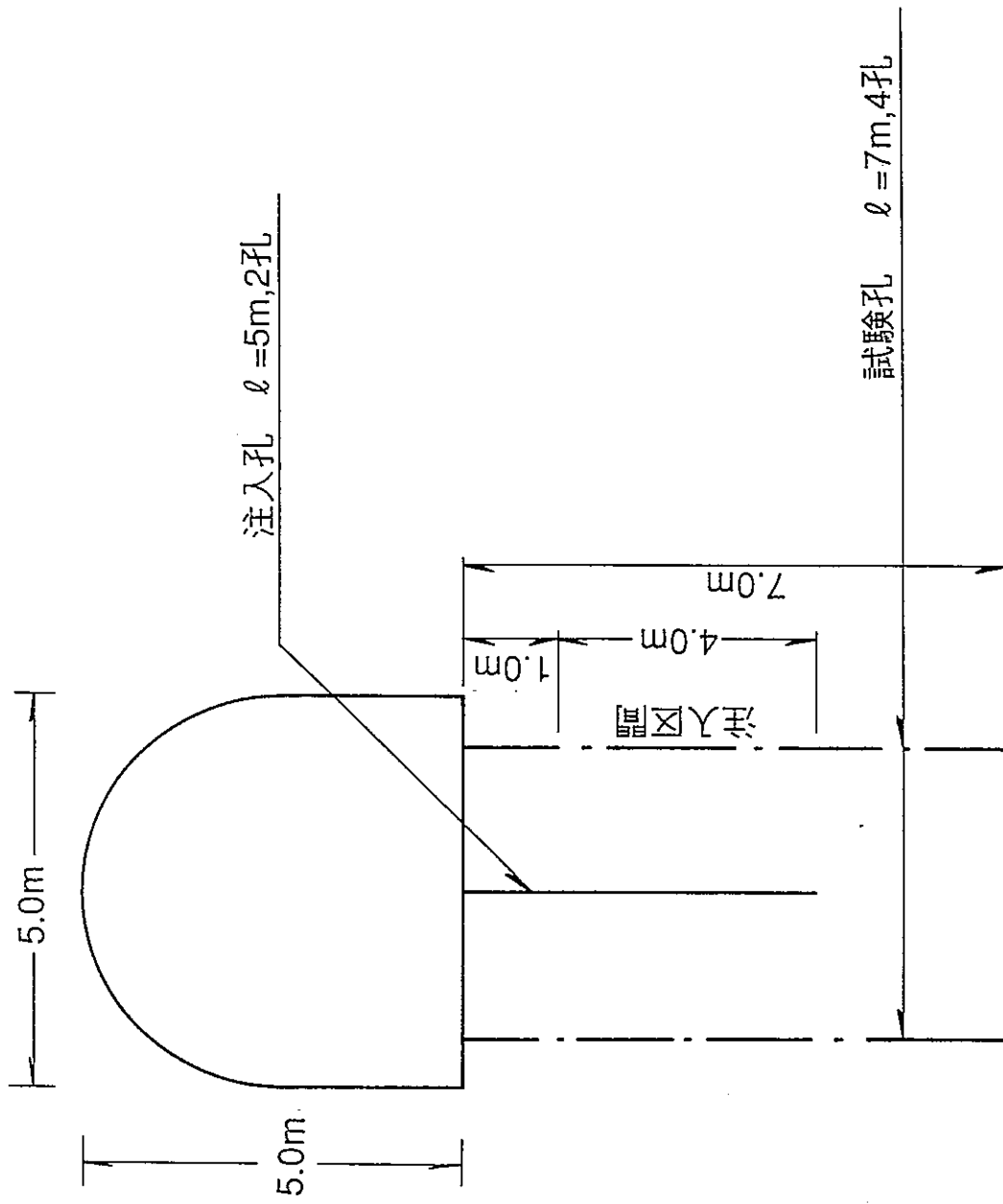


图-2.3 試驗位置 (断面图)

3. 試験フロー

本試験では図－ 3.1に示すフローを採用した。試験は、はじめに観測孔および注入孔の削孔を行う。観測孔および注入孔の削孔後、コア観察、孔内観察および水押し試験を実施する。コア観察、孔内観察および水押し試験は亀裂分布状況の把握及び注入仕様の検討として位置づけられる。

コア観察および孔内観察で得られる情報は試錐孔のごく近傍のものに限られるが、床盤の亀裂観察結果の情報とを合わせることで、グラウト注入孔に確認された亀裂とグラウト注入の対象とする亀裂群との一致性を推定できると考えられる。

水押し試験は、試験対象領域における透水性を把握することを目的とする。コア観察および孔内観察では亀裂の分布や開口の有無などが情報として得られるが、これらの亀裂が岩盤内で閉鎖している、あるいは破碎帯に連結しているというような透水性に関する情報は得られない。グラウトの注入は透水性の低減化が目的であり、場の透水性に関する情報を得ることは注入仕様の検討において重要な位置を占めると考えられる。これらコア観察、孔内観察および水押し試験の結果により粘土系グラウトの注入仕様を決定する。

亀裂分布状況の把握及び注入仕様の検討に続き、透水試験を実施する。透水試験では試験孔周辺の透水係数を算出し、グラウト後に再度行う試験結果と比較することでグラウトの効果を透水係数の値で把握する。

透水試験に引き続きトモグラフィー測定を行う。粘土系グラウトは液体であり、その電気伝導度は岩盤内の地下水の電気伝導度より大きいため、グラウトの注入により亀裂内の地下水が粘土グラウトに置き換わることで岩盤内の比誘電率が上がり、比抵抗値が下がることが期待できる。この変化をグラウトの注入前後に電磁波及び比抵抗トモグラフィーを実施することにより把握し、粘土グラウトの浸透範囲を推定する。そこで、グラウト注入前の電磁波特性（電磁波の伝播速度値）及び比抵抗特性（比抵抗値）を調査する。

以上の試験、調査終了後、グラウトを注入する。グラウトの注入はコア観察、孔内観察および水押し試験の結果により決定した粘土系グラウトの注入仕様による。粘土グラウト注入試験から注入に関する粘土系グラウトの基本性能を把握する。

粘土グラウト注入終了後、孔内観察を行う。孔内観察は注入したグラウトが亀裂内へ浸透している様子を直接観察するために実施するものであり、グラウト注入孔内のグラウト材を亀裂表面のグラウトを洗い流さないように水に置き換える。注入孔内を水に置き換えた後、孔内観察を実施する。

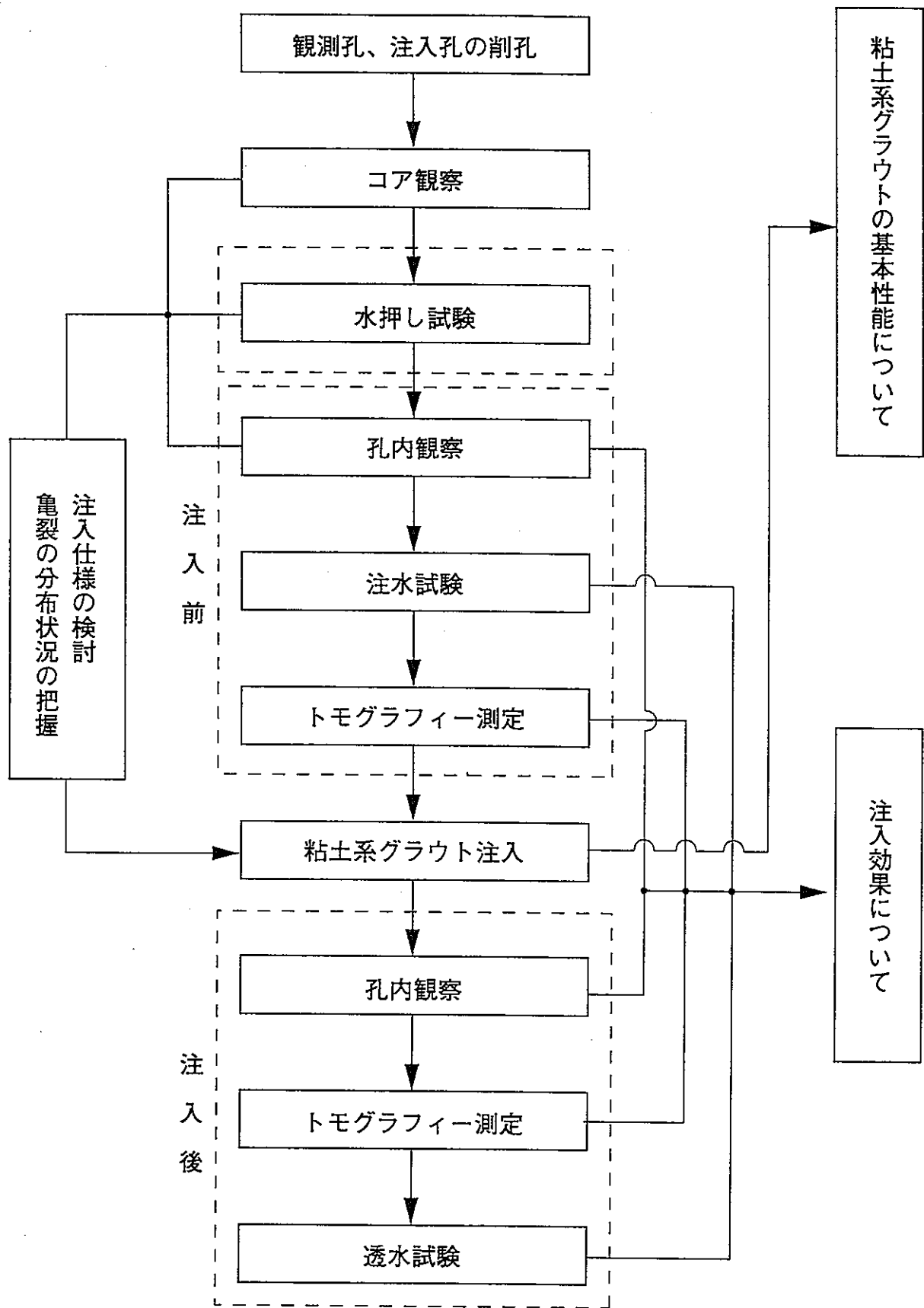
孔内観察の次に、トモグラフィー測定を実施する。亀裂内に粘土が浸透、付着することにより亀裂内の電磁波特性、比抵抗特性が変化すれば、その変化した範囲が粘土グラウトの浸透範囲として推定することが出来る。

これらの試験、調査終了後に、透水試験を実施する。透水試験では試験孔周辺の透水係

数を算出し、グラウト注入前の試験結果と比較することでグラウトの効果を透水係数の値で把握する。

注入前後の孔内観察、トモグラフィー測定（電磁波、比抵抗）および透水試験は粘土系グラウトの注入効果についての試験として位置づけられる。

以上が試験フローである。今回採用した試験フローはこれまでに国内外で実施された試験項目は、ほぼ網羅されていると考えられる。但し、注入後に、岩盤を掘削して注入状況を直接目視確認するという調査報告が一部海外で実施されている²⁾。しかし、本試験で同じような手法を取り入れた場合、この岩盤掘削には水を使用できない（粘土系グラウトが掘削中に流出してしまう恐れがある。）ため、大規模に実施することが難しい。また、本試験は注入した粘土グラウトの岩盤内での安定性についても評価の対象とすることから、今後実施する透水試験、トモグラフィー測定等を考慮し、今回の試験では注入状況を直接目視確認する調査を実施しないこととした。



図一3.1 試験フロー

4. 実施内容

4.1 試験レイアウト

試験位置の床盤での亀裂分布状況を図-4.1に示す。50cmを越える長さの亀裂観察の結果、試験位置内の亀裂はN50-90°Eの走向を持ち、傾斜は急角度のものが多いことがわかった。

グラウトの試験対象の亀裂は、グラウトの注入状況と亀裂性状との関連について検討するため、観察された亀裂の内ある程度連続性が見込まれるものの中から、天盤からの滴水のある亀裂と滴水のない亀裂の2種類を選択した。滴水のある亀裂を亀裂群Aとし、滴水のない亀裂を亀裂群Bとした。表-4.1に示すように、亀裂群Aは6本の主要亀裂で構成されており床盤観察での開口幅は最大12.0mm、亀裂群Bは2本の主要亀裂で構成され床盤観察での最大開口幅は15.0mmである。いずれの亀裂も亀裂内部は充填鉱物で満たされ、亀裂群Aでは微弱な変質を受けたものを含んでいた。

これら亀裂群A、Bへの粘土系グラウト注入を考慮に入れ、図-4.1に示すように、亀裂群Aに観測孔KBG-1、2及び注入孔KBG-3を配置し、亀裂群Bに観測孔KBG-4、5及び注入孔KBG-6を配置した。試錐孔はいずれも直径66mmで、長さは観測孔が7.0m、注入孔が5.0mであり、試錐方向は鉛直下向きである。注入孔であるKBG-3、6は、それぞれ亀裂群A、Bと岩盤内で交わる位置に配置し、観測孔は試験区域を狭く限定しないこと、グラウトが観測孔に集中的に回り込まないようにすることを考慮に入れ、直接は亀裂群A、Bと岩盤内で交わらないように配置した。また、観測孔は亀裂群A、Bに対して、それぞれ亀裂をはさんで対称の位置に近くなるように配置した。これにより、注入孔と観測孔の透水試験から亀裂群A、Bを含んだ区域の透水性及び亀裂群A、B周辺岩盤の透水性のデータを取得出来るようにした。

また、試錐孔掘削に用いた機器の仕様を表-4.2に示す。

表-4.1 亀裂観察結果 (坑道床盤)

亀裂 No.	走向	傾斜	変質	充填鉱物	開口幅	
A	41	N90E	84SE		CHL	<1.0
	42	N85E	86NE		BKM, CAL	3.0
	43	N87E	78SE	PK, VW	L, BKM, CAL	6.0
	88	N70E	78NW		DGM, ST, CAL	12.0
	89	N87E	88SE		DGM, ST, CAL	7.0
	138	N90E	90SE		CHL, ST, CAL	2.1
B	18	N80E	85NW		ST, CAL, BKM, CHL, L	15.0
	24	N82E	80NW		CHL, CAL	<1.0

- 開口幅の単位:mm
- ・変質：PK (ピンク色変質), VW (微弱変質)
 - ・充填鉱物：BKM (黒色混合鉱物), DGM (暗緑色混合鉱物), CHL (緑泥石)
CAL (方解石), L (濁沸石), ST (束沸石)

表-4.2 試錐用使用機械

機械名	形式・ メーカー	能力・仕様	重量 (kg)	動力 (kw)
ボーリング マシン	VD-5 吉田鉄工所 利根ボーリング	掘進能力 150m ストローク 300mm 回転数 125~1000rpm	440	5.5

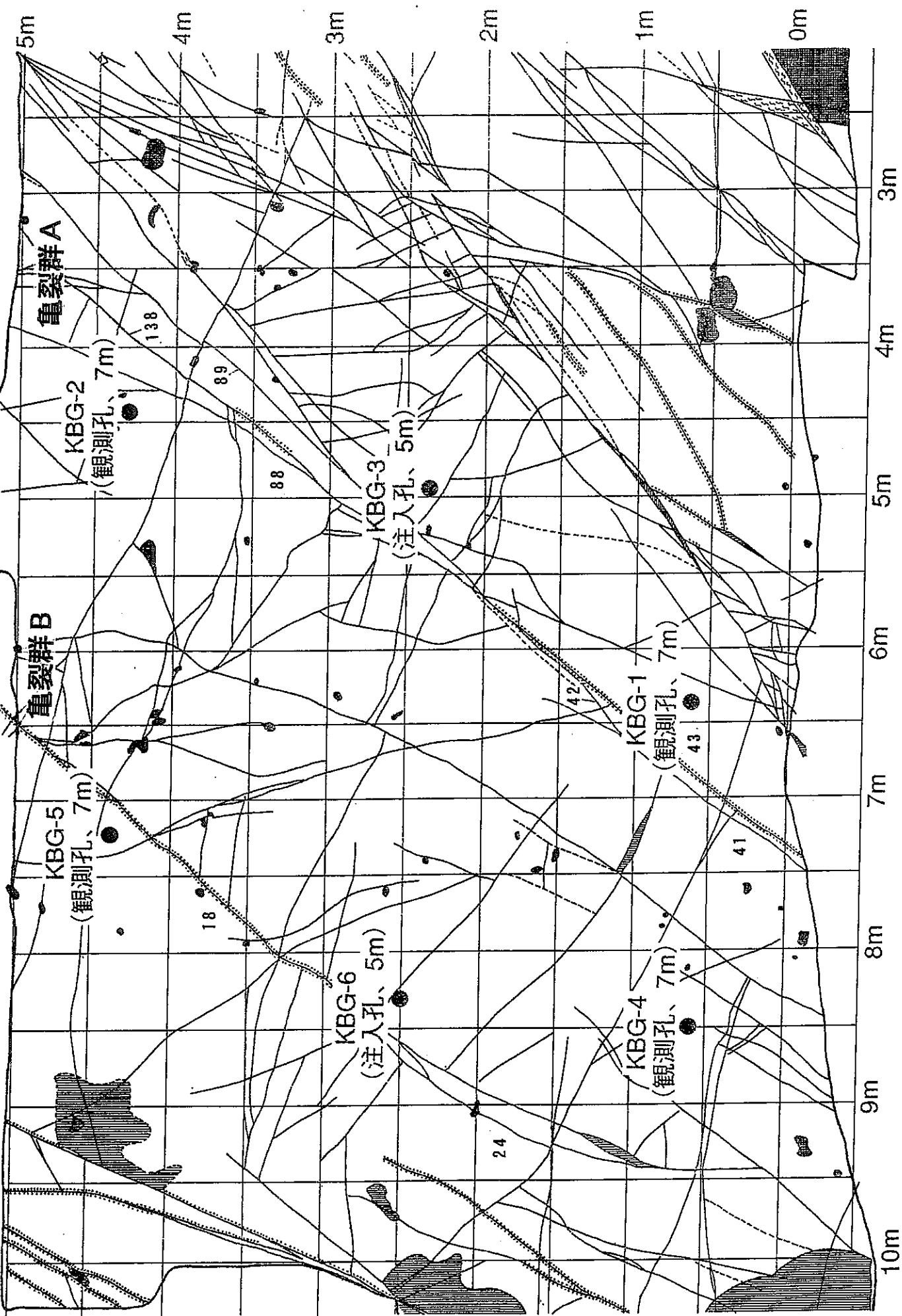


図-4.1 試験位置の亀裂分布状況 (床盤)

4.2 岩盤特性調査

グラウト試験前の岩盤状況を把握するため、図-3.1の試験フローに基づき岩盤特性調査を実施した。調査項目は、試錐孔を用いたコア観察、孔内壁面観察、透水試験およびトモグラフィー試験とした。

4.2.1 コア観察

注入孔2孔 (KBG-3, 6) 及び観測孔4孔 (KBG-1, 2, 4, 5) から採取されたコアの観察を行った。

コア観察から、KBG-3では深度3～4 mに、KBG-6では4～5 mに亀裂が確認できることから、この部分が前節で選択した亀裂群A, Bが注入孔に交わる深度であると推定できる。具体的には、亀裂群Aについては、床盤の亀裂観察での傾斜は 88° であり、KBG-3の孔内の3～4 mに存在する亀裂の傾斜も $68\sim 80^{\circ}$ であった。また、亀裂群Bについては、床盤の亀裂観察での傾斜が 85° であるのに対し、KBG-6の孔内4～5 mに存在する亀裂の傾斜は $11\sim 12^{\circ}$ と開きがあるが、両者の走向がほぼEWで一致している。

RQD分布については、80%以下の部分はKBG-1の2～3 m, 5～6 m, KBG-2の2～3 m, KBG-4の1～2 m, KBG-6の4～5 mであり、亀裂群A, Bが注入孔に交わる深度以外にもRQDが低い部分があることがわかる。このことから、亀裂群A, B以外にもボーリング孔と交わる卓越した亀裂群が存在することがわかる。

4.2.2 孔内観察

注入孔2孔及び観測孔4孔について、グラウト注入前にボアホールテレビによる孔内観察を実施した。

図-4.2に孔内観察方法の概要を示し、表-4.3に用いた機器の仕様を示す。ボーリング孔は6孔とも鉛直孔であることから、孔内観察結果では水平方向の亀裂を確率的に多くとらえることになるが、高角な亀裂も観察される。その走行はENE方向であり、これは坑道内で観察される亀裂の卓越方向とほぼ一致している。

また、ボアホールテレビにより観察される亀裂をトモグラフィー測定の測定断面(4断面)ごとに表示したものを図-4.3~4.6に示す。ここで各孔の亀裂の傾斜はトモグラフィー測線を断面とした時の傾斜角として表示してある。なお、図-4.3~4.6中には床盤で観察される亀裂と前節で選択した連続性のある亀裂群A、Bを同時に示してある。この図から、亀裂群AはKBG-3の深度3m付近の高角亀裂に、亀裂群BはKBG-6の深度4m以深の亀裂群に連続する可能性があることがわかる。

図-4.7に、以上の亀裂群と測定断面の関係を模式的に表したものを示す。

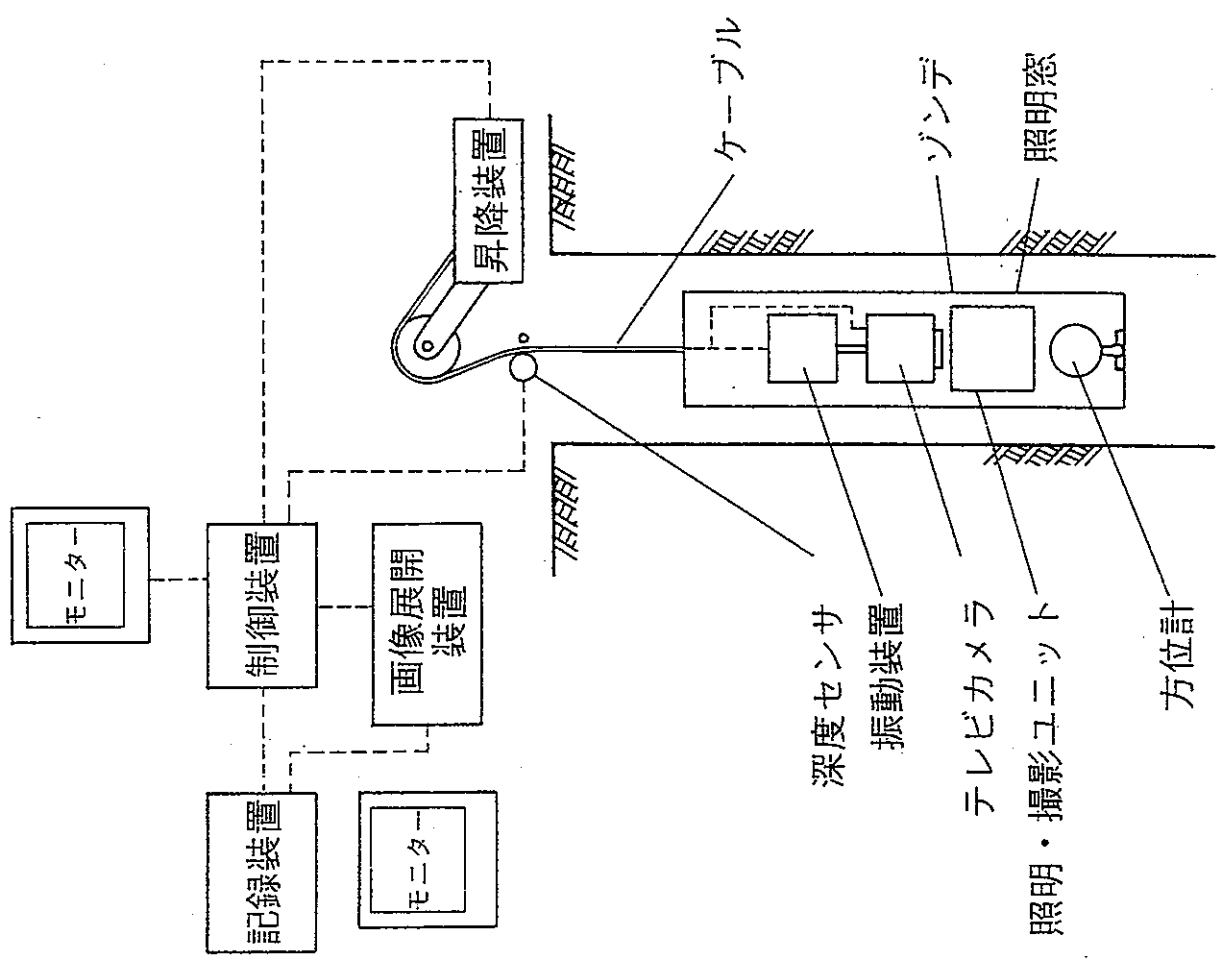


図-4.2 孔内観察方法

表-4.3 孔内観察使用機器

■現場システム (BIPシステム)

項目	仕様	
観察記録画像	孔壁の定方位全周生画像と連続 360° 展開画像を同時表示し, 記録する。連続 360° 展開画像には, 一定間隔で標尺を表示する。	
観測可能深度	最大 300 m	
観測可能口径	66 ~ 180 mm	
観測可能速度	標準 0 ~ 1.5cm (0 ~ 54m/h), 最大 2 cm/S (72m/h)	
	原画像 (全周生画像)	処理画像 (360° 展開画像)
画像記録方式	アナログVTR	デジタルMT / アナログVTR
画像の分解能	0.15mm (φ66mm)	0.5mm (φ66mm)
色調	カラー (アナログ)	カラー (RGB各8bit)
ハードコピー	可 (オプション)	可 (オプション)

■解析システム

項目	仕様
使用システム	X68000 (SHARP)
記録媒体	MT / HD / 光ディスク
アクセス時間	5... 以内
色調	カラー (RGB各6bit)
ハードコピー	ビデオプリンタまたは35mmフィルム
解析機能	画要素の走向傾斜, 開口幅の測定 / 一覧表表示

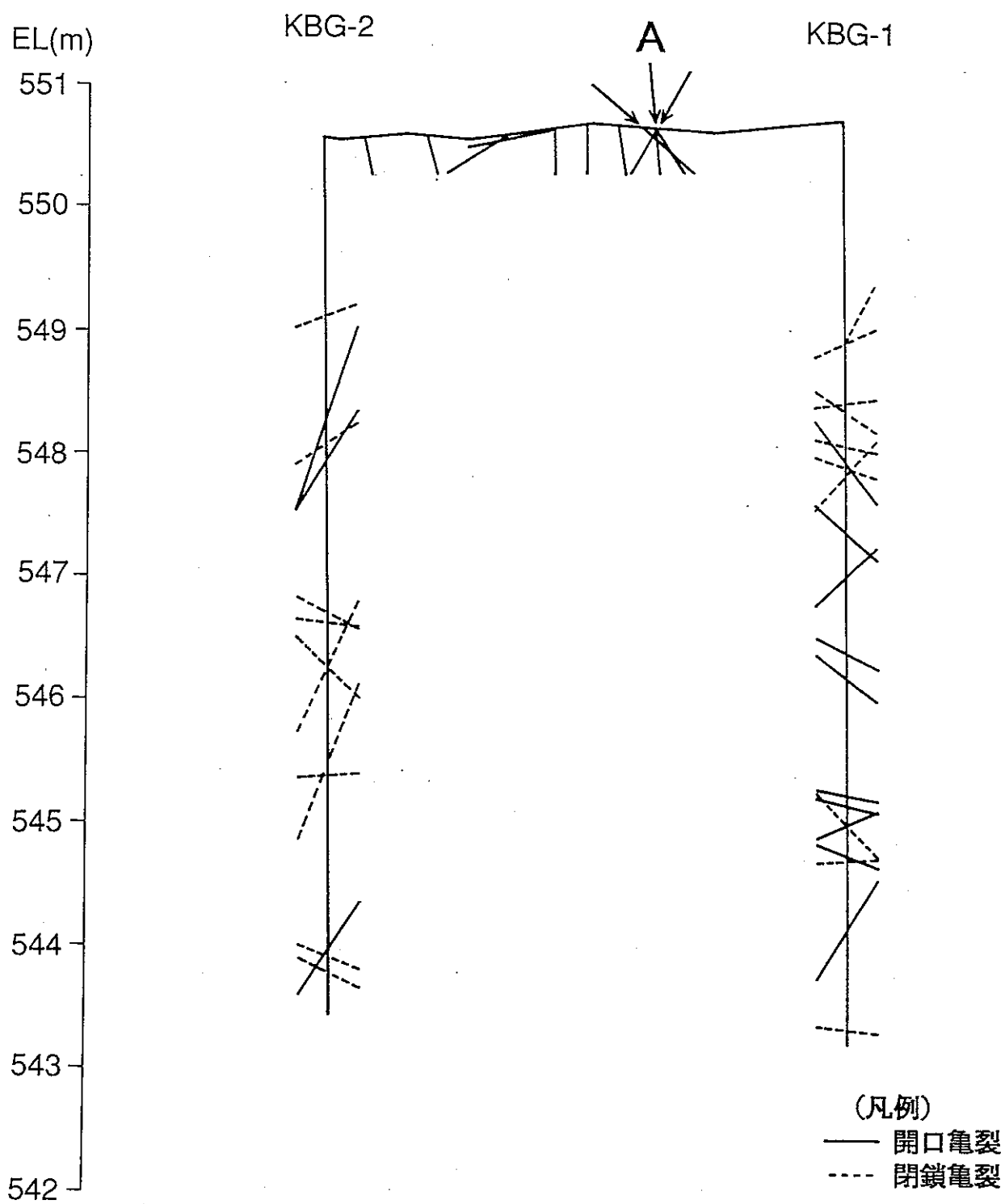


図-4.3 亀裂分布状況 (KBG-1~KBG-2)

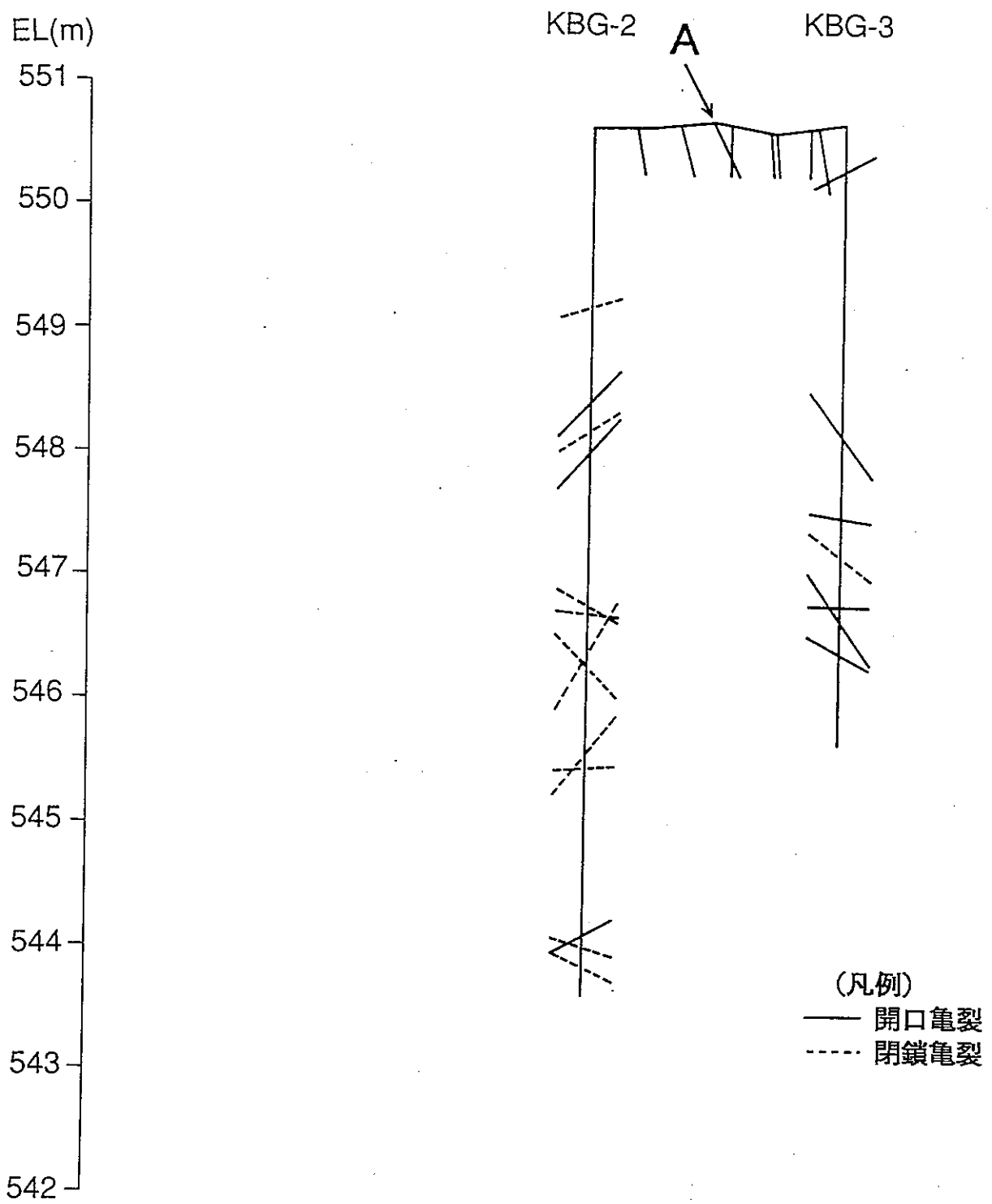


圖-4.4 龜裂分布狀況 (KBG-3~KBG-2)

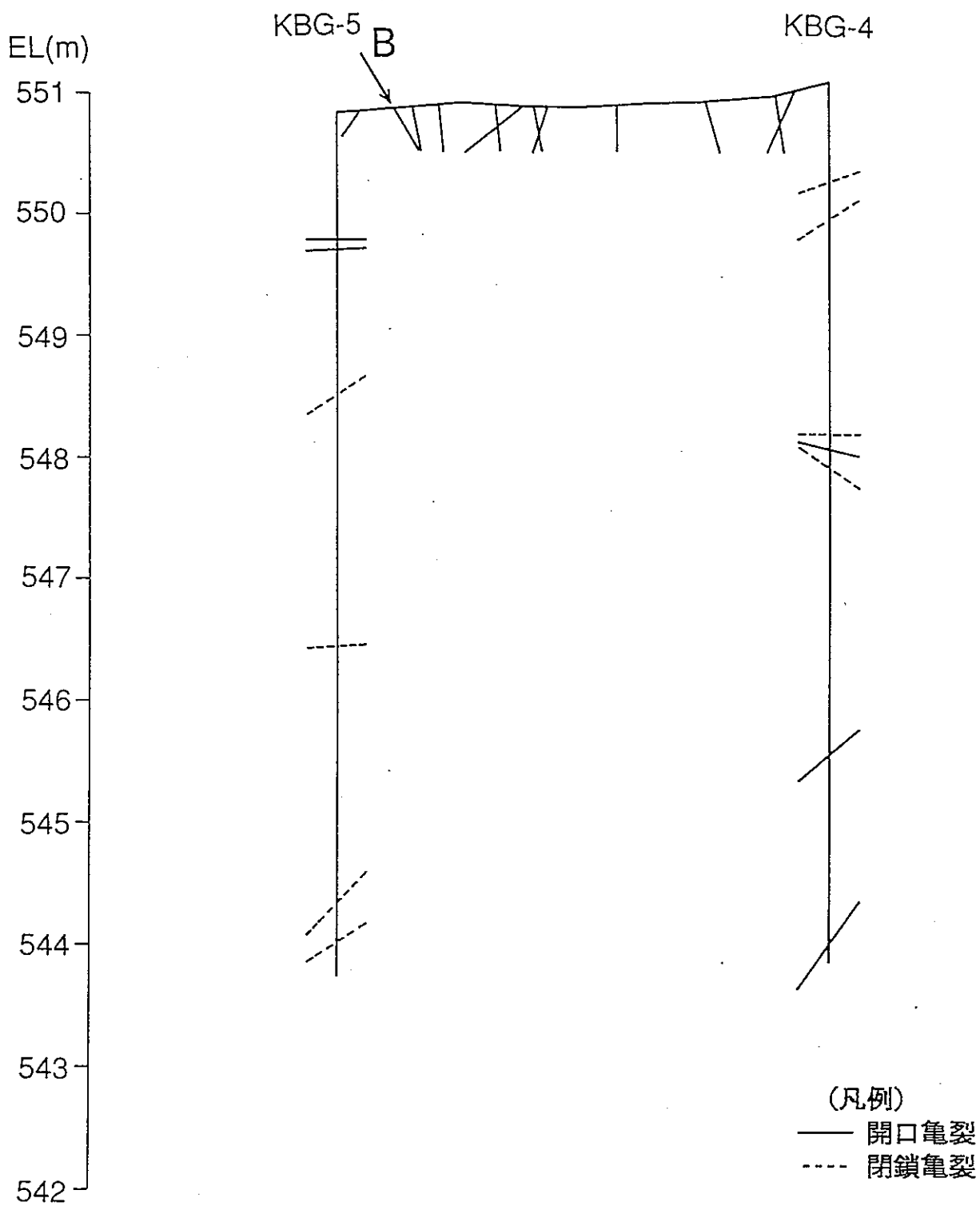


图-4.5 亀裂分布状况 (KBG-4~KBG-5)

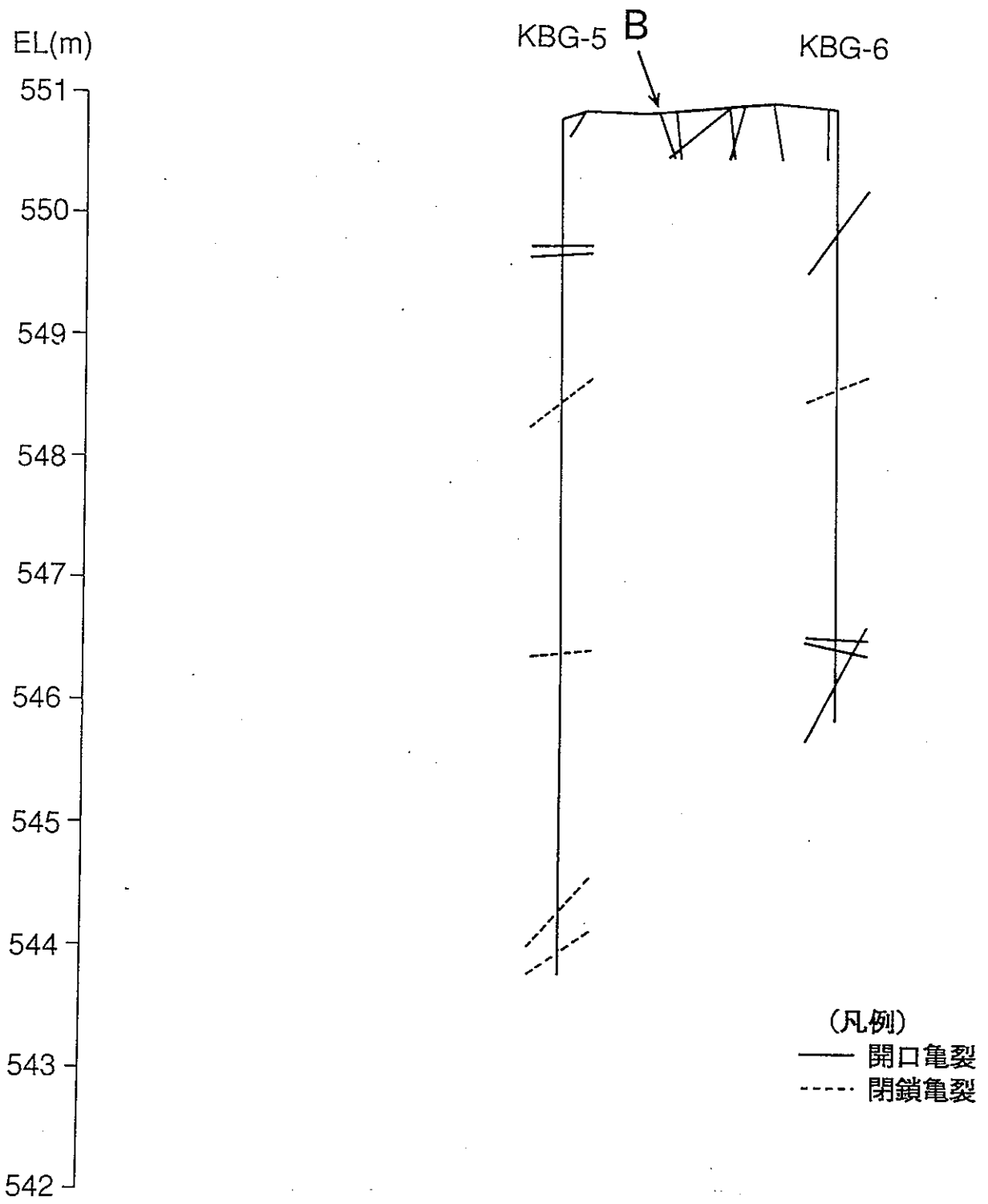


圖-4.6 龜裂分布狀況 (KBG-6~KBG-5)

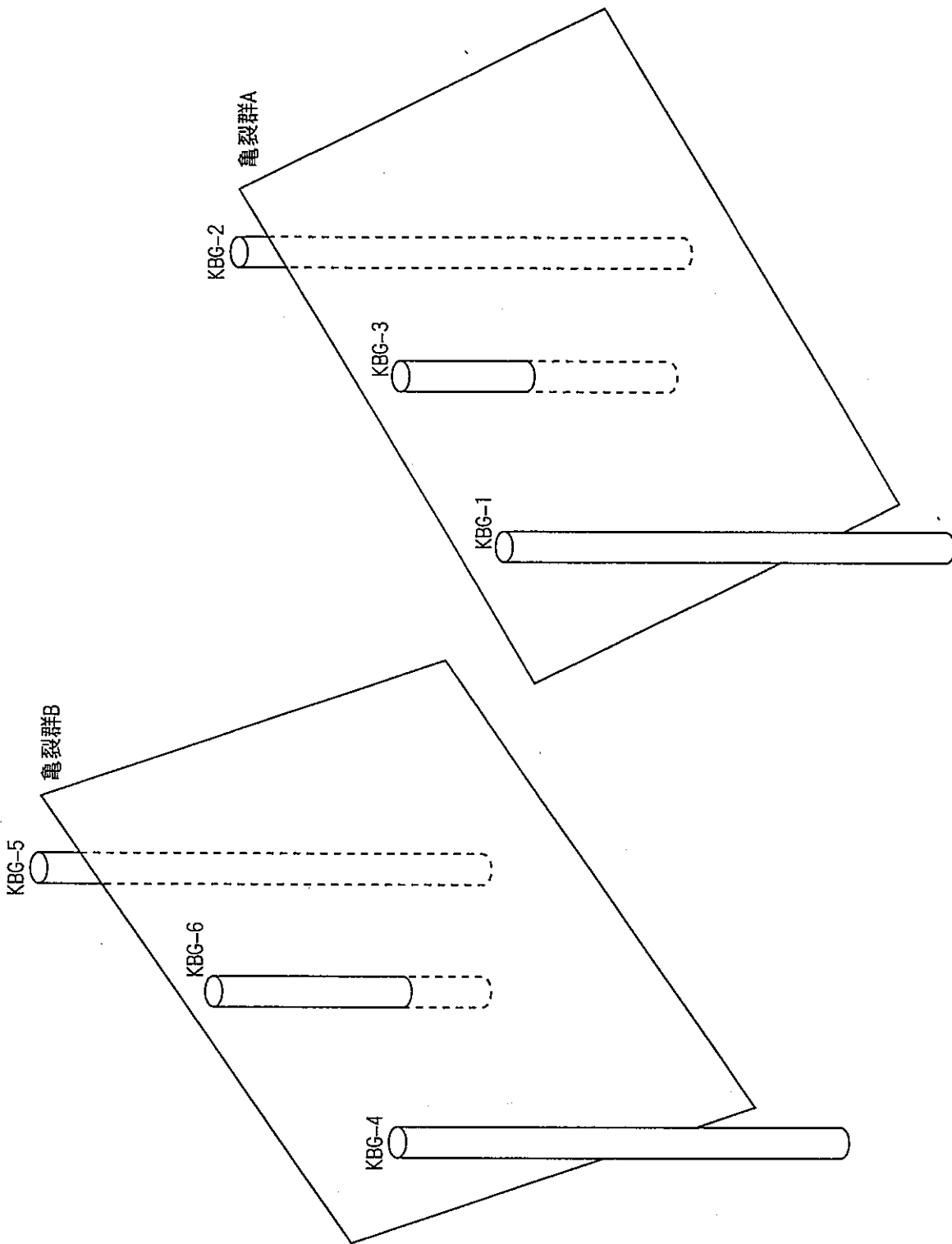


図-4.7 亀裂群 A・B の分布状況 (模式図)

4.2.3 透水試験

(1) 試験方法

透水試験は、シングルパッカー方式のルジオンテストとした。シングルパッカー方式を採用したのは、グラウト注入をシングルパッカー方式で行うため、グラウト注入方法と透水試験法とを整合性させる理由による。図-4.8に示すように、孔口から1m区間をパッカー(0.15MPaの空気圧)で閉塞し、0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1 MPaの5段階の昇圧及び降圧で注水した。透水試験の注水時間は各注入圧力で10分を基準とし、KBG-3, 6に関しては注水時間による透水係数の違いがないことを確認するために、30分及び60分とした場合も実施した。表-4.4に用いた機器の仕様を示す。また、透水係数の算定は、得られた圧力-注水量曲線から、建設省河川局開発課監修のルジオンテスト技術指針同解説に準拠した下式によって行った。但し、現地での作業時間の範囲では、1日の工程内で昇圧・降圧の両過程を実施することができなかった。注入時間10分による昇圧、降圧時の透水試験結果では大きな差が認められず、10分の昇圧の場合も30分、60分と同様の傾向を示したため、30分と60分の場合は、昇圧のみの試験とした。

$$k = \frac{\ln(L/r)}{2\pi LP} \cdot Q \quad \text{----- (4.1)}$$

Q : 注入量 (cm³/s)

k : 透水係数 (cm/s)

P : 注入圧水頭 (水頭換算値, cm)

L : 試験区間長 (cm)

r : 試験孔半径 (cm)

本試験では、セメントグラウトの施工手順³⁾に準拠し、透水試験に先立ち予め水押し試験を行い、試験対象である岩盤のおおまかな透水状況を把握した。水押し試験はグラウト注入の機器を利用し、注入圧0.1MPaでの流量を測定する方法で実施した。

(2) 試験結果

透水試験結果を表-4.5に示す。試験結果は、透水係数で $10^{-8} \sim 10^{-6}$ cm/s の値を示し、KBG-6で最大の 4.2×10^{-6} cm/s であった。

予め実施した水押し試験の結果は、注水圧0.1MPaの元で、KBG-1, 2, 4, 5が0.1 ℓ/min以下、KBG-3が 0.21 ℓ/min, KBG-6が 0.26 ℓ/minという注水量であった。この結果は、KBG-6で最大値を示し、後述する透水試験結果と同じ傾向であった。

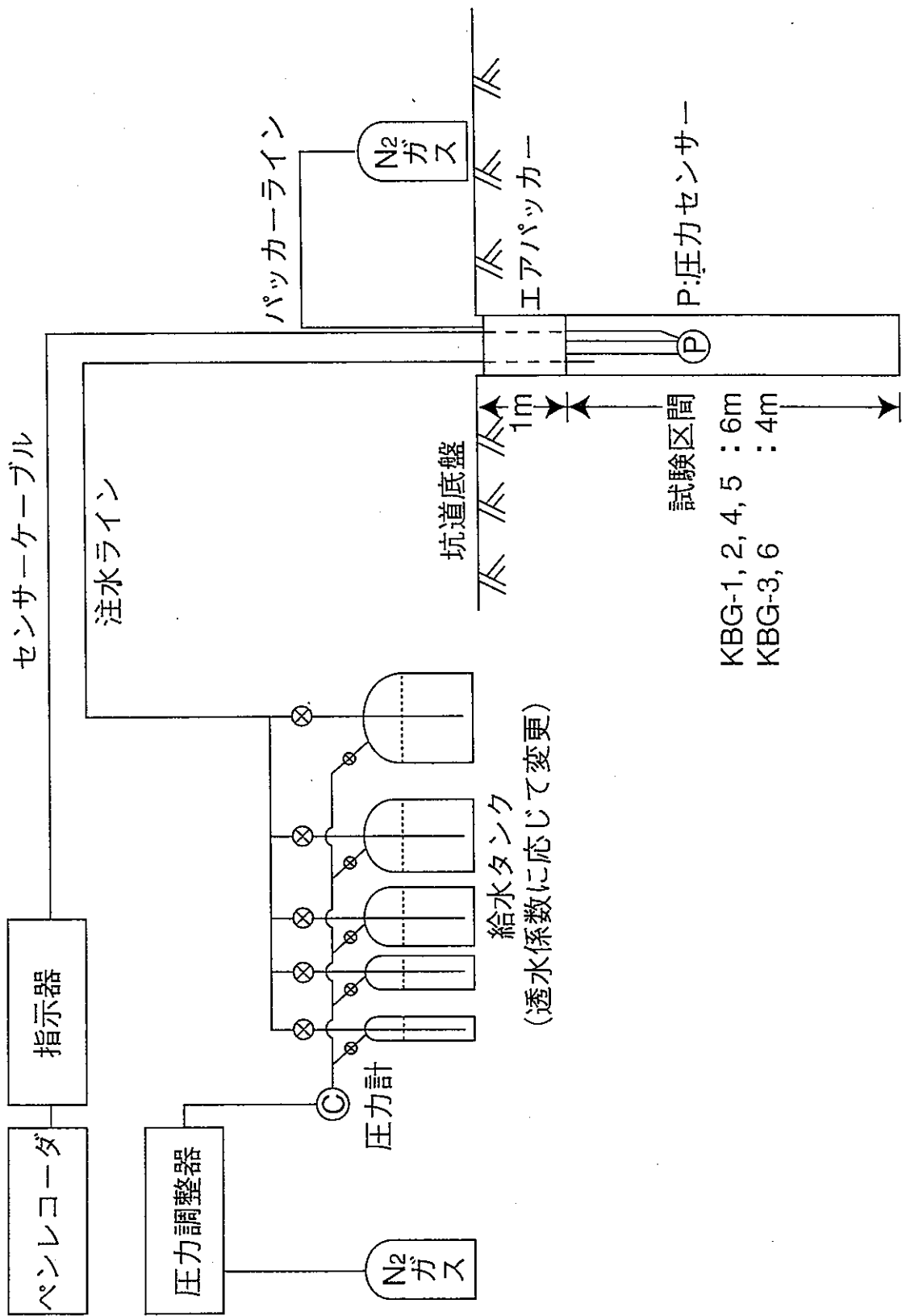


図-4.8 透水試験方法

表-4.4 透水試験用機器

	項 目	数量	備 考
孔 内 設 備	1. パッカー	1式	ℓ = 1.0m, シングルパッカー
	2. 圧力センサー	1台	0 ~ 1 MPa
	3. センサー室	1台	耐圧 2 MPa
	4. パッカー用エアホース	15m	外径 6 mm, 内径 4 mm, 常用圧 1.6 MPa
	5. 注水用ホース	15m	外径 6 mm, 内径 4 mm, 常用圧 1.6 MPa
	6. センサーケーブル	15m	3 芯
地 上 設 備	7. アキュムレータ	5台	100, 14, 7, 1.4, 0.7ℓ用各1台
	8. デジタル指示器	1台	圧力値
	9. ペンレコーダ	1台	3 ch
	10. プレッシャーゲージ	1台	1 MPa ブルドン管式
	11. レギュレータ	2台	N ₂ ガス用 パッカー用 1台, 注水用 1台

表-4.5 透水試験結果（グラウト注入前）一覧

孔名	最高圧力 (MPa)	透水係数 (cm/s)
KBG-1	0.1151	1.4×10^{-7}
KBG-2	0.1140	8.8×10^{-7}
KBG-3	0.1196	9.6×10^{-8}
KBG-4	0.1114	9.8×10^{-8}
KBG-5	0.1138	4.5×10^{-7}
KBG-6	0.1131	4.2×10^{-6}

4.2.4 トモグラフィー試験

現在のところ、実用化されているトモグラフィー試験には、弾性波、電磁波、比抵抗の3種類がある。一般に、電磁波速度は岩種、亀裂分布（飽和岩盤では含水量に対応）に影響され^{4)・5)}、比抵抗は含水率、間隙水の電気伝導度に影響される⁶⁾ことがわかっている。粘土系グラウトは液体であり、その電気伝導度は岩盤内の地下水の電気伝導度より大きいため、グラウトの注入により亀裂内の地下水が粘土グラウトに置き換わることにより岩盤内の比誘電率が増加し、比抵抗値が低下することが期待できる。この変化をグラウトの注入前後に電磁波及び比抵抗トモグラフィーを実施することにより把握し、粘土グラウトの浸透範囲を推定することを目的とした。

(1) 試験方法

図－4.9, 4.10 に電磁波トモグラフィー及び比抵抗トモグラフィーの測定方法の概要を示す。また、表－4.6には2つのトモグラフィー試験に用いた機器を示す。

・電磁波トモグラフィー

岩盤中を伝播する電磁波の速度は、光速(=30cm/ns)をその岩盤の比誘電率の根で除したものである。岩盤の比誘電率は、岩盤の種類、間隙率、含水率等によって変化し、特に含水率に大きく依存する。含水率が大きくなると比誘電率は大きくなり、電磁波速度は小さくなる。つまり、岩盤中に破碎帯等が存在する場合、破碎帯は含水率が高いため、その領域は低速度帯となる。電磁波トモグラフィーはこのような岩盤の状態を画像化する手法である。

電磁波トモグラフィーは、波の波長が短かく分解能が高いこと、使用するボーリング孔に何らの破壊を及ぼさないこと、さらに、非接触の探査のため（例えば、弾性波トモグラフィーでは受震器、発震器をボーリング孔に接触させる必要がある）、効率の良い測定ができるといった特長を持つ。金属製のケーシングや支保のあるところでは、電磁波が遮断され、透過できないといった問題、比抵抗の低い岩盤では透過力が落ちてしまうといった問題はあるものの、比抵抗の高い新鮮な岩盤内の亀裂、破碎帯の詳細な探査に最適な手法であると考えられる。本試験では、一つの試験孔に対して、透水試験－BTV観察－トモグラフィー－グラウト注入－BTV観察－トモグラフィー－透水試験と7つの工程が行われるため、試験孔は健全な状態で維持される必要があり、電磁波トモグラフィーはこの点でも適していると考えられる。

トモグラフィー解析に使用するデータは、2本のボーリング孔を用いて電磁波を送・受信し、2孔間の地質状況を把握する透過法で取得した。透過法では送信された電磁波は岩盤中を通過する際に透過する岩盤状況により遅延・減衰されて受信されるので、伝播速度と振幅減衰の両方のトモグラフィー解析をすることが出来る。しかし、

振幅減衰のデータは、岩盤の基質部の間隙率、亀裂と波線の交差角、亀裂幅、狭在物の種類等によって複雑に影響を受けることから定性的な解釈にとどめざるを得ないこともあり、本試験では速度分布による解析のみを実施した。透過法の測線は、亀裂群AではKBG-1~2間及びKBG-2~3間、亀裂群BではKBG-4~5間及びKBG-5~6間とした。測定は、図-4.11に示す50cm間隔の送受信配置で行った。また、今回の測定における電磁波の周波数は高分解能が期待できる150MHzとした。

トモグラフィー解析では、初めにBPT法(Back Projection Technique, 逆投影法)により初期値を計算し、それを基にSIRT法(Simultaneous Iterative Reconstructive Technique, 同時反復法)により繰り返し計算を行い、収束誤差を小さくさせた。速度によるトモグラフィーでは、送信点と受信点の波線を直線とし、伝播時間を次式により計算することができると仮定した。

$$T = 1/v \times L = S \times L \text{ ----- (4.2)}$$

ここで、T; 伝播時間, v; 速度, L; 波線の長さ, S; スローネス

解析は領域を50cm四方のセルに分割して行ったが、出力はその一つのセルをさらに3×3の9分割によるスムージング処理をして表示している。

・比抵抗トモグラフィー

比抵抗は、その物質の電流の流れにくさを示す指標であり、一般的に花崗岩は数千~数万Ω・m、地下水は100Ω・m程度である。また、地層比抵抗係数(地層の比抵抗を地下水の比抵抗で除したものは、間隙率の関数で表わすことができる⁷⁾)。比抵抗トモグラフィーは、このような地下構造物の持つ電氣的性質の分布を画像化する手法である。

比抵抗トモグラフィーは電流を媒体としていることから、探査可能距離が10~20m程度である電磁波トモグラフィーに対し、分解能では劣るものの探査可能距離が100mと大きいという利点を持っている。

トモグラフィー解析に用いるデータは電流・電位電極の一方を遠電極に取る2極法電極配置で取得した。比抵抗トモグラフィーの測線はKBG-1~2間及びKBG-4~5間とした(図-4.12)。電流・電位電極配置は図-4.34に示すように50cm間隔とした。遠電極は試験坑道から既存坑道沿いに電流電極は約160m、電位電極は約400m離れた位置に接地した。また、測定時の電流は1mAであった。

比抵抗トモグラフィーの解析方法では、まず、順解析として初期比抵抗分布モデルから有限要素法を用いて、電位場を解析解として求めた。次に、順解析により求めた解析解と測定値の残差から収束の程度を判定し、残差を振り分けることによりモデルを再構築した。この時、解析領域をいくつかのブロックに分割し、そのブロックご

とに感度分布を計算し，この感度分布により重みづけをしたSIRT法を用いている。これを繰り返し行い残差を減らしていくことにより，実際の比抵抗分布に近いモデルを求めた。今回解析に用いたボーリング孔周辺のブロックを図－ 4. 34に示す。

(2) 試験結果

注入前に電磁波トモグラフィー4断面について，比抵抗トモグラフィー2断面について実施した。

試験結果については，4. 4. 3にてグラウト注入前後の解析結果として示す。

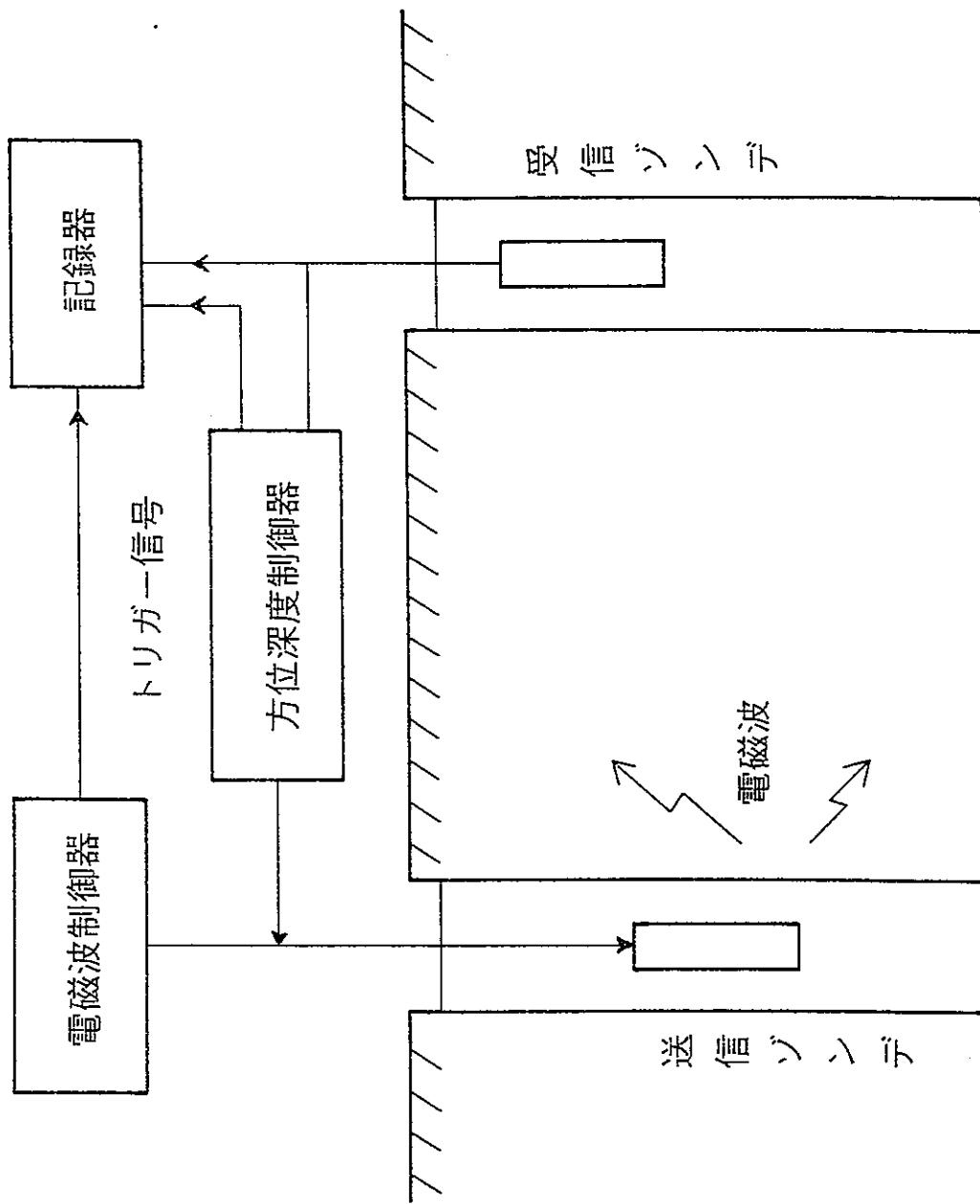


図-4.9 電磁波トモグラフィー測定方法

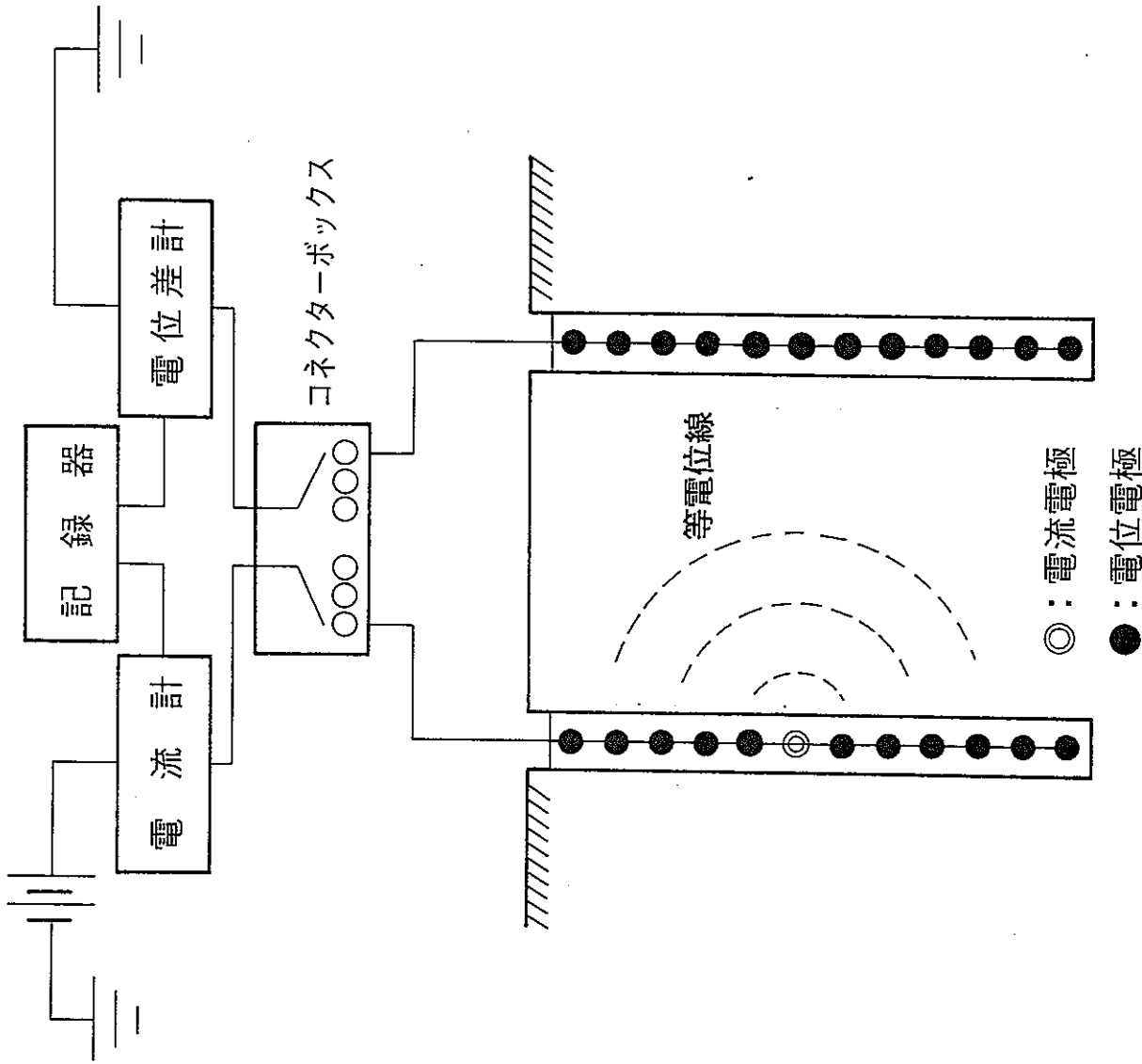


図-4.10 比抵抗トモグラフィー測定方法

表- 4.6 (1) トモグラフィー試験使用機器

トモグラフィー測定 (電磁波)

項 目	仕 様
孔 中 ア ン テ ナ	アンテナ：150MHz 透過型 送信パルス及び送信出力： アンテナ 送信パルス 送信出力 150MHz 3nS 80Vpeak 80MHz 6nS 100Vpeak 繰り返し周波数：100KHz サンプルング点数：4000点 実 時 間：200nS
ゾ ン デ	材 質：主要部SUS304 寸 法：φ55×1700mm 耐水圧：5MPa 旋 回：電動リモコン エンドレス回転 方位計：マグネットコンパス方式
コ ン ト ロ ー ラ ー	深 度 表 示 計：5桁 深度表示設定ダイヤル：5桁 旋 回 角 度 表 示 計：3桁 旋回角度メモダイヤル：3桁 電源入力コネクター：3P AC100V 50/60Hz ブ レ ー カ ー：サーキットプロテクター リークブレーカー ゾンデ用コネクター：24P 深度入力コネクター：7P デ ー タ 出 力 端 子：50P 電磁波出力コネクター：10Pミニ 電磁波信号出力端子：BNCプラグ
ウ ィ ン チ	使 用 電 源：AC100V 50/60Hz モ ー タ 一 定 格：DC100V/120W

表- 4.6 (2) トモグラフィー試験使用機器

トモグラフィー測定 (比抵抗)

項 目	仕 様
測定器 (McOHM-21)	<p>送信部 最大電圧 200V 最大電流 1~200mA</p> <p>受信部 入力インピーダンス 5MΩ以上 最小電圧感度 6μV (14bit A/D変換器使用)</p> <p>スキャナ部 入力ライン数 3ライン 最大接続電極数 250点/ライン (750点) 電極配置 プログラムによる自動設定</p> <p>制御部: コントロールCPU 16ビット (MC68000) 演算処理プロセッサ 16ビット (MC68881) 収録可能最大測定回数 3000測定 収録可能最大データ数 9000データ 表示画面 7インチ高解像度カラーCRT プリンタ 112mm幅サーマルプリンタ フロッピーディスク 3.5インチ2HD デジタルインターフェイス IEEE-488 (GP-IB) RS-2323C</p> <p>電源部 電源電圧 DS12V 外形寸法 (W)470×(H)360×(D)370mm</p>
スキャナ	<p>コントロール部 コントロール方式 SD (送信), RD (受信) ラインを使用した双方向シリアルデータ転送方式</p> <p>電極接続部 最大電極数 32極 電極用コネクタ 32極端子及び16Pコネクタ 切換方式 ラッチングリレーによる接点切換方式 電源 DC12V (±10%以内) 外形寸法 280 (W) × 220 (D) × 210 (H) mm 重量 8kg (バッテリーパック含む)</p>
電極用ケーブル	25~50cm間隔

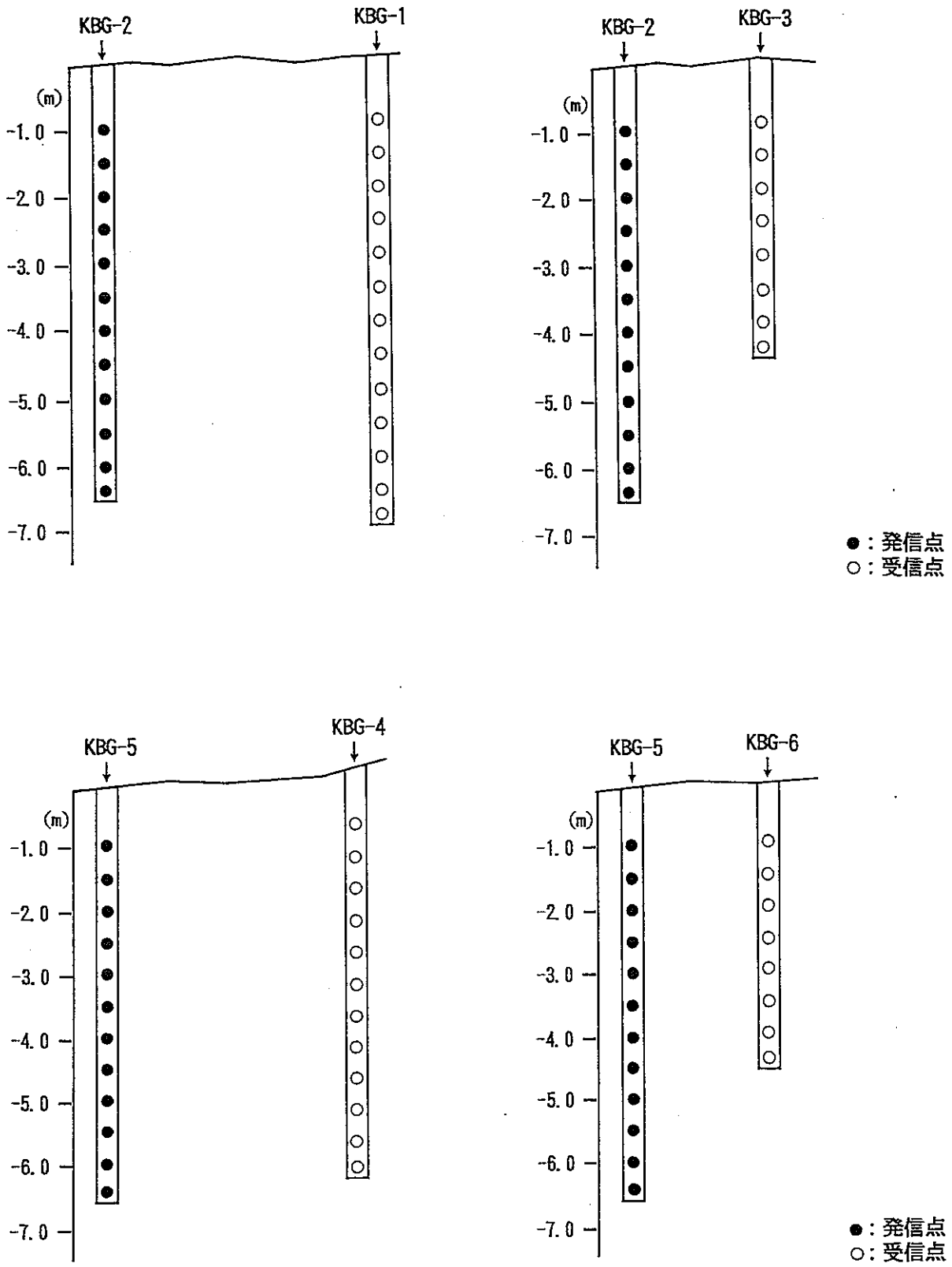
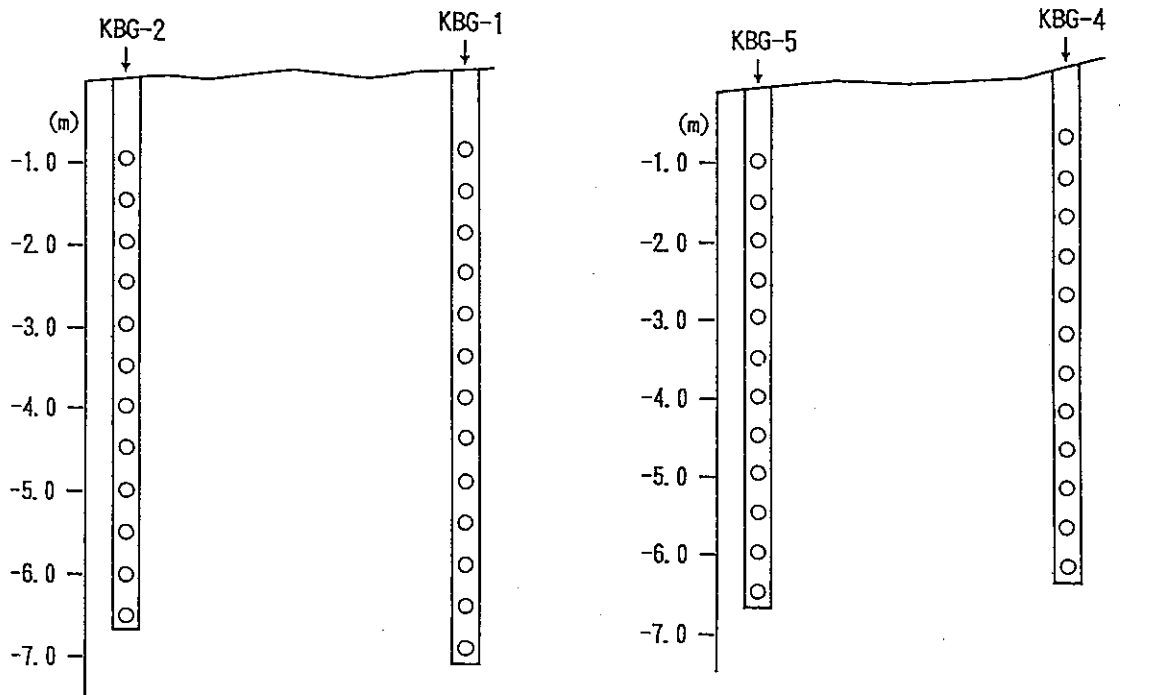


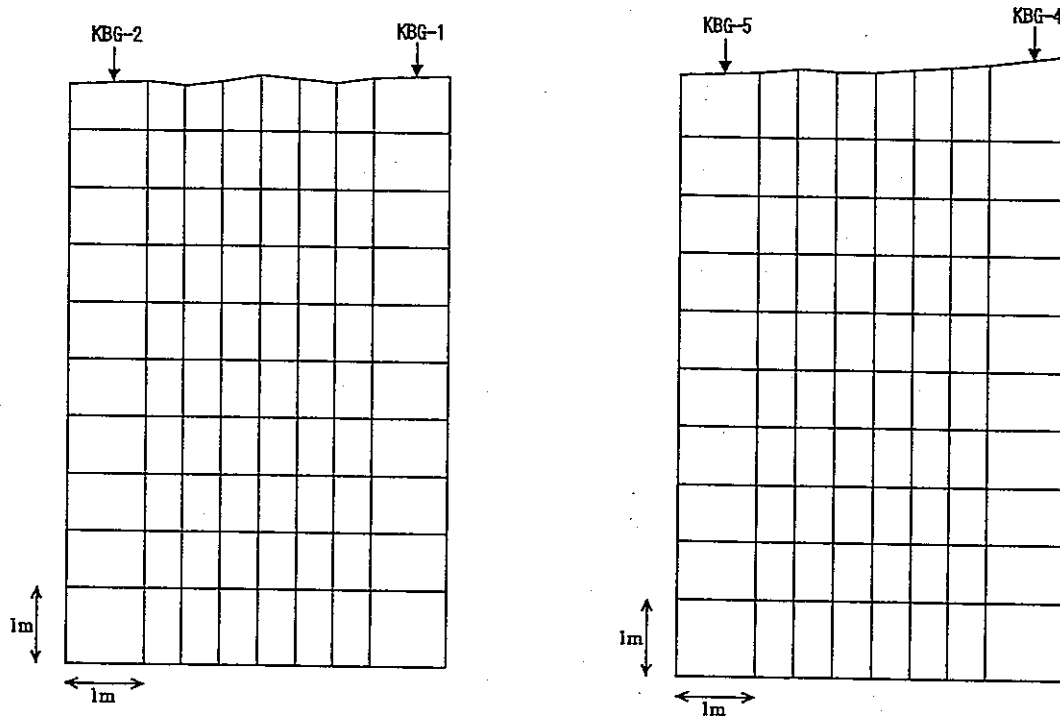
図-4.11 電磁波トモグラフィー測定配置図



○: 電流、電位電極

○: 電流、電位電極

測定配置図



解析ブロック図

図-4.12 比抵抗トモグラフィー測定配置図及び解析ブロック図

4.3 グラウト注入試験

注入濃度・圧力をパラメータとしたグラウト注入を実施し、各段階における施工条件（注入圧、濃度）とグラウトの安定性、止水効果の関係の把握を実施した。図－ 4.13に注入方法の概略を、表－ 4.7に使用機器を示す。なお、今回の注入はセメントグラウトの施工手順に準拠して実施している。

また、グラウト注入による効果を把握するため計測坑道内で滴水量を測定した。

グラウト試験坑道は、試験区域の掘削・拡幅以後、数本の亀裂に対して天盤からの滴水が観察された。注入したグラウトは注入孔から亀裂内をネットワーク状に複雑に交わりながら浸透していくことも考えられ、グラウトの注入によって著しく透水性が変化した領域が形成された場合、本来流れていた地下水が迂回し、別の亀裂から湧水が生じる可能性がある。

このような現象を観察するため、グラウト試験区域における滴水量を計測した。計測方法は図－ 4.14に示すように天盤からの湧水はシートを張り、計測瓶により単位時間当たりの滴水量を計測した。

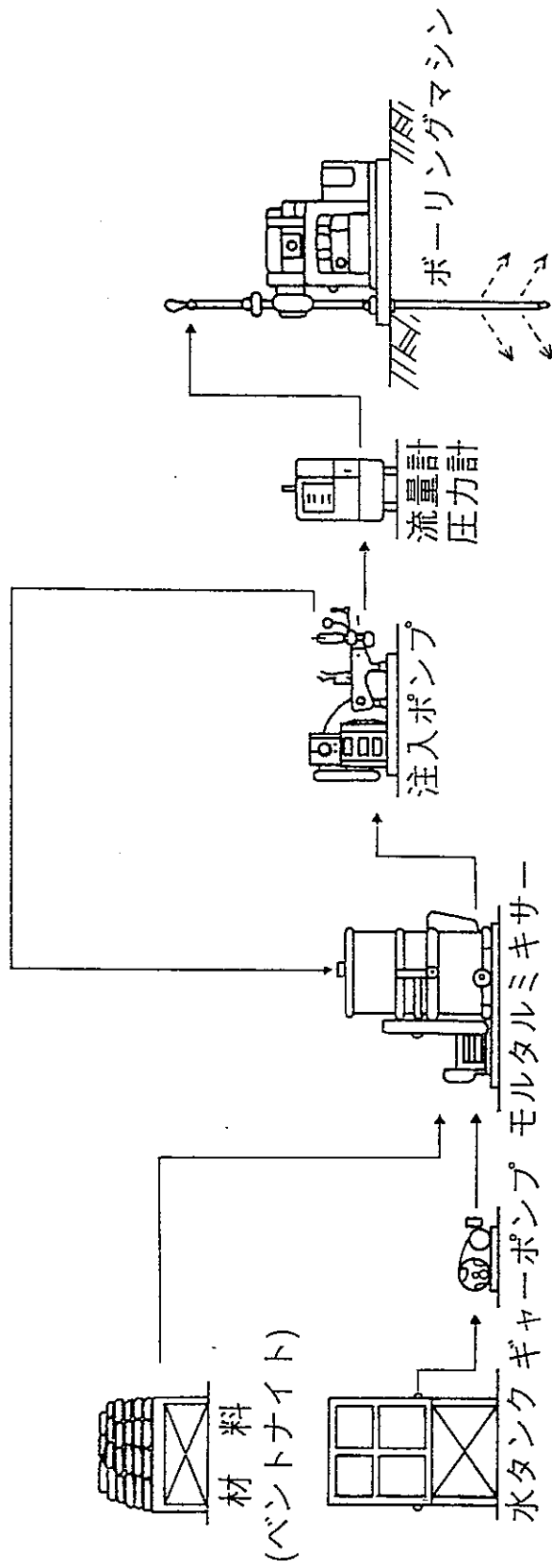


図-4.13 グラウト注入方法

表-4.7 注入用機器一覧

機 械 名	形式・ メーカー	能 力 ・ 仕 様	重 量 (kg)	動 力 (kw)	台 数
ミキサー	MS-400 東邦地下工機	攪拌容量 420ℓ×2槽	610	7.5	1
グラウト ポンプ	DP-5 ヤマト ボーリング	吐出量 0~60ℓ/分 吐出圧力 0~5MPa	204	3.7	2
グラウト ポンプ	MG-10 鉦研工業	吐出量 0~105ℓ/分 吐出圧力 0~3MPa	280	7.5	1
電磁流量計	CMS-100 東都電気	圧力流量自記記録計 流量 60ℓ/分 圧力 3MPa	60	1.0	1

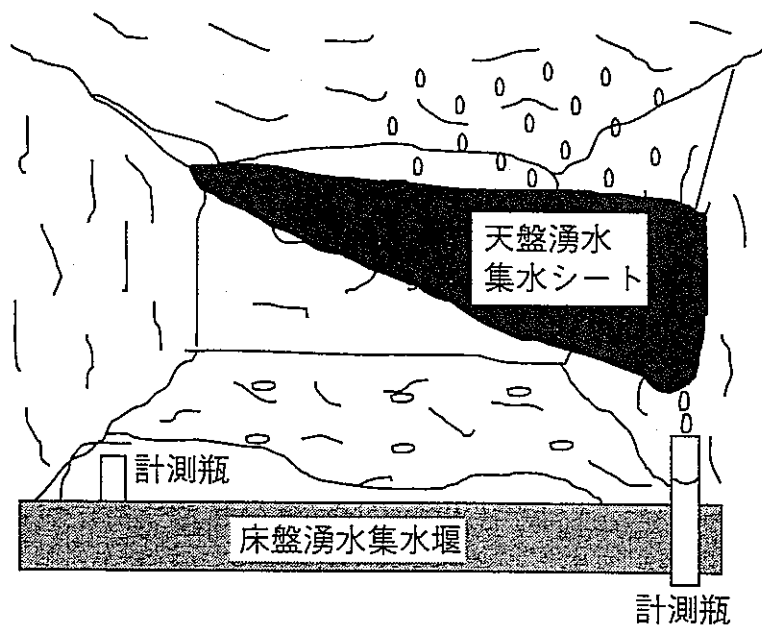


図-4.14 湧水量測定模式図

4.3.1 注入材料

本試験で用いた試料は、クニゲルVAである。原位置におけるグラウト試験では、本試験のように連続性のある亀裂を対象とした場合でも、実際には岩盤内において複数の亀裂が複雑に交わっており、注入されたグラウト材が亀裂内を広範囲に移動した場合、グラウトの注入量は数百リットルという多量のものとなることが考えられる。また、グラウトの注入をより広範囲に及ぼせる手段として、試験に供する材料の粒径を出来るだけ細かいものにすることが有効と考えられる。さらに、グラウトがシーリングシステムを構成する一要素であることから、緩衝材の研究として動燃殿がこれまで標準試験試料として用いてきたクニゲルVI⁸⁾の物理・化学特性と著しく性質の異なるものが有用であると考えられる。以上のことから、本試験では以下の条件を満たすものを試験試料として選択した。

1. 標準試験試料であるクニゲルVIと組成が類似のもの。
2. 粒度が出来るかぎり細かいもの。
3. 多量に使用するため、確保および補充が容易であること。

クニゲルVAは、表－ 4.8に示すように、動燃殿が標準試験試料として用いてきたクニゲルVIと化学組成はほぼ同様である。粒度分布は図－ 4.15に示すようになっており、クニゲルVIよりも最大粒径でほぼ50mesh相当小さく、市販品であることから材料の確保も容易である。これよりクニゲルVAは、上記3条件を全て満たすものであり、本試験の試料として適切であると判断した。

次に、クニゲルVAのベントナイトスラリーの粘性を測定した結果を表－ 4.9, 4.10に示す。今回のベントナイトスラリーの粘性は非常に小さいことが予想されたため、粘性の測定にはオストワルド粘度計（柴田科学器械鋳業(株)、型式2630）を用いた。

今回の試験では、ベントナイトスラリーの濃度として、溶解した水の重量に対するベントナイト重量の比 B/W を用いる。

表 - 4.8 グラウト材料の特性

1. 品質特性

	V A	V 1
真比重	2.6	2.6
粒度	300mesh96%以上通過	250mesh90%以上通過
見掛比重	0.50~0.65	0.60~0.75
pH	9.0~10.5	9.0~10.5
水分	10%以下	10%以下
膨潤力	20ml/2g以上(JBAS-104)	16ml/2g以上(JBAS-104)

*6%分散液の比重 約1.035

7%分散液の比重 約1.040

2. 代表的化学分析値

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	tg・Loss
V A	68.2	15.9	2.0	1.0	1.6	1.9	0.2	2.1
V 1	70.2	14.2	2.5	2.0	2.2	2.5	0.2	4.6

(単位 %)

3. 重金属分析値

	アルキル水銀	総水銀	カドミウム	鉛	有機リン	六価クロム	ヒ素	シアン
V A	N・D	N・D	N・D	0.24	N・D	N・D	0.01	N・D
V 1	N・D	N・D	N・D	0.14	N・D	N・D	0.01	N・D

N・D、検出下限値未満

(単位ppm)

粒径加積曲線

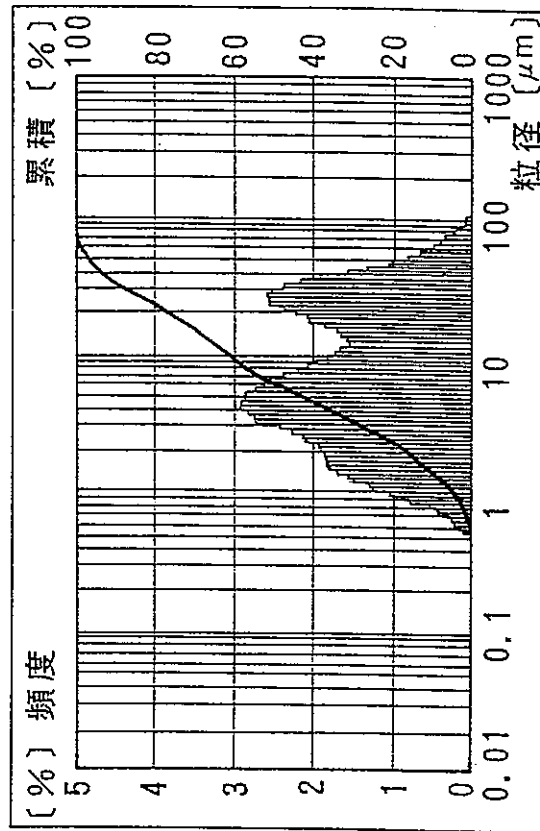


図-4.15 クニゲルVAの粒径加積曲線

表-4.9 注入溶液の粘性 (KBG-3)

B/W (wt%)	オストワルト粘度 (秒)
0.2	5.2
0.5	5.7
1.0	5.8
2.0	7.6
4.0	12.6
8.0	測定不能

表-4.10 注入溶液の粘性 (KBG-6)

B/W (wt%)	オストワルト粘度 (秒)
0.2	5.0
0.5	5.1
1.0	5.9
2.0	7.1
4.0	13.8
8.0	測定不能

4.3.2 グラウト注入

(1) 注入方法

グラウト注入は、注入孔KBG-3, 6で実施した透水試験の結果(4.2.3参照)を考慮して、段階的に注入濃度を上昇させる静的注入法を採用した。滴水のある亀裂である亀裂群Aでは、KBG-3孔の注入圧を1.0MPaと固定し、注入濃度を0.2wt%から0.5 1.0, 2.0 4.0, 8.0wt%と段階的に上昇させた。注入濃度を次の段階へ変える時は、グラウト注入装置のパイプ内のグラウトが次の濃度に置き換わるまで循環させ、濃度が一定になった後、次の注入段階へ移行した。一方、滴水のない亀裂である亀裂群Bでは、亀裂群Aと同様、KBG-6孔の注入圧を1.0MPaで、注入濃度を0.2wt%から0.5 1.0, 2.0 4.0, 8.0wt%と段階的に上昇させる場合を基本とし、一部注入濃度0.2wt%及び0.5wt%の段階で、湧入圧を1.5MPaとした。

グラウト注入における注入濃度の上昇に当たっては、グラウトの時間当たりの注入量をモニタリングし、注入効率が低下した段階を注入終了の目安とした。しかし、本試験は坑道内部での原位置試験であり、試験作業時間に制限があったため、連続注入が行なえず一段階の濃度をやむをえず、2日間にわたって行った場合もある。

(2) 注入結果

グラウト注入試験の結果は、表-4.11(KBG-3) 4.12(KBG-6)に示すとおりである。KBG-3で、注入濃度0.2wt%のものが2回行われているのは、前述したように坑道内部での原位置試験であることから作業時間に制限があり、2日間に渡って行ったものをそれぞれ項目を分けたものである。このことは、KBG-6での注入濃度0.2wt%と8.0wt%の場合にも当てはまる。注入結果例を図-4.16に示す。

表-4.11と表-4.12の注入結果を比較すればわかるように、KBG-3は、KBG-6に比較して総注入時間が同程度であるにもかかわらずベントナイト溶液の総注入量は1/2以下、総注入ベントナイト量は20%程度となっており、KBG-3孔周辺の方がより難透水性岩盤であったことがわかる。この結果は、透水試験結果とも一致している。

KBG-6での注入濃度0.2wt%と0.5wt%の時、注入圧力を1.5MPaに上昇させたが、それにより注入ベントナイト量が大きく増加するといった傾向は見られず、1.5MPaでは水圧破碎による新たな水みちの発生を招くことなくグラウト注入が可能と考えられる。

注入濃度0.2wt%は、最初の注入圧力であることから注入状況を確認しながら圧力を徐々に上昇させた。圧力が注入圧力である1.0MPaに達した後は、設定圧を保つようにした。また、図-4.17はKBG-3注入時のグラウト坑道底盤へのリーク状況を示したものであるが、リークは平面的にほとんど認められなかった。

KBG-6においても、注入濃度0.2wt%は、KBG-3の場合と同様最初の注入であることから注入状況を確認しながら圧力を徐々に上昇させた。圧力が注入圧力である1.0MPa

に達した後は、設定圧を保つようにした。また、図－ 4.18は、KBG-6 注入時のグラウト坑道底盤へのリーク状況を示したものである。KBG-3 注入時と異なり、KBG-5, 6 さらにはKBG-1 近くまでリークの範囲が及んでいることがわかる。また、リークが生じた注入濃度は0.2 ～ 4wt%で、幅広い注入濃度でリークが見られた。このひとつの要因として、試験坑道床盤が奥へ行くに従い若干上昇していることが考えられる。KBG-6における注入では、パッカーが孔口より1 mの部分までかかっているが、そのすぐ下の地点のレベルでは、手前の方は床盤のすぐ下にあたっており、水平方向に拡がったグラウトがにじみ出てきたと考えられる。

(3) 注入濃度と注入速度、注入量の関係

平均注入速度と注入濃度の関係を示したものが図－ 4.19, 4.20である。平均注入速度とは、ベントナイト溶液の総注入量を注入時間で割ったものである。この図から、濃度を上げると注入速度が下がり注入しにくくなることがわかる。その傾向はKBG-3よりもKBG-6の方が大きい。また、KBG-3, 6共に8.0wt%のグラウト注入時には、注入速度がかなり小さくなり、ほとんど注入できない状態になっていることがわかる。

図－ 4.21, 4.22は単位注入ベントナイト量と注入濃度との関係を示したものである。単位注入ベントナイト量とは、注入したベントナイト溶液中のベントナイト重量を注入区間の長さで割り、さらに単位時間当たりにするため注入時間で割ったものである。この図から、注入速度の場合とは逆に、ベントナイト濃度の上昇に伴い単位注入ベントナイト量は大きくなることがわかる。本試験範囲内では、注入濃度0.2wt%から4.0wt%までは濃度に対してほぼ線形的に単位注入ベントナイト量が増加し、KBG-3, 6共に8.0wt%のグラウト注入時には増加しなくなる傾向を示した。つまり、亀裂部A, Bという2つの異なる亀裂群に対して行ったグラウトの注入試験が、単位注入ベントナイト量という指標で整理すると、傾向の変化があらわれる点が注入濃度4.0wt%という同じ値をとるという結果となった。

表-4.11 注 入 結 果

KBG-3

注 入 日 (年 月 日)	注 入 圧 力 (MPa)	注 入 配 合 (B/W, wt%)	注 入 ベ ン ト ナ イ ト 量 (リットル)	注 入 ベ ン ナ イ ト 量 (kgf)	注 入 時 間 (分)
95.07.21	1.0	0.2	47.0	0.094	227
95.07.24	1.0	0.2	30.0	0.060	128
〃	1.0	0.5	67.0	0.335	300
95.07.25	1.0	1.0	25.0	0.250	131
〃	1.0	2.0	22.0	0.440	121
〃	1.0	4.0	28.0	1.120	174
95.07.26	1.0	8.0	15.0	1.200	159
計					1,240
			234.0	3.499	

表一 4.12 注入結果

KBG-6

注 入 日 (年 月 日)	注 入 圧 力 (MPa)	注 入 配 合 (B/W,wt%)	注 入 ベ ン ト ナ イ ト 量 (リットル)	注 入 ナ イ ト 量 (kgf)	注 入 時 間 (分)
95.07.18	1.0	0.2	229.0	0.458	390
95.07.19	1.5	0.2	102.0	0.204	269
〃	1.5	0.5	67.0	0.335	161
95.07.20	1.0	1.0	40.0	0.400	122
〃	1.0	2.0	40.0	0.800	125
〃	1.0	4.0	55.0	2.200	212
95.07.21	1.0	8.0	6.0	0.480	45
〃	1.0	8.0	10.0	0.800	88
計					1,324
			549.0	5.677	

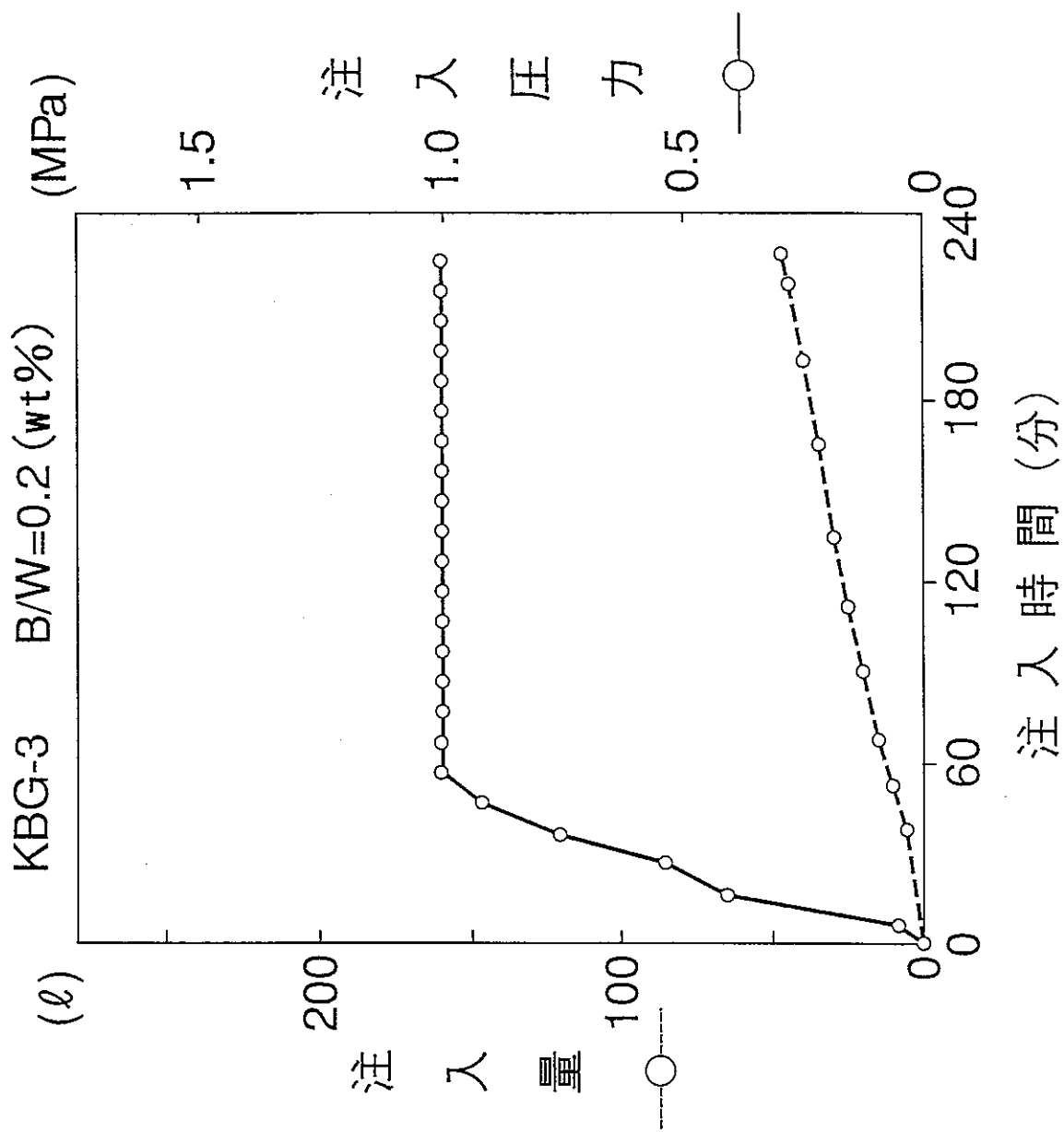


図-4.16 KBG-3 注入結果例 (B/W=0.2wt%)

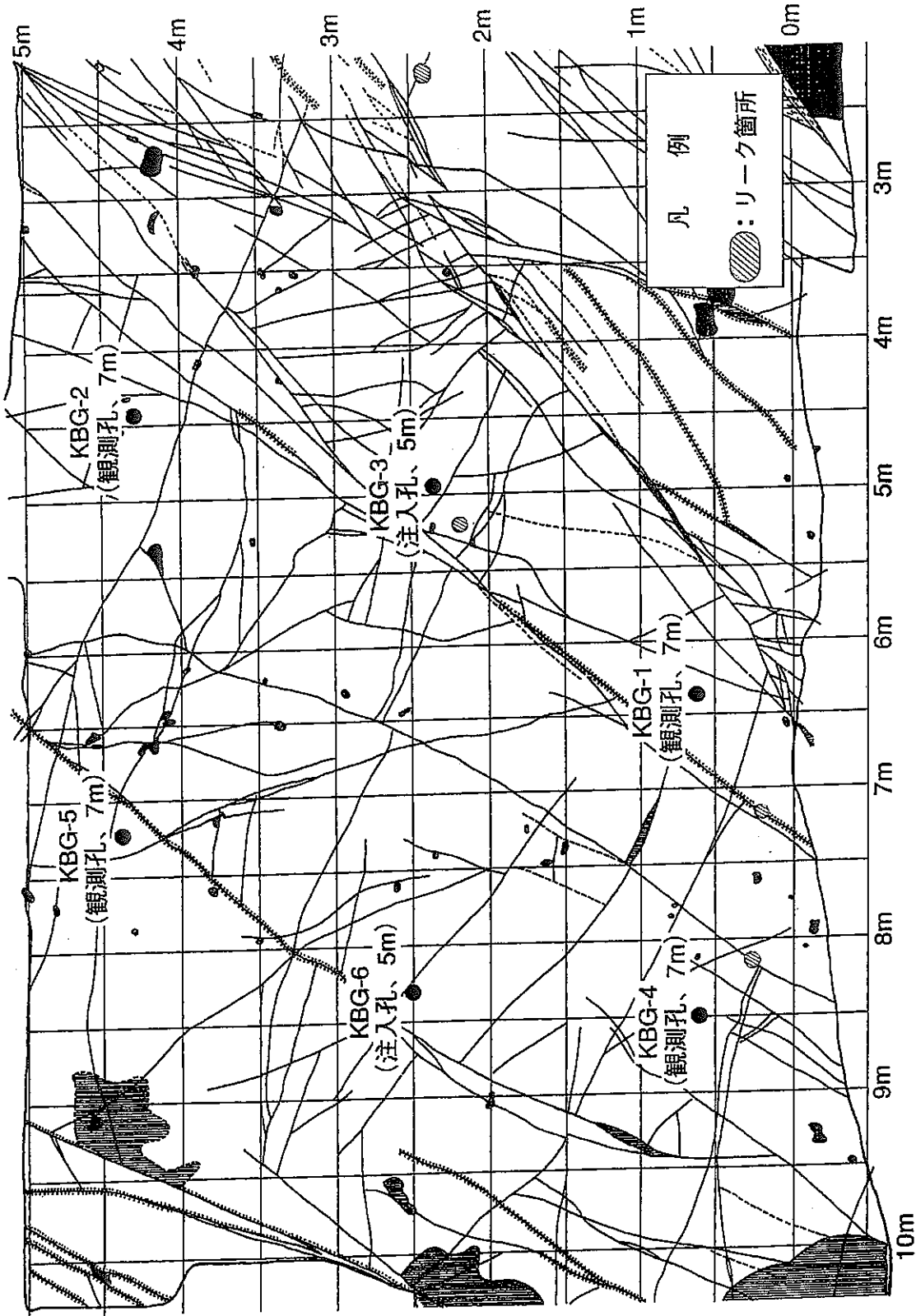


図-4.17 KBG-3 注入時のグラウト坑道底盤からのリーク状況

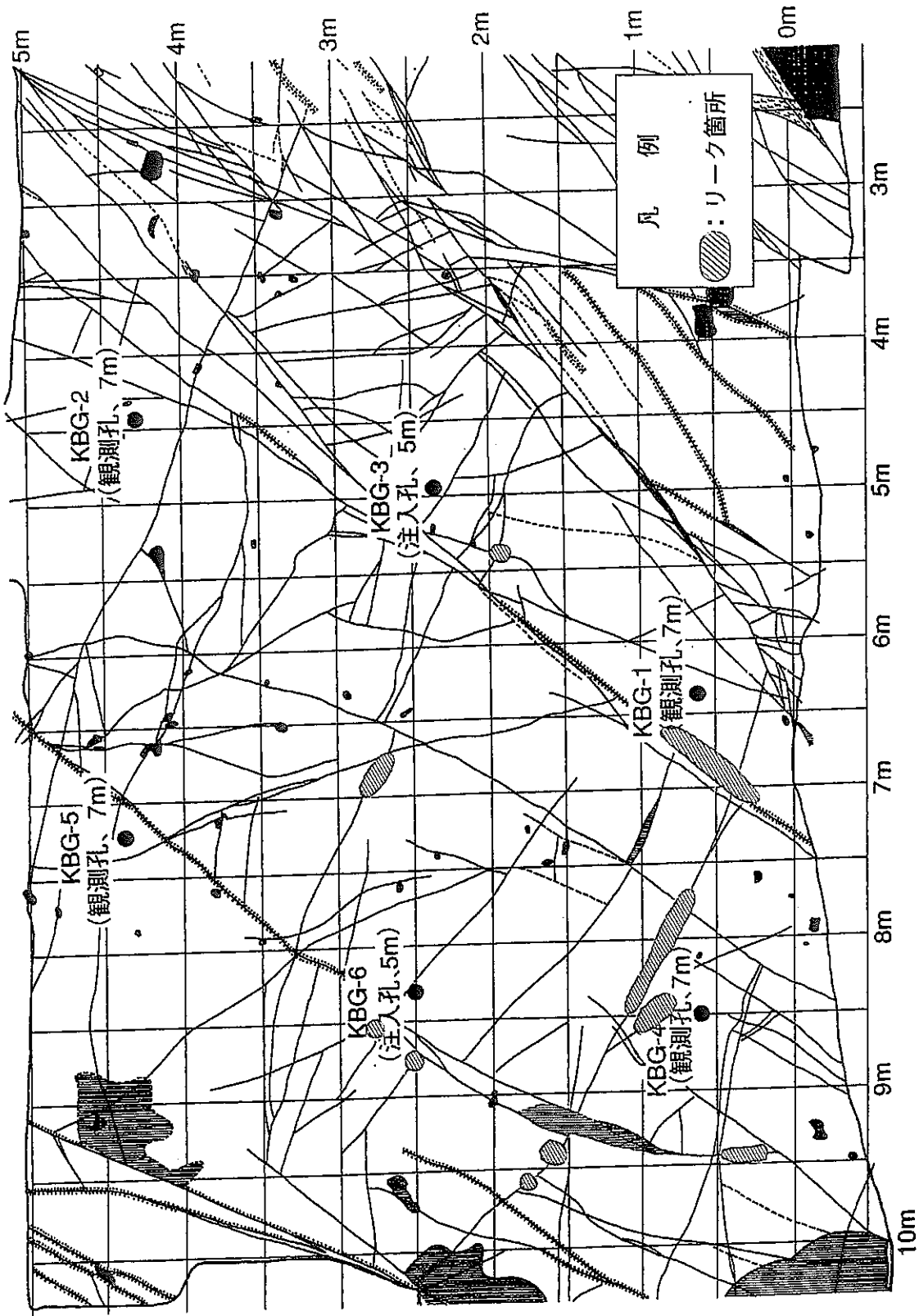


図-4.18 KBG-6 注入時のグラウト坑道底盤からのリーク状況

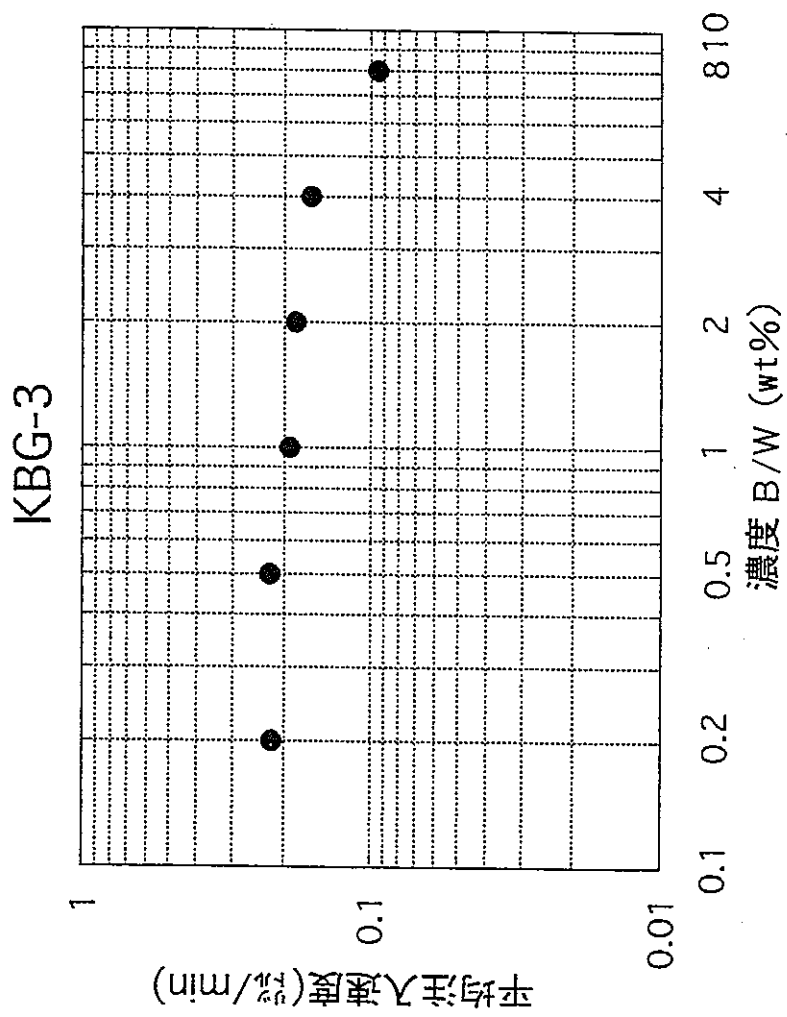


図-4.19 注入濃度と注入速度の関係 (KBG-3)

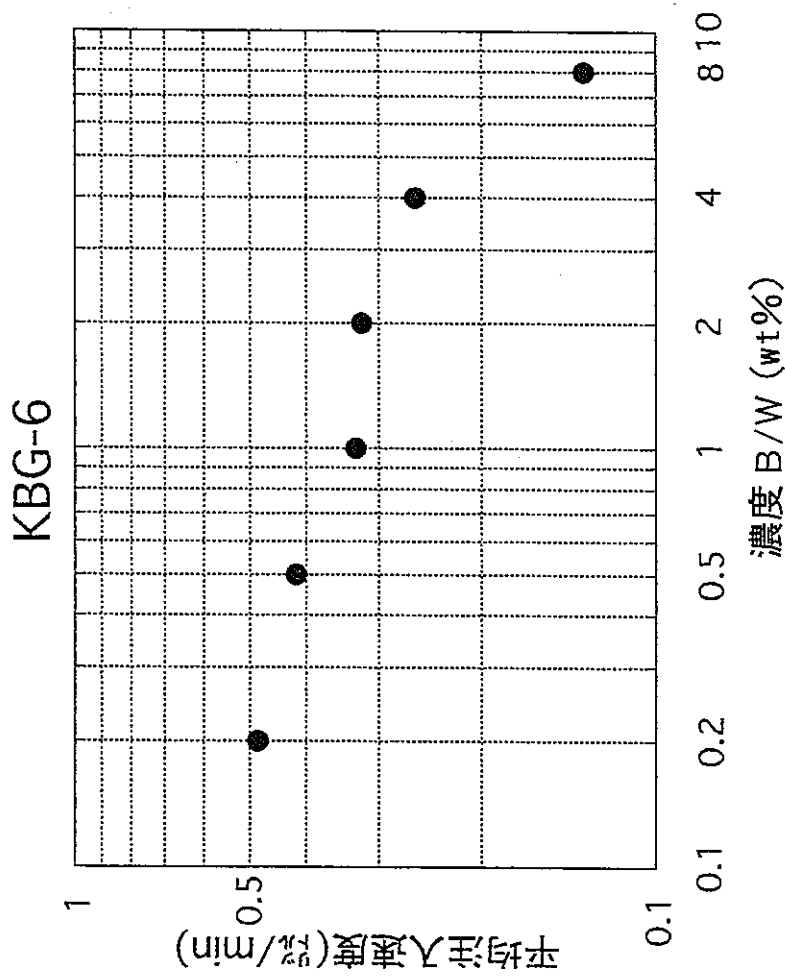


図-4.20 注入濃度と注入速度の関係 (KBG-6)

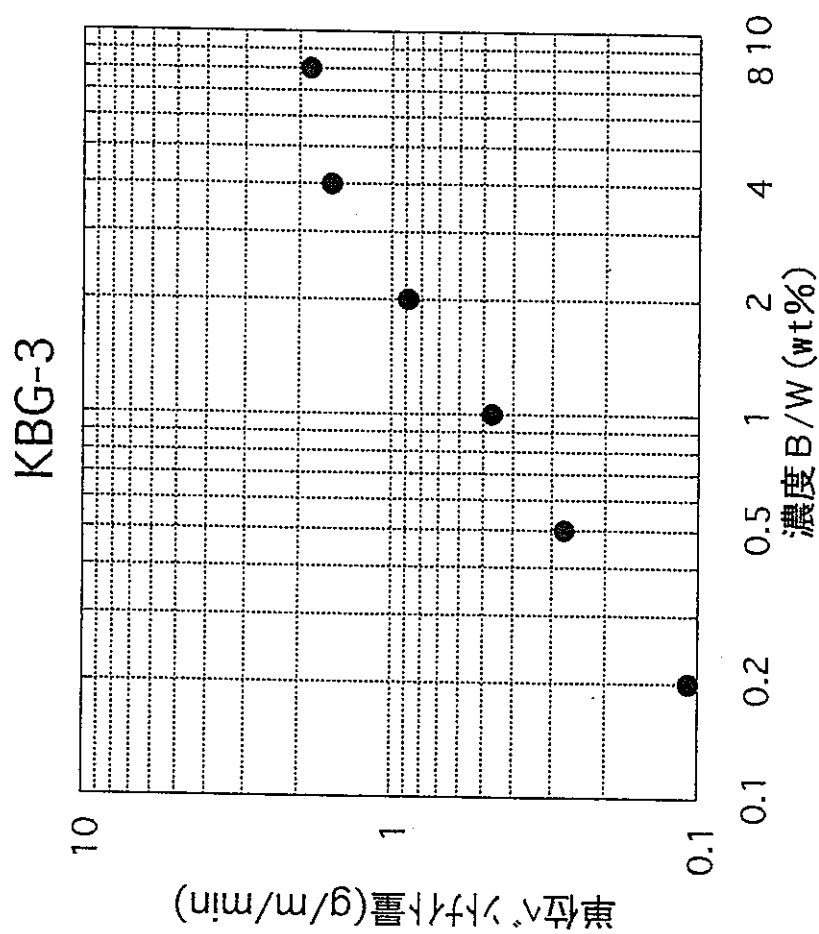


図-4.21 注入濃度と単位注入ベントナイト量の関係 (KBG-3)

KBG-6

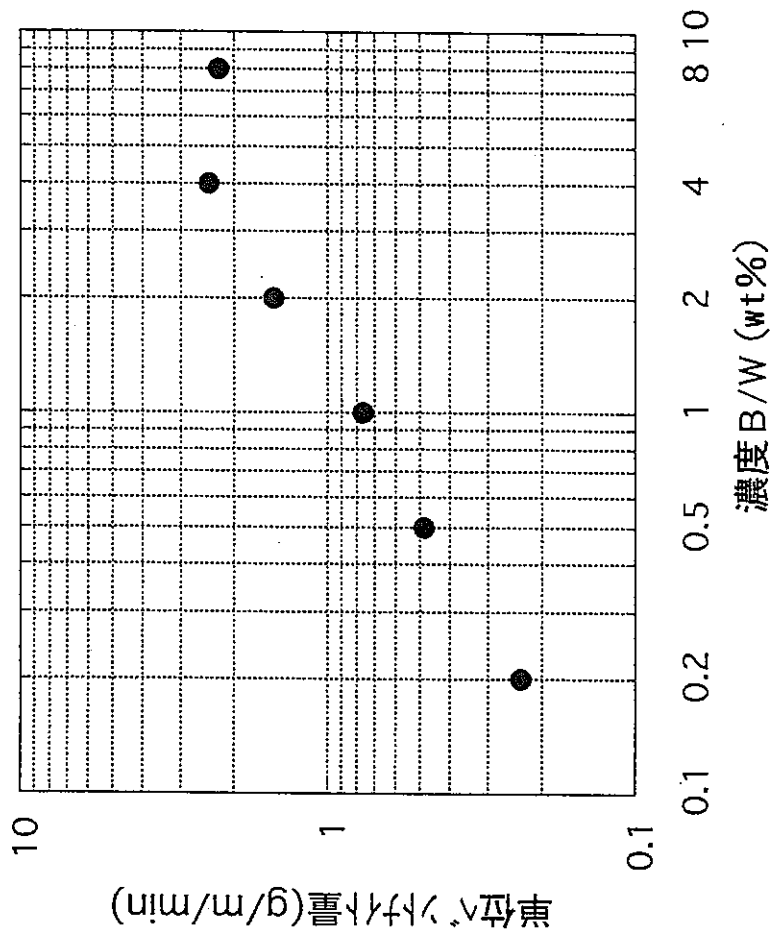


図-4.22 注入濃度と単位注入ベントナイト量の関係 (KBG-6)

4.4 効果確認試験

グラウト注入終了後に孔内壁面観察，透水試験およびトモグラフィー試験による効果確認試験を実施し，グラウトの効果を確認した。

既往のグラウト効果確認試験は，セメントグラウトを対象としたものが主体であり，粘土グラウトの効果の確認手法はこれまで確立されていない。粘土グラウトの主な目的は，目づまりによってその坑道周辺の透水性を改善することである。このため，本試験では，粘土グラウトによる透水性の変化を直接評価できる透水試験をグラウト注入孔であるKBG-3, 6で実施した。また，ベントナイト溶液が周辺の地下水より高い電気伝導度であることを利用し，グラウト注入前後の電磁波及び比抵抗によるトモグラフィーの解析結果から，グラウト浸透範囲の推定を試みた。さらに，グラウトの施工による坑道周辺の滴水量の変化を観察するため，天盤及び床面からの滴水量を測定した。

4.4.1 孔内観察

図－ 4.23, 4.24にグラウト注入前後の孔内観察結果の例を対比して示す。

KBG-3, 6が濁っているのは、グラウト注入後孔壁をなるべく洗い流さないようにしたためである。この結果からは、亀裂にグラウトが浸透したかどうかの明瞭な判断はできなかった。

孔 番 : KBG-3

試 験 前

測定日 : 平成7年6月28日

試 験 後

測定日 : 平成7年7月27日

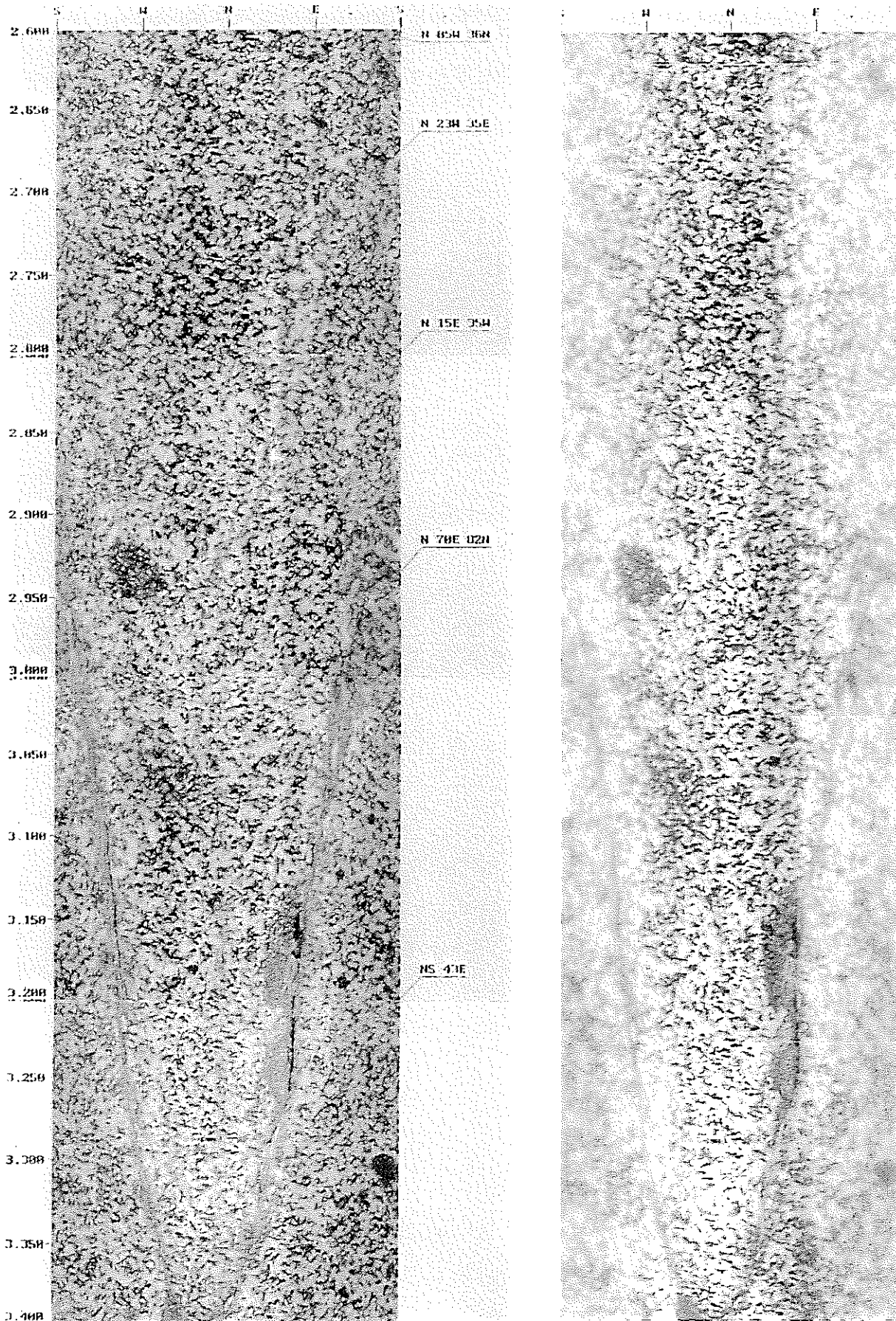


図-4.23 孔内観察結果例 (KBG-3)

孔 番 : KBG-6

試 験 前

測定日 : 平成7年6月28日

試 験 後

測定日 : 平成7年7月27日

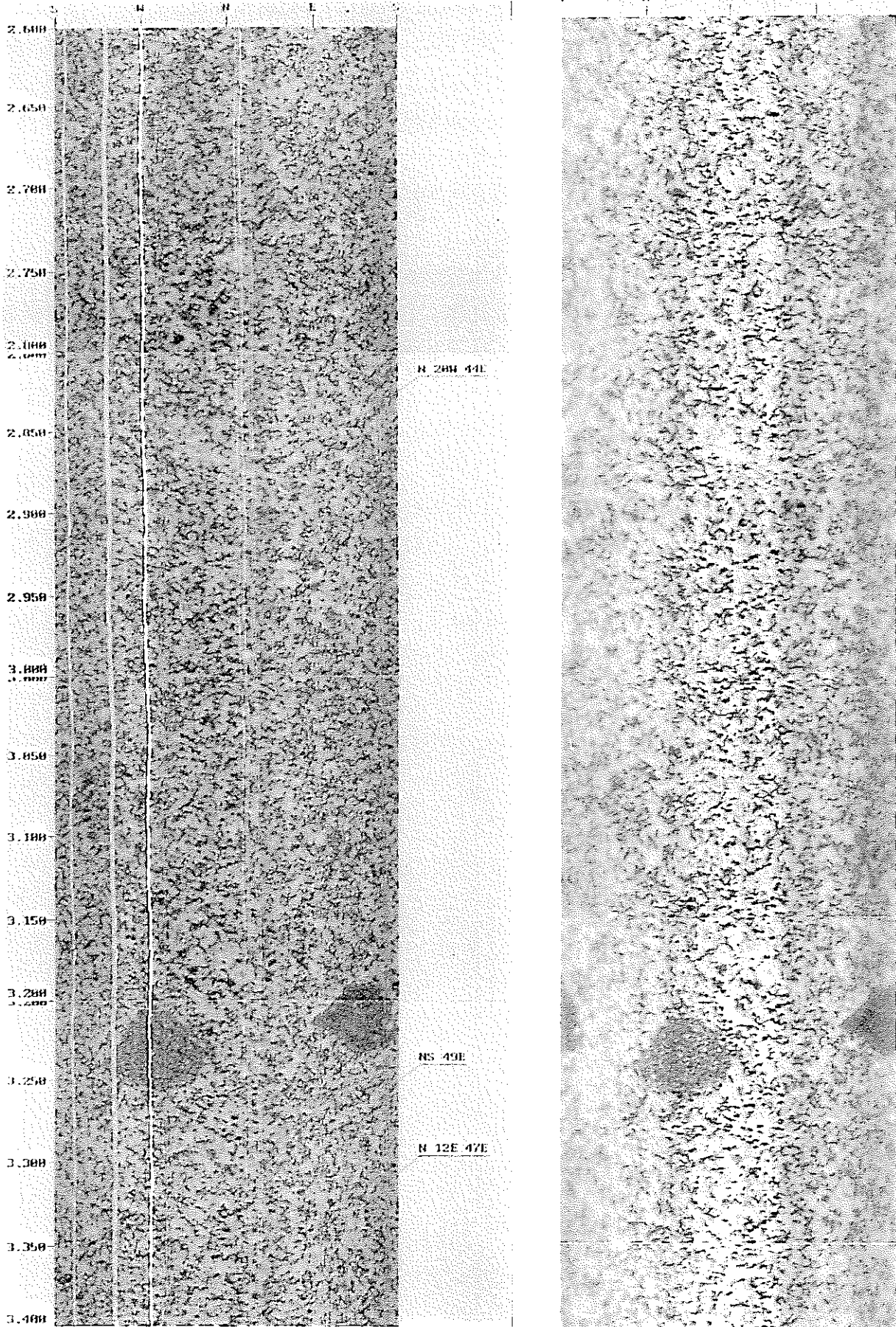


図-4.24 孔内観察結果例 (K B G - 6)

4.4.2 透水試験

表－ 4.13は、グラウト注入前後の透水試験結果を対比したものである。

グラウト前後での透水性の比較では、亀裂群Aを対象とした KBG-3は 9.6×10^{-8} cm/sから 2.5×10^{-9} cm/sへ透水係数が改善された。亀裂群Bを対象とした KBG-6は 4.2×10^{-6} cm/sから 1.1×10^{-8} cm/sへ透水係数が改善された。この結果は、国産ベントナイトであるクニゲルVAが、粘土グラウトに要求される性能である「地層が本来有する低透水性と同等以上に岩盤の透水性を改良すること」を期待出来る可能性があることを示すものであると考えられる。

透水試験の結果から、注入孔周辺の透水性に関してはグラウト注入による改善が確認された。グラウトの浸透範囲に関しては、注入孔における透水試験だけで把握することはできないので、次に、トモグラフィ解析による浸透範囲についての推定を行った。

表-4.13 透水試験結果

(注入前後の対比)

	KBG-3		KBG-6	
	最高圧力 (MPa)	透水係数 (cm/sec)	最高圧力 (MPa)	透水係数 (cm/sec)
グラウト注入前	0.1196	9.6×10^{-8}	0.1131	4.2×10^{-6}
グラウト注入後	0.1195	2.5×10^{-9}	0.1131	1.1×10^{-8}

4.4.3 トモグラフィー試験

グラウト注入後、電磁波トモグラフィー、比抵抗トモグラフィーをグラウト注入前と同じ断面において実施した。測定配置、遠電極の位置等もすべてグラウト注入前と同じ条件である。電磁波トモグラフィー測定はグラウト注入終了後3日後、比抵抗トモグラフィー測定はグラウト注入終了後5日後に実施した。

(1) 電磁波トモグラフィー解析結果

注入前後の電磁波トモグラフィー解析結果を対比したものを図-4.25~4.28に示す。速度変化率(%)は、グラウト注入前の電磁波速度(m/sec) V_{br} 、グラウト注入後の電磁波速度(m/sec) V_{ar} として次式で計算した。

$$\text{速度変化率(\%)} = (V_{ar} - V_{br}) / V_{br} \times 100 \quad \text{-----} \quad (4.3)$$

図-4.25~4.28はグラウト注入前後での電磁波の速度変化率分布と坑道、ボーリング孔内で観察された亀裂分布を示したものである。

KBG-3孔への注入に関しては、図-4.25、4.26に見られるように、KBG-1~2断面では亀裂群Aの直下深度1m付近で速度低下域がみられ、KBG-2~3断面でも同様の位置に速度低下域がみられる。これとは別に、KBG-1~2断面ではKBG-2(深度3~6m付近)からKBG-1(深度6~7m付近)につながる部分での速度低下率が5%以上と大きい。これは、KBG-2~3断面でも認められる。これらの部分はボーリング孔内観察結果からも亀裂が認められる部分であり、KBG-3孔へ注入したグラウトは、KBG-3孔と比較的浅い位置(深度1m付近)で交わる亀裂群Aよりも、深度4m以深の亀裂へより多く浸透したと考えられる。

また、KBG-6孔への注入に関しては、図-4.27、4.28に見られるように、KBG-4~5断面ではグラウト前の電磁波トモグラフィー結果からも確認されている亀裂群B沿いに4%以上の連続した速度低下域がみられる。KBG-5~6断面でも同様の位置に速度低下域がみられる。KBG-6孔への注入において亀裂群Bへのグラウト浸透による速度の低下が明瞭に認められたのは、亀裂群Bの最大亀裂幅が15mmと大きく、総注入ベントナイト量も17kgとKBG-3に比較して5倍もあったためと考えられる。亀裂群B以外では、KBG-6(深度4~5m付近)からKBG-5(深度6m付近)につながる部分で速度低下域がみられる。この速度低下域は4~5断面でも確認できる。これは亀裂群Bの深度4m付近で派生した亀裂であり、これに沿ってもグラウトが浸透したものと考えられる。

(2) 比抵抗トモグラフィー解析結果

図-4.29、4.30はグラウト注入前後での比抵抗値変化率分布と坑道、ボーリング孔内

で観察された亀裂分布を示したものである。比抵抗値変化率（％）は、グラウト注入前の比抵抗値（ $\Omega \cdot m$ ） R_{bf} 、グラウト注入後の比抵抗値（ $\Omega \cdot m$ ） R_{af} として次式で計算した。

$$\text{比抵抗値変化率（％）} = (R_{af} - R_{bf}) / R_{bf} \times 100 \quad \text{----- (4.4)}$$

KBG-3孔への注入に関しては、図－ 4.29に見られるように、亀裂群A付近（KBG-1孔深度2 m以浅）とKBG-2孔の深度6 m以深で比抵抗値が低下しており、これらは電磁波トモグラフィーで認められた速度低下域にほぼ対応する。

また、KBG-6孔への注入に関しては、図－ 4.30に見られるように、亀裂群B沿い（KBG-5孔2～4 mからKBG-4孔5～7 m）に比抵抗が低下しており、これも電磁波トモグラフィーで認められた速度低下域にほぼ対応する。

速度変化率

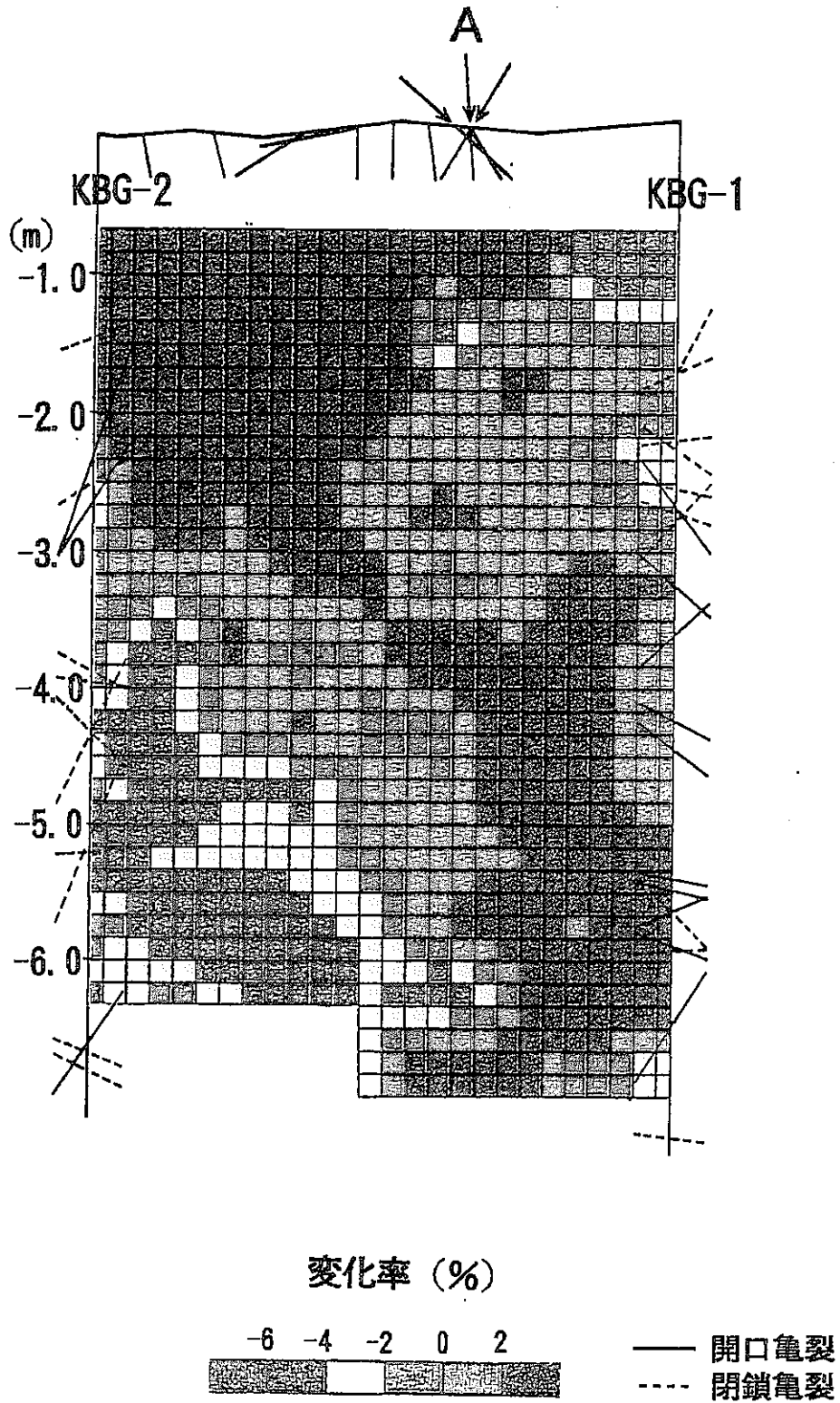


図-4.25 電磁波トモグラフィー解析結果 (KBG-1~2断面)

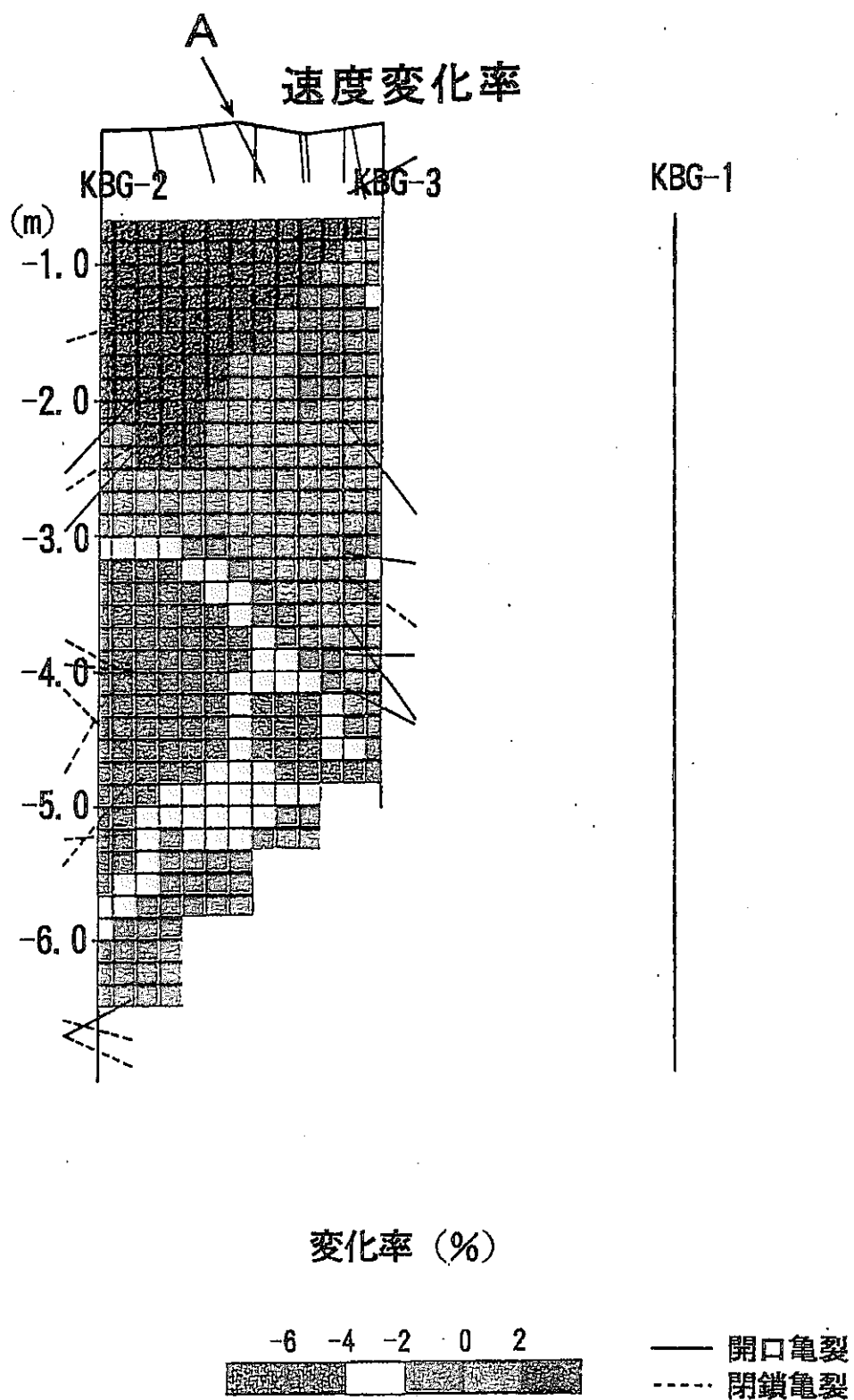


図-4.26 電磁波トモグラフィ解析結果 (KBG-2~3断面)

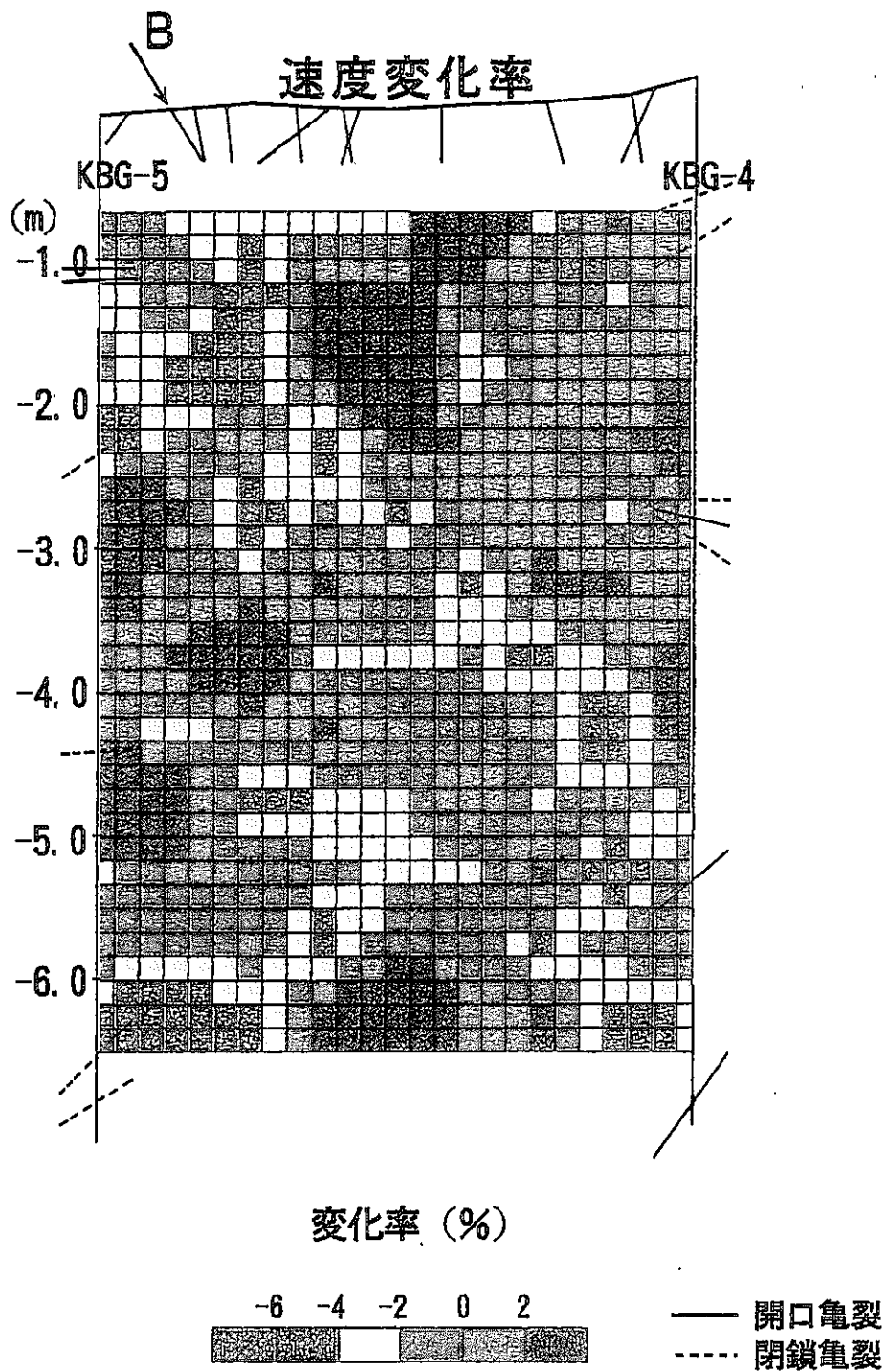


図-4.27 電磁波トモグラフィー解析結果 (KBG-4~5断面)

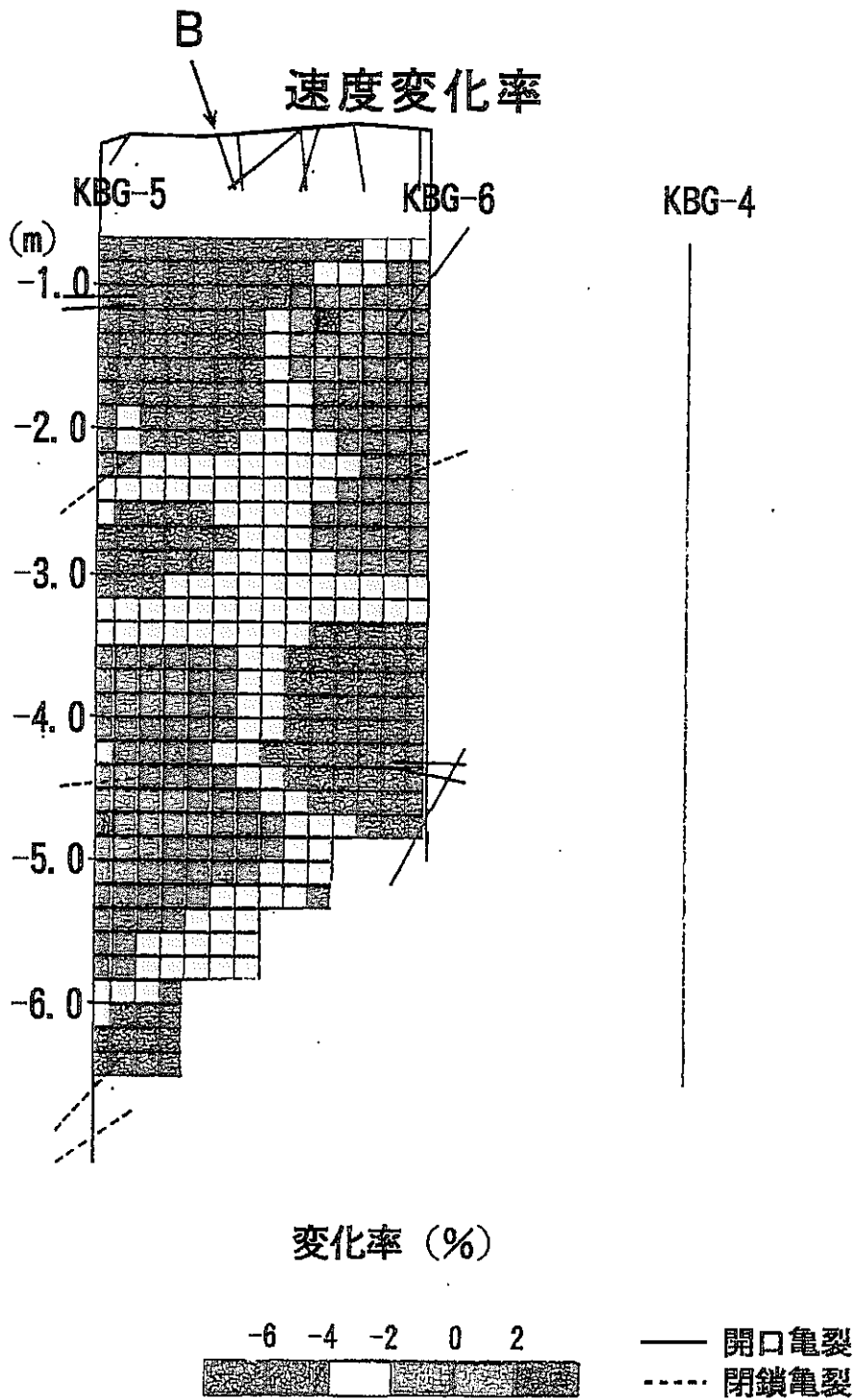


図-4.28 電磁波トモグラフィー解析結果 (KBG-5~6断面)

比抵抗値変化率

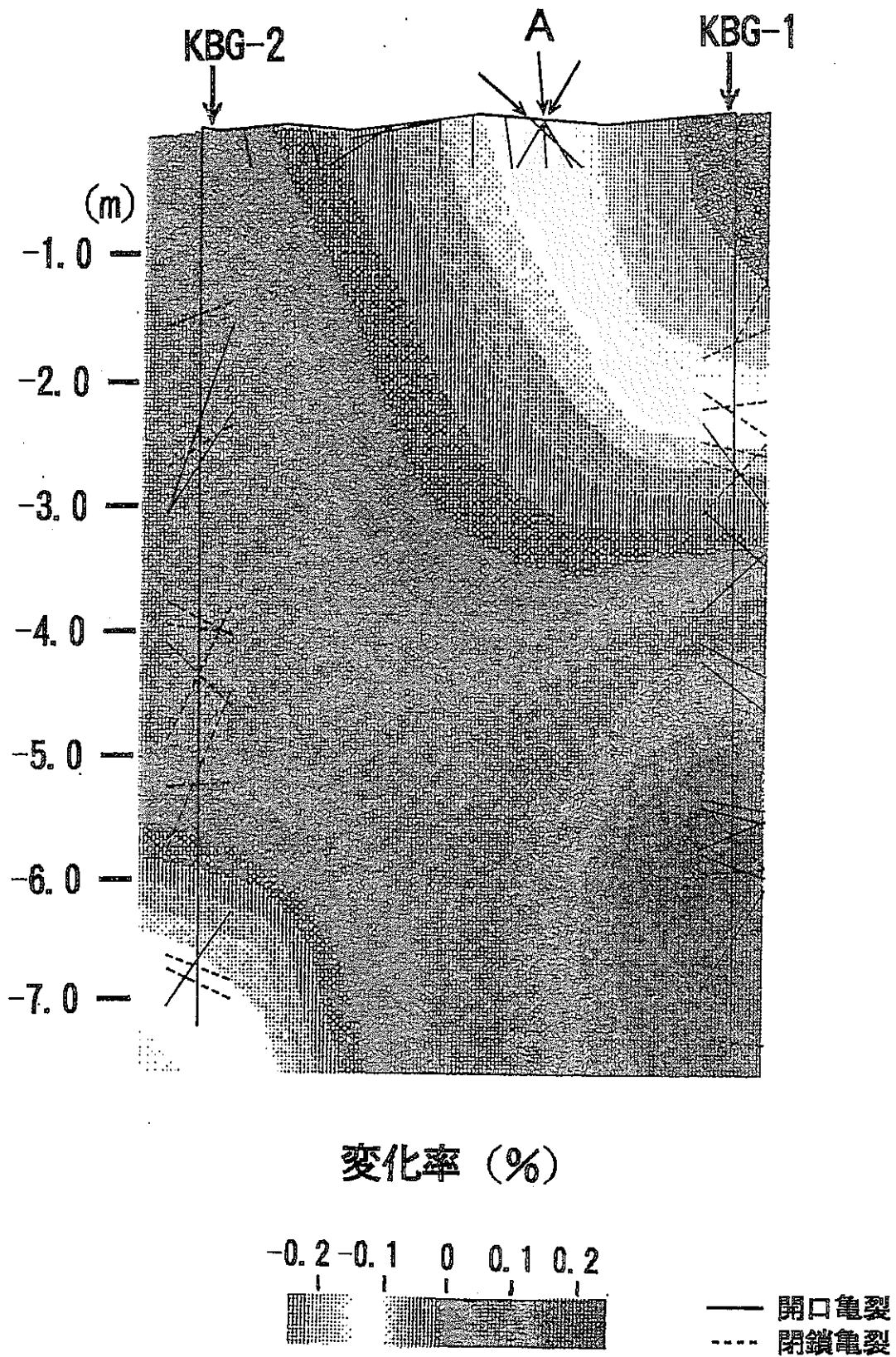


図-4.29 比抵抗トモグラフィー解析結果 (KBG-1~2断面)

比抵抗値変化率

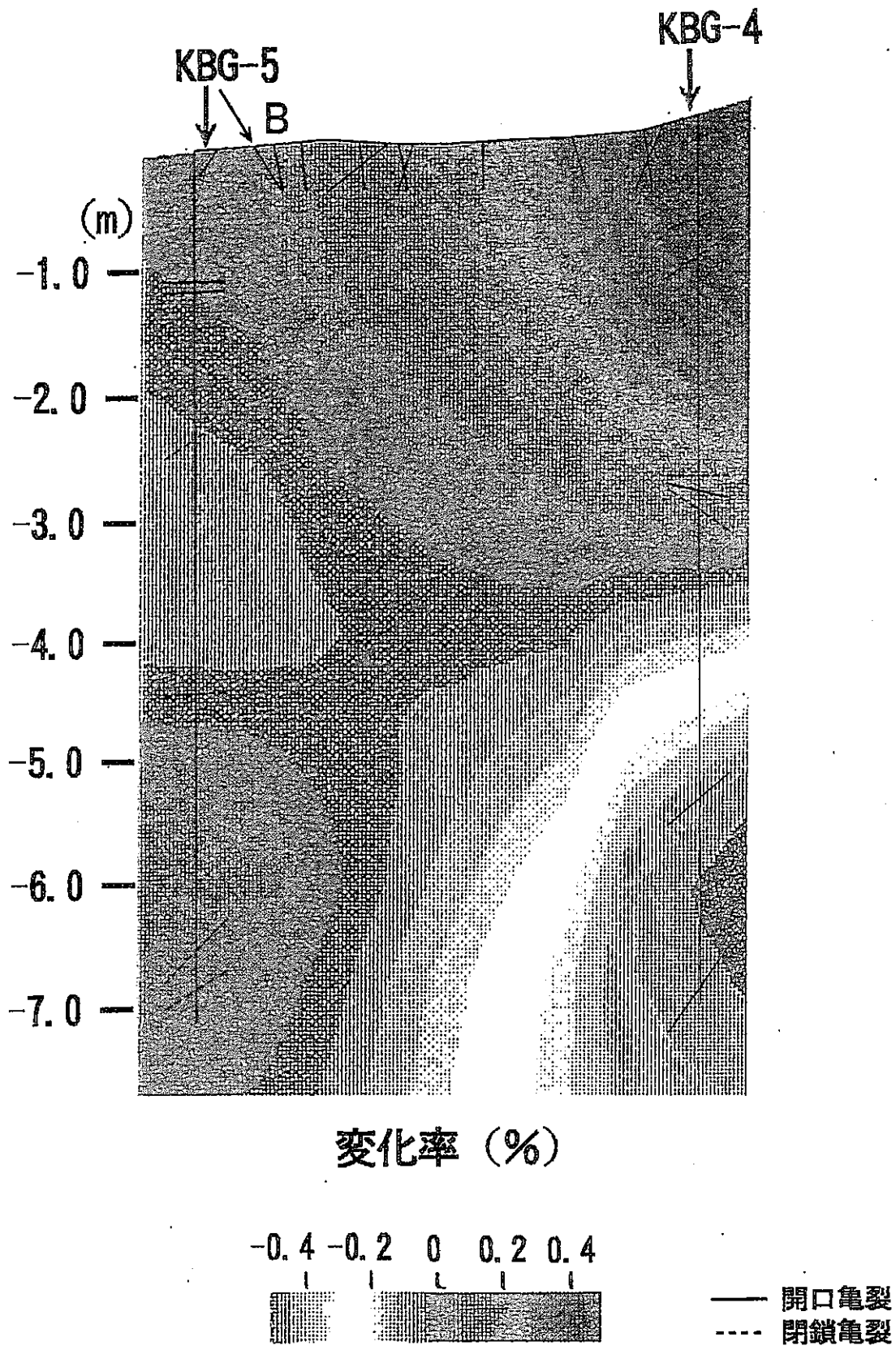


図-4.30 比抵抗トモグラフィー解析結果 (KBG-4~5断面)

4.4.4 滴水量測定

滴水量測定は、グラウト注入前から注入後までの湧水量（滴水量）の経時変化と粘土グラウト液の側壁、天盤への回り込みの有無及びグラウト坑道周辺の水理地質環境変化の有無との関係について検討するために実施した。また、水質変化の指標としての滴水量の電気伝導度の測定を行った。

湧水量測定の様式図は、前掲の図－ 4.14の通りである。また、底盤からの湧水量は集水堰を設け、堰内の水位を計測瓶で測定した。しかし、底版からの湧水は注入前からほとんどなく、注入による止水効果を底盤湧水量の変化でとらえることはできなかった。また、この集水堰は注入中の粘土グラウト液のリーク量を測定する目的でも設置したが、図－ 4.17, 4.18で示したように堰で量を測定できるほど多量のリークはなかった。

天端からは、0.15ℓ/min程度の湧水が注入前よりみとめられたため、その量と電気伝導度の経時変化を測定した。その結果を図－ 4.31に示す。これより、注入前から注入後にいたるまで湧水量は大きな変化はなかったが、電気伝導度については、注入中に値がやや小さくなる傾向が見られた。しかしながら、この小さくなる現象の原因については不明である。

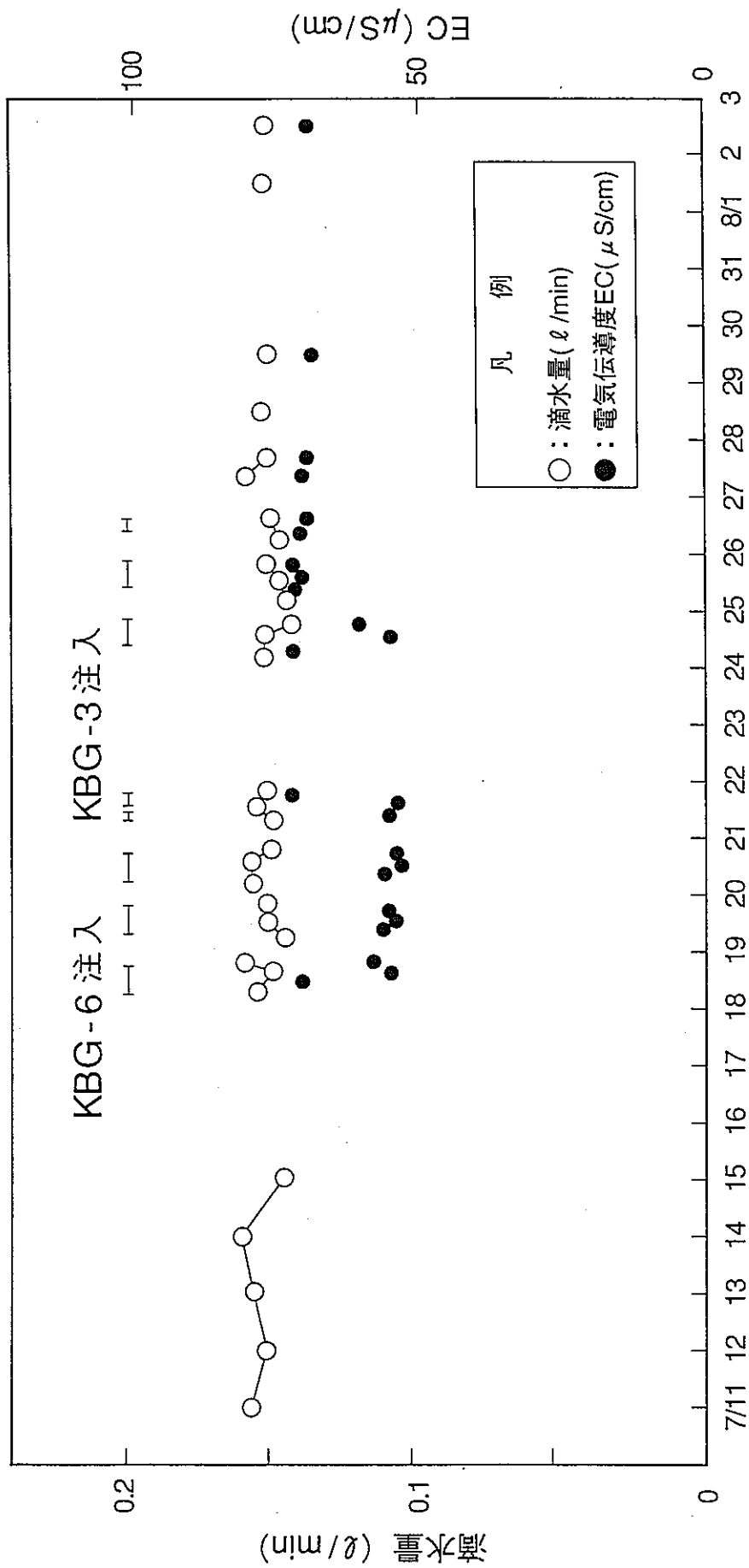


图-4.31 滴水量測定結果

5. 考察

5.1 粘土系グラウトの基本性能について

5.1.1 注入材料

クニゲルVAを材料としたグラウト注入が可能であることを確認した。

5.1.2 注入濃度

- ① 透水係数が 10^{-6} オーダーのボーリング孔周辺岩盤では、濃度 $B/W=0.2 \sim 4 \text{ wt}\%$ の範囲では注入が可能であったが、 $B/W=8 \text{ wt}\%$ では粘性が大きく注入が難しい状態であった。
- ② 透水係数が 10^{-8} オーダーのボーリング孔周辺岩盤では、注入可能な濃度 B/W がより小さく、 $4 \text{ wt}\%$ でも注入が難しい状態であった。

5.1.3 注入圧力

釜石原位置試験場におけるカバーロック約1mの条件下での注入可能圧力は、 $1.0 \sim 1.5 \text{ MPa}$ と考えられる。

5.2 注入効果について

5.2.1 注入孔周辺の透水性の変化

- ① グラウト注入により、透水係数 $k=10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ cm/s}$ オーダーのボーリング孔周辺岩盤が $k=10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ cm/s}$ 程度の難透水性となることを確認した。
- ② 注入液の粘性～注入量の関係から透水性の改良時期について考察する。

グラウト濃度の粘性と注入量との関係を相対的に検討するため、注入孔（KBG-3, 6）ごとにオストワルト粘度の測定結果と、注入圧が定常状態になった時の1分当りの注入量を表-5.1, 5.2に整理した。表-5.2から、KBG-6では $0.5 \text{ wt}\%$ と $1.0 \text{ wt}\%$ の間に注入量が大きく減り、透水性が改良されている。グラウトスラリーは粘性を有しており、その粘性の影響により、粘性が大きい高注入濃度の場合に注入量が減少することが考えられる。しかし、注入濃度が $1.0 \text{ wt}\%$ 以下では濃度による粘性の差は小さいので、この大幅な減少は粘性によるものではなく、グラウト本来の目的である透水経路となっていた亀裂に目詰まりが生じた結果と思われる。一方、KBG-3では、表-5.1から注入量の大きな変化は見られなかったため、ある濃度で顕著な目詰まりを生じたのではなく、濃度を上げるごとに少しずつ目詰まりを生じることで透水性が改良されたと考えられる。

5.2.2 注入溶液の粘性を考慮した透水性評価

グラウト試験では、各注入濃度ごとにおける透水係数の改良を透水試験によって評価することが望まれるが、透水試験により注入した水がグラウトスラリーの浸透状態を乱すことが考えられる。本試験では最終的な透水係数、改良効果を把握することを目的としているが、ここでは各注入濃度における注入状況から透水性を評価することを試みた。

(1) 固有浸透係数の算出

注入溶液の粘性を考慮して透水性を評価する指標としては、油田工学分野で利用される固有浸透係数Kがある⁹⁾。固有浸透係数の算出式は式(5.3)に示すとおりであり、その時に必要な動粘性係数は式(5.1)、(5.2)を用いて算出した。

表-5.3は、KBG-3, 6における注入実績から固有浸透係数を算出した結果であり、参考のために、注入前後に実測した透水試験結果(表-4.13参照)からも、水の粘性を勘案して固有透水係数を算出、比較した。また、これらの算出結果を図化したものを図-5.1, 5.2に示す。

なお、濃度8%の場合は濃度が大きいためオストワルト粘度計による測定ができなかったため、回転粘度計(Fann Inst. Co. USA, 型式 FANA Model 35SA)を用いた。

・ オストワルト粘度計による動粘性係数の算出

(注入濃度B/W=0.2~4.0wt%の場合)

$$\nu = \frac{\nu_w \cdot t}{t_w} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 ν : 粘土スラリーの動粘性係数 (cm²/s)
 ν_w : 水の動粘性係数 (cm²/s) 10℃で0.0131cm²/s
 t : 粘土スラリーの流下時間 (s)
 t_w : 水の流下時間 (s)

・ 回転粘度計による動粘性係数の算出 (注入濃度B/W=8.0wt%の場合)

$$\eta = F (600\text{rpm}) \times 1/2 \dots\dots\dots (5.2)$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

ここで、 ν : 粘土スラリーの動粘性係数 (cm²/s)
 η : 粘土 (cp) 1 cp=10⁻²g/(cm·s)
 $F (600\text{rpm})$: 回転粘度計の実測値
 ρ : 密度 (g/cm³)
 8.0wt%粘土スラリーの密度=1.050g/cm³

・ 固有浸透係数の算出

$$K = \frac{\nu}{g} \cdot \frac{Q}{2\pi L P} \ln \left(\frac{L}{r} \right) \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、Q : 注入量 (cm³/s)
P : 注入圧水頭 (cm)
L : 試験区間長 (cm)
r : 試験孔半径 (cm)
ν : 動粘性係数 (cm²/s)
g : 重力の加速度 (980cm/s²)
K : 固有浸透係数 (cm²)

(2) 透水性評価について

- ① 図- 5.1, 5.2により, 粘性を勘案して推定した注入中の固有浸透係数は, K BG-3, 6のいずれの場合も注入濃度 1 wt%で極小値をとり, 濃度が増大するほど固有浸透係数が大きくなって, 注入開始時の固有浸透係数を上回る。
- ② しかしながら, 実際に注入前後に行った透水試験結果では, 明らかにKBG-3, 6共にグラウト注入後に透水係数は低下している。
- ③ 現地におけるグラウト注入状況を勘案しても, 計算上の固有浸透係数の増加が透水性の増加を反映しているとは想定しにくい。したがって, 粘土系グラウト注入に対して粘性を考慮した透水性評価を適用することは, 下記のような理由により困難があると判断される。

- ・ 式(5.3)では, ある粘性をもった液体が, その粘性を常に保った状態で岩盤中に浸透することを前提としている。
- ・ しかしながら, 粘土系グラウトは, 液中の粘土(ベントナイト)粒子を岩盤中の亀裂に拘留させることによって, 透水性を改良させている。したがって, 粘土系グラウトでは, 注入液の粘性は時間的にも場所的にも一定ではなく, 常に変化していると考えられる。
- ・ したがって, 粘土系グラウトの注入データ(圧力, 注入量, 注入液の粘性等)から算出した固有浸透係数を用いて地層中の石油の賦存評価等と同様の透水性評価はできない。
- ・ 注入濃度ごとに透水性の変化を把握する必要があるれば, 注入濃度を変えるたびに透水試験を行わなければならない。

5.2.3 注入範囲の評価

前章4.4.3トモグラフィー試験で、電磁波速度低下域、比抵抗値低下域としてグラウト浸透範囲の推定を行った。

その要点を以下に列挙する。

(1) 電磁波トモグラフィー解析結果

電磁波トモグラフィーでは、すべての断面においてグラウト注入後の方が全体的な電磁波速度は低下している。しかし、トモグラフィー解析では収束の仕方によっては解析上偽像が生じることがある。したがって、このような解析誤差も考慮に入れ5%以上の変化がある所に注目して測定結果の評価を行った。

- ① KBG-3孔への注入に関しては、KBG-1～2断面では亀裂群Aの直下深度1m付近で速度低下域がみられ、KBG-2～3断面でも同様の位置に速度低下域がみられる。これとは別に、KBG-1～2断面ではKBG-2（深度3～6m付近）からKBG-1（深度6～7m付近）につながる部分での速度低下率が5%以上と大きい。
- ② KBG-6孔への注入に関しては、KBG-4～5断面では亀裂群B沿いに4%以上の連続した速度低下域がみられる。KBG-5～6断面でも同様の位置に速度低下域がみられる。

(2) 比抵抗トモグラフィー解析結果

比抵抗トモグラフィーでは、基本的な精度の面で個々の亀裂にグラウト液が浸透したか否かを把握することが困難であるが、今回の解析では、すべての断面においてグラウト注入後の方が全体的な比抵抗値が下がっている結果が得られた。

- ① KBG-3孔への注入に関しては、亀裂群A付近（KBG-1孔深度2m以浅）とKBG-2孔の深度6m以深で比抵抗値が低下しており、これらは電磁波トモグラフィーで認められた速度低下域にほぼ対応する。
- ② KBG-6孔への注入に関しては亀裂群B沿い（KBG-5孔2～4mからKBG-4孔5～7m）に比抵抗が低下しており、これも電磁波トモグラフィーで認められた速度低下域にほぼ対応する。

最近になり、トモグラフィーを用いたグラウトの注入範囲の調査^{10)・11)}が行われているが、ほとんどがセメントグラウトに関するものであり、粘土系グラウトの浸透範囲の調査に用いられた例はない。しかし、岩盤内の水みちを把握するために、トモグラフィーを用いて電気伝導度の高い塩水を追跡するトレーサー試験は実施されており、比較的良好な成果が得られている¹²⁾。

グラウト溶液の電気伝導度は表-5.4に示すように濃度が高いほど大きな値をとる。今回の試験位置付近の地下水の電気伝導度は $100\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下であり、グラウト注入では最終的に8wt%のグラウト液を注入していることから、地下水が高い電気伝導度を有

するグラウト液に置き換わったならばその領域を電磁波、比抵抗トモグラフィーで把握することは可能であると考えられる。

グラウト液の浸透範囲についてまとめると以下のようになる。

① KBG-3孔への注入

KBG-3孔深度1 m付近からKBG-1孔深度2 m以浅（亀裂群A）と、KBG-3孔深度4 m以深からKBG-2孔深度3 m～6 mへ浸透したと推定できる。

② KBG-6孔への注入

KBG-6孔深度2 m～4 mからKBG-4孔深度5 m以深（亀裂群B）と、KBG-6孔深度4 m～5 mからKBG-4孔深度6 m付近へ浸透したと推定できる。

ただし、実際の浸透範囲を直接的に確認したわけではないので、このトモグラフィー結果のみで浸透範囲を決定するのは注意を要する。また、トモグラフィーにおいてグラウトの浸透範囲が検出できたとしても、グラウトの浸透とグラウト注入による岩盤内亀裂の透水性の改善とはイコールではないことに留意すべきである。

表-5.1 注入溶液の粘性と注入量 (KBG-3)

B/W (%)	オストワルト粘度 (秒)	注入量 (ℓ/min)
0.2	5.2	0.25
0.5	5.7	0.23
1.0	5.8	0.20
2.0	7.6	0.19
4.0	12.6	0.17
8.0	測定不能	0.095

表-5.2 注入溶液の粘性と注入量 (KBG-6)

B/W (%)	オストワルト粘度 (秒)	注入量 (ℓ/min)
0.2	5.0	0.50
0.5	5.1	0.47
1.0	5.9	0.32
2.0	7.1	0.32
4.0	13.8	0.26
8.0	測定不能	0.12

表-5.3 各注入濃度ごとの固有透水係数

KBG-3

B/W (wt%)	オストワルト粘度 t (秒)	動粘性係数 ν (cm ² /sec)	注入量 Q (l/min)	固有浸透係数 K (cm ²)
0.2	5.2	0.0136	0.25	1.1E-11
0.5	5.7	0.0149	0.23	1.1E-11
1.0	5.8	0.0152	0.20	9.6E-12
2.0	7.6	0.0199	0.19	1.2E-11
4.0	12.6	0.0330	0.17	1.8E-11
8.0	-	0.2800*	0.095	8.4E-11
注入前	-	0.0131	-	1.3E-12
注入後	-	0.0131	-	3.3E-14

KBG-6

B/W (wt%)	オストワルト粘度 t (秒)	動粘性係数 ν (cm ² /sec)	注入量 Q (l/min)	固有浸透係数 K (cm ²)
0.2	5.0	0.0134	0.50	2.0E-11
0.5	5.1	0.0144	0.47	2.1E-11
1.0	5.9	0.0158	0.32	1.5E-11
2.0	7.1	0.0190	0.32	1.9E-11
4.0	13.8	0.0369	0.26	2.9E-11
8.0	-	0.2800*	0.12	1.0E-10
注入前	-	0.0131	-	5.6E-11
注入後	-	0.0131	-	1.5E-13

* 濃度B/W=8wt%の時の動粘性係数 ν は

ファンネルの回転粘度計で測った値からの換算値を使用。(式(5.2))

** 計算には水の動粘性係数 $\nu_w=0.0131$ (cm²/sec)、

水のオストワルト粘度KBG-3は $t_w=5.0$ (秒), KBG-6は $t_w=4.9$ (秒)を入力。

表- 5.4 グラウト溶液の電気伝導度

B/W (wt%)	電気伝導度* ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.2	68
0.4	118
1.0	258
2.0	444
4.0	758
8.0	1275
精製水	2.7

* : 電気伝導度は25℃換算値

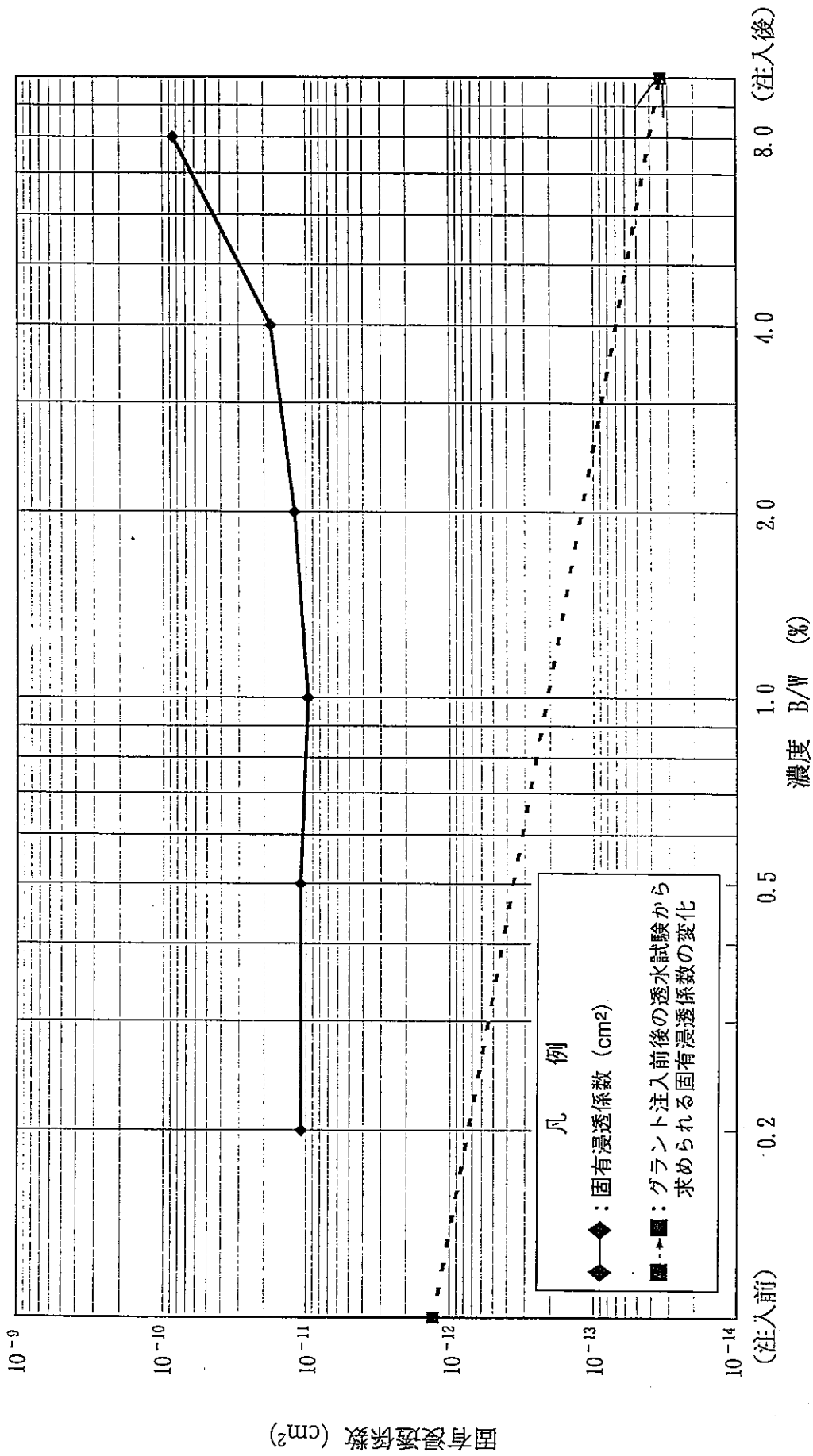


図-5.1 固有浸透係数 (K B G - 3)

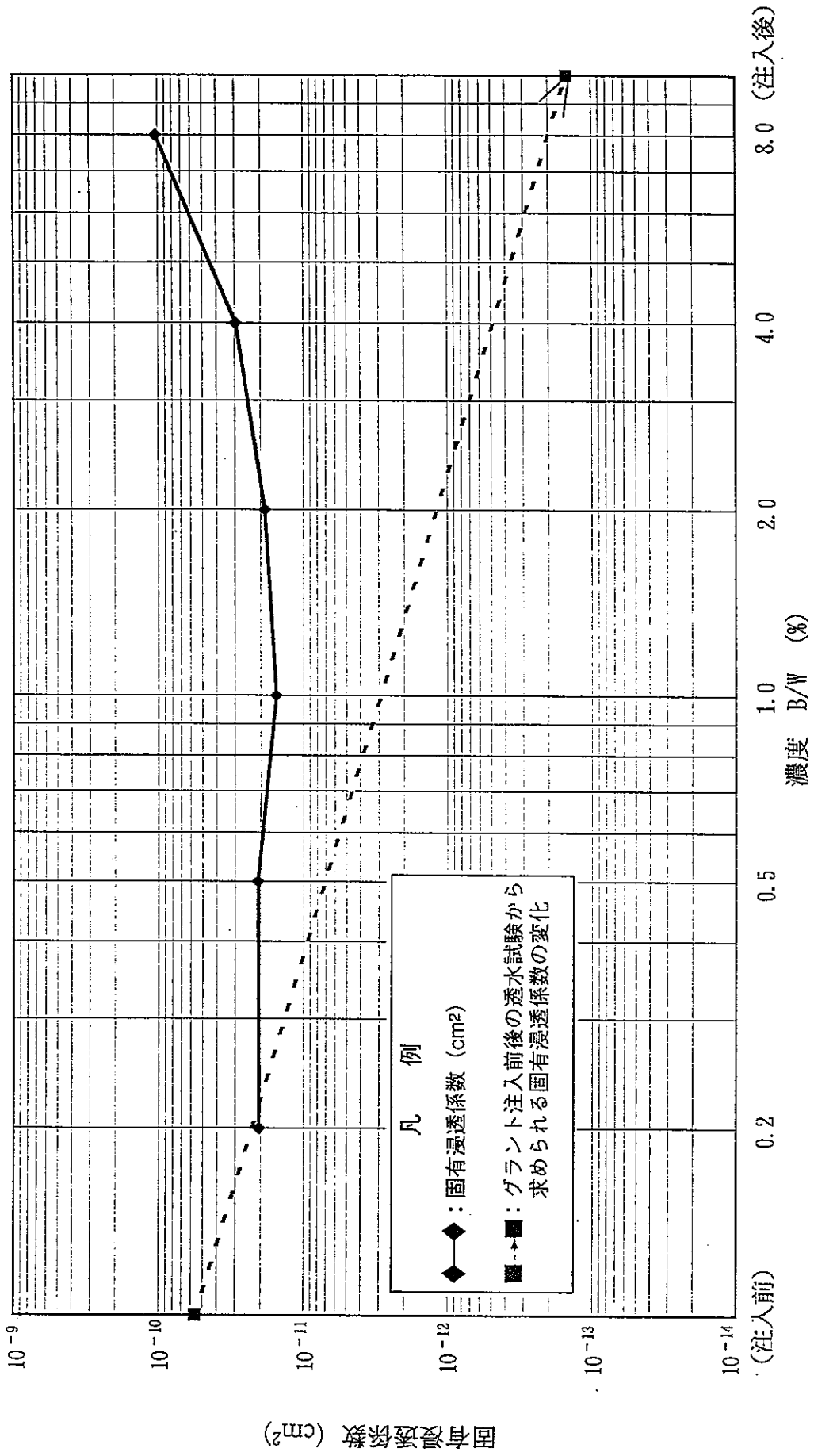


図-5.2 固有浸透係数 (K B G - 6)

5.3 試験フローについて

本研究で採用した試験フローは、前掲の図－ 3.1の通りである。これに対して、粘土系グラウトの注入に関して改良すべきと考えられる点を以下に列挙する。

(1) 粘土系グラウトの基本性能について

- ① 粘土系グラウトの基本性能を把握するには、ある広がりを持ったエリアを対象としたグラウトを実施し、エリア全体としての透水性の改良について議論すべきと考えられる。
- ② また、注入濃度や注入時間についても、開始濃度や注入継続時間をパラメータにしたデータを採取することが望ましい。

(2) 注入効果について

- ① 粘土系グラウトの注入効果をより定量的に評価するため、注入ステップごとに注入孔や観測孔の透水試験を実施することが望ましい。
- ② トモグラフィー測定（比抵抗、電磁波）による注入範囲の推定をより確かなものとするために、グラウト注入の効果をコア試験レベルで確認する必要がある。

以上の考えられる改良点を盛り込んだ試験フローを、今回採用した試験フローと共に図－ 5.3に示す。

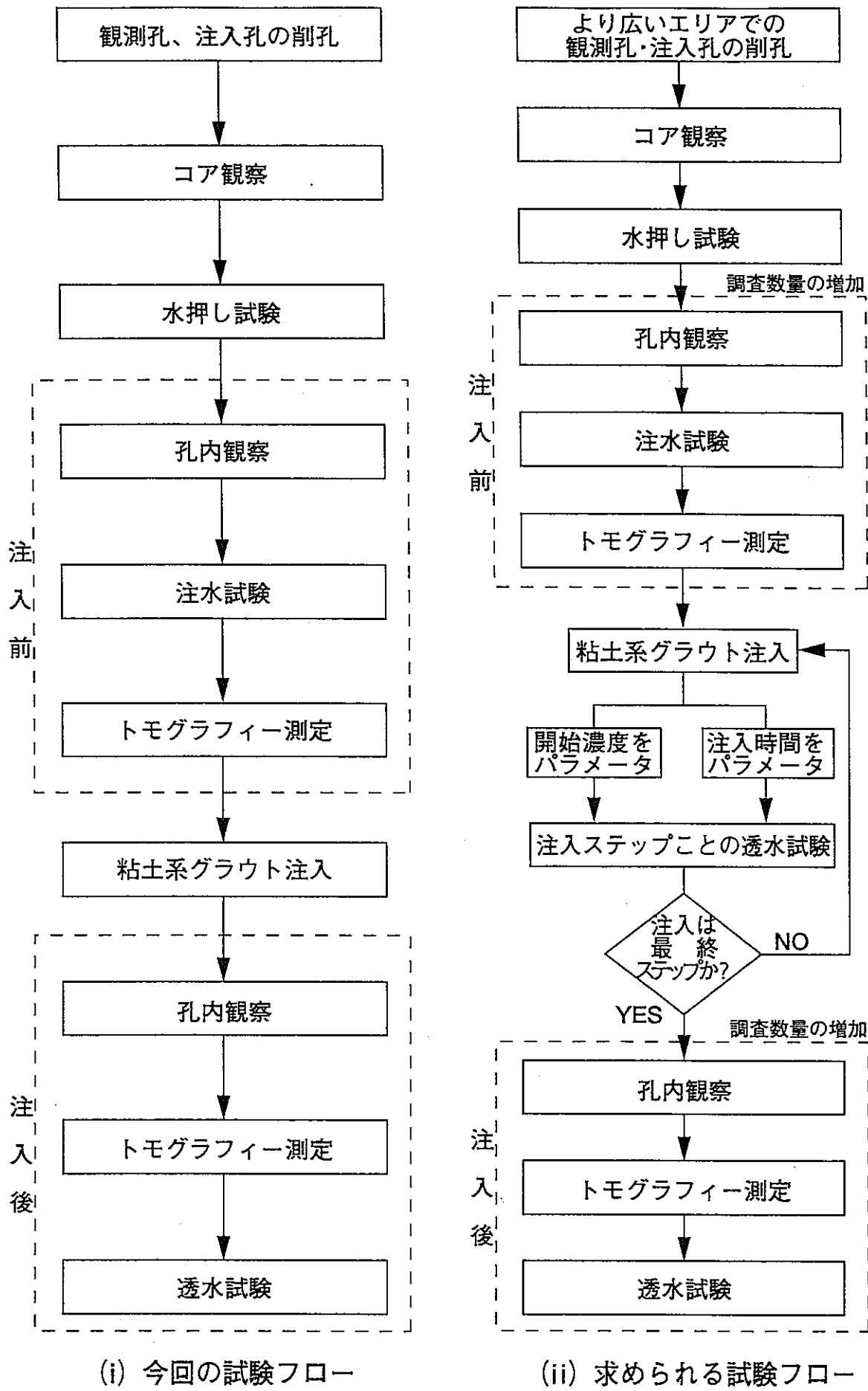


図-5.3 試験フロー

6. まとめと今後の課題

6.1 まとめ

廃棄物の処分システムにおける緩衝材施工及び坑道閉鎖技術開発の一環として、ベントナイトの原位置グラウト試験を釜石原位置試験場において実施した。

本試験は、新規にグラウト試験区域を既存坑道より掘削・拡幅し、天盤から滴水のある亀裂群Aと滴水のない亀裂群Bを対象とした。試験は、注入孔及び観測孔の2種類とし、それぞれの亀裂に対して注入孔1、観測孔2を配置した。試験は、予備注水試験、透水試験、注入試験、透水試験の順で行い、注入試験前後でボアホールテレビ観察及び電磁波及び比抵抗によるトモグラフィ試験を実施した。グラウトの注入試験は、注入圧1.0MPaを基本とし、注入濃度を0.2wt%～8.0wt%まで6段階に設定した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 既存の注入装置を使用した場合でも、注入圧が1.0～1.5MPa以下であればほぼ一定圧状態でグラウトの注入が可能である。
- ② 今回の設定範囲では、亀裂群A、Bどちらの場合においても注入濃度と注入効率はほぼ線形関係があり、注入濃度が高くなると注入効率は下がることが分かった。
- ③ 亀裂群Bにおける注入圧の変動(1.0MPa及び1.5MPa)は、注入効率に余り影響を与えなかった。
- ④ グラウトの注入による透水係数の改善は、亀裂群Aが 9.6×10^{-8} cm/sから 2.5×10^{-9} cm/sであり、亀裂群Bは 4.2×10^{-6} cm/sから 1.1×10^{-8} cm/sであった。
- ⑤ 注入溶液の粘性と一定時間当りの注入量の関係から、注入水付近への目づまり状況の推定を行った。

6.2 今後の課題

今回実施したグラウト試験は、実岩盤条件下での粘土系グラウトの基本性能を把握する目的において、注入濃度に関する知見は得られたものの、パラメータの設定範囲が狭いことから必ずしも定量的な評価を行うまでのデータは得られず、定性的な評価に留まる結果となった。そこで、定量的な評価を行い、より高度な基本性能を得るため、以下のような課題があげられる。

- ① 今回の設定範囲では、亀裂群A、Bどちらの場合においても注入濃度と注入効率は線形関係範囲内であり、注入効率の最適化についてさらに検討するためには、より範囲を広げたパラメーター(注入濃度、注入時間)試験を実施する必要がある。
- ② グラウト注入による止水効果の安定性を確認するために、1年経過後及び2年経過後に低圧ルジオン試験、並びに孔間トモグラフィ(電磁波、比抵抗)測定を実施する必要がある。さらに、岩盤を水を使わずに掘削してグラウト材料の注入状況を直接

的に確認することも充分考えられる。

- ③ 今回は、亀裂群 A, B というように試験区域が限定されているが、より現実的な広範囲でのグラウト試験の実施が不可欠である。

また、本試験ではトモグラフィーによるグラウトの浸透範囲の検出を試験的に行ったが、電磁波トモグラフィーにおける速度の低下と比抵抗トモグラフィーにおける比抵抗の低下は検出されたものの、実際の浸透範囲を直接的に確認したわけではない。これまでの海外におけるグラウト試験では、グラウト施工後に岩盤を剥がし実際にグラウトの浸透を直接観察している例もあるが、粘土系グラウトの場合は、水を使用した掘削では浸透した粘土が流出してしまう恐れがあり、この手法は現実的に難しい。したがって、今回実施したトモグラフィー測定のような間接的手法を用いることは止むを得ないと思われる。但し、トモグラフィーにおいてグラウトの浸透範囲が検出できたとしても、グラウトの浸透とグラウト注入による岩盤内亀裂の透水性の改善とはイコールではないことに留意すべきである。

いずれにせよ、今回の原位置試験は粘土系グラウトの基本性能の一部を確認したに過ぎず、原位置への適用に際しては適用目的、範囲の設定も念頭に置いた詳細検討が必要となろう。

参考文献

- 1) 福田和寛：花崗岩中のトンネル掘削に伴う岩盤挙動と物性変化，第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，p. 231～236 (1990)
- 2) Gray, M. N. : OECD/NEA INTERNATIONAL STRIPA PROJECT Overview Volume III, Engineered Barriers, SKB, Stockholm (1993)
- 3) 全国標準積算資料 (社)全国地質調査業協会連合会，第3章 グラウト工事編，p. 43～159 (1993)
- 4) 日比谷啓介，稲生道裕，升元一彦：電磁波トモグラフィーによる岩盤内の含水状態評価について，第25回岩盤力学に関するシンポジウム，p. 256～260 (1993)
- 5) 天野雄二，田辺一夫：岩石の電磁波伝播定数に及ぼす水分の影響，物探学会第86回學術論文集，p. 421～425 (1992)
- 6) 千葉昭彦，熊田政弘：花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定 - 間隙水の比抵抗が岩石比抵抗に及ぼす影響について - ，物理探査，47(3)，p. 161～172 (1994)
- 7) Archie, G. E. : The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, Trans. Amer. Inst. Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Vol. 146, p. 54～67 (1942)
- 8) 動力炉・核燃料開発事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 - 平成3年度 - (1992)
- 9) 地下水ハンドブック 建設産業調査会，第3章 地下水水理，p. 65～117 (1989)
- 10) 小島圭二，神尾生雄，石橋弘道，内山成和，斉藤秀樹，島裕雅：ジオトモグラフィーによる岩盤の画像化(その1)，応用地質，30(3)，p. 1～10 (1989)
- 11) 小峰秀雄，西好一，後藤和生：比抵抗トモグラフィーを利用した薬液注入の改良範囲評価方法，土木学会論文集，493，Ⅲ-27，p. 137～146 (1994)
- 12) 戸井田克，升元一彦，日比谷啓介：比抵抗トモグラフィーによる塩水トレーサーを用いた岩盤内水みち調査，第27回岩盤力学に関するシンポジウム，p. 391～395 (1996)