

ジオトモグラフィ手法による ダムサイトにおけるグラウチング効果の判定

藤山 敦・西園政則・吉田真一
佐々木利明・太田 尚

Using Geotomography to Check Effectiveness of Grouting at Dam Site

ATSUSI FUJIYAMA, MASANORI NISHIZONO, SHINICHI YOSHIDA,
TOSHIAKI SASAKI and HISASHI OHTA

Abstract

Testing was conducted to determine the possibility of using elastic wave velocity tomography and resistivity tomography to determine the effectiveness of grouting. The tests provided detailed and clear observational data on changes that occurred after grouting was completed, in the form of increased elastic wave velocity values and decreased resistivity values in the rock ground throughout the observed area. This is an objective type of test procedure, unlike prior methods such as the one using Lugeon testing that rely on the judgement and experience of the person conducting the tests.

The link between increases in elastic wave velocity and improved sealing effectiveness assumes that the latter can be studied using Wyllie's time averaging equation. This equation is applied to a model of a mountainous region that consists of a rock-ground area having no cracking and an area in which cracks filled with grouting and underground water are present. The equation allows for volumetric ratio of the area.

Testing confirmed that elastic wave velocity increased and became heterogeneous. When the area of improved sealing effectiveness surpassed 60%, elastic wave velocity increase ratio of 5% and above were shown. Elastic wave velocity increase rates were confirmed in areas where velocities were less than 4.0 km/sec before grouting, but disappeared in areas of 3.0 km/sec. The average velocity was about 4.1 km/sec. It was found that the relationship between the velocity values before and after grouting (X and Y) can be expressed as a regressive equation using actually measured values:

$$Y=0.54X+2.18 \quad (\text{range of } X:1\sim 4\text{km/sec})$$

This means that grouting improved the elastic quality of the rock, with rock having velocities of less than 2.2 km/sec (corresponding to class C_L) changed almost completely to a higher grade. Also the values from the regressive equation correspond very well with those from the time averaging equation (regressive equation values are 90~95% those the time averaging equation).

The study of improvement of sealing effectiveness using resistivity assumes that the difference between resistivity values for granite (4,000~8,000 ohm-m) and grout (35~40 ohm-m) is great enough to make it possible to estimate the range of penetration of the grout.

The following equation was used to determine resistivity (ρ_g) of rock after grouting

$$\rho_g = \rho_0 \cdot \rho_c / \rho_w$$

where ρ_0 is resistivity of rock that is saturated with water, ρ_c is resistivity of the grout material and ρ_w is resistivity of the underground water.

Over 60% of the improved area showed more than a 2% decline in resistivity due to grouting.

These experiments were conducted in an area of granite having a relatively simple geological structure that can be considered to have provided close to ideal conditions for our determination of the effectiveness of grouting.

1 まえがき

ダム建設の際に行われるコンソリデーショングラウチングは、基礎岩盤の変形性の改良をはかり、荷重の伝達を円滑にすることを目的としている。とりわけ、アーチ式コンクリートダムにおいては、基礎岩盤に大きな荷重が作用するために、基礎と堤体を確実に一体化させることを目的として、1次コンソリデーショングラウチングに加えて、2次コンソリデーショングラウチングを施工する。

一般に、コンソリデーショングラウチングの効果は、ルジオン値および注入セメント量から判定するほか、グラウチング前後の密度変化や孔内載荷試験による変形性の変化として測定することがある（(財)国土開発技術研究センター, 1983）。しかし、グラウチングによって岩盤がどの程度改良されたかを明確にすることは極めて難しく、一般的には、上述のような試験の結果に基づいて、土木技術者が追加施工を必要とするかなどの判定を行っているのが現状である。

このような現況にあるとはいえ、グラウチングの効果の判定に、弾性波速度の変化や電気比抵抗の変化を利用する実験・研究が報告されている。増田（1961）は、屈折波法や直接波法によってグラウチング前後の速度の変化を精密に測定して、速度の増加状況を検討することは、岩盤改良効果の判定に役立つことを述べている。また、工藤（1963）は、グラウチングに伴う弾性波の速度変化について定量的解釈を行っている。吉住（1972）は、電気比抵抗の変化によってグラウチング効果の判定を行い、注入範囲の調査に有効であることを報告している。

最近においては、ジオトモグラフィによる計測解析が地盤内部の物性値やその分布を求めるために利用されるようになり（小島ほか, 1989）、服部ほか（1990）は、この手法によって、グラウト注入範囲の調査を行っている。このジオトモグラフィによる方法は、従来の手法に

比べて、グラウチング効果の判定が面的、かつ、定量的に把握できる利点がある。

したがって、筆者らは、ダム基礎に対するコンソリデーショングラウチングの効果の判定に、ジオトモグラフィを適用することは有効であると思われた。

この報文は、アーチダムの建設が計画されている地点のテストヤードにおけるコンソリデーションの試験グラウチングに対する効果の判定に、弾性波速度および電気比抵抗の両者によるジオトモグラフィを実施した結果をまとめたものである。

2 テストヤードの概要

2・1 岩盤状況

テストヤードを含むダムサイトには、流心方向に平行な NW-SE 系の断層ならびに共役関係にある N-S 系の断層、さらに、NE-SW 系の 3 系統の断層が存在する。これらの断層の近傍では、花崗岩が熱水変質を受け、マサ化しているか、あるいは、極めてクラッキーな状態になっている。このような岩盤状況であるために、ダムの基礎岩盤としての安定性を確保することを目的として、コンソリデーショングラウチングによる補強が計画されている。したがって、テストグラウチングも上記の断層を含む範囲に設定された（図-1 参照）。

テストヤード内の岩盤状況は、その大半は、岩塊は堅く、割れ目間隔が 20~50cm 程度の C_M 級岩盤で占められているが、ヤード中央部に上下流方向に延びる NW-SE 系の断層があり、断層の周辺はクラッキーな C_L 級岩盤が主体となっている。表-1 に、岩盤等級区分基準を示す。また、テストヤードの直ぐ近くにも、この断層に平行する断層が存在する。したがって、本テストヤードは NW-SE 系の断層に挟まれた区域となっている。これらの平行する断層の間には、NE-SW 系の走向を示す高角度節理が発達している。

探査測線は、2次コンソリデーショングラウチング 1

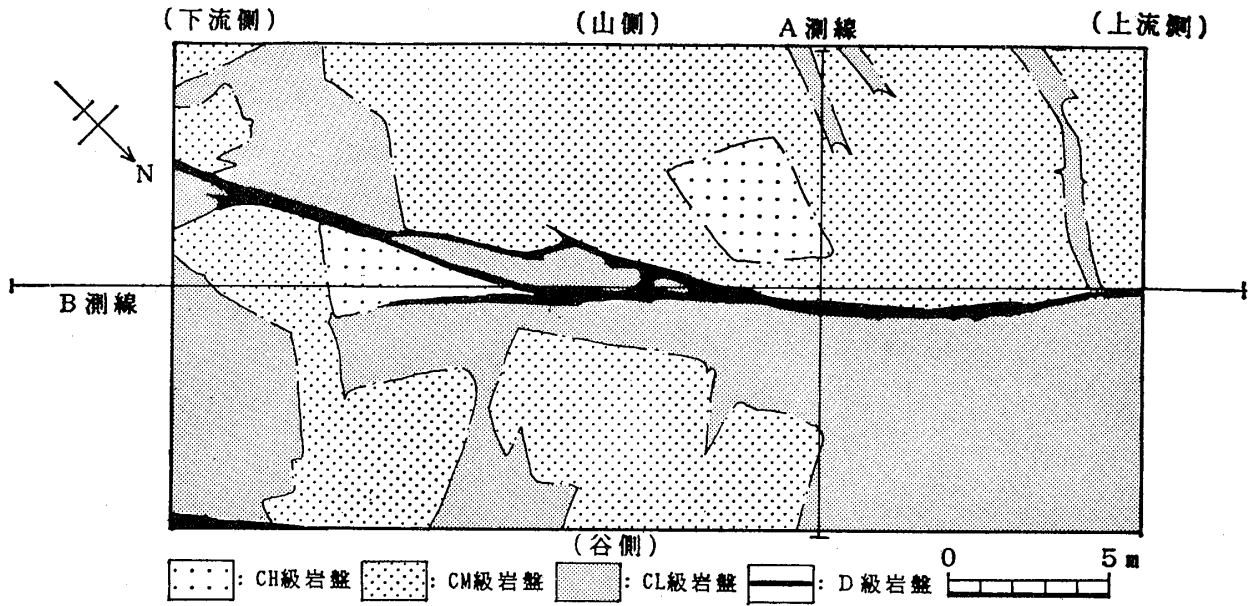


図-1 テストヤードの岩盤等級区分 (平面図)
Fig.1 Grades of rock in test yard (plane view)

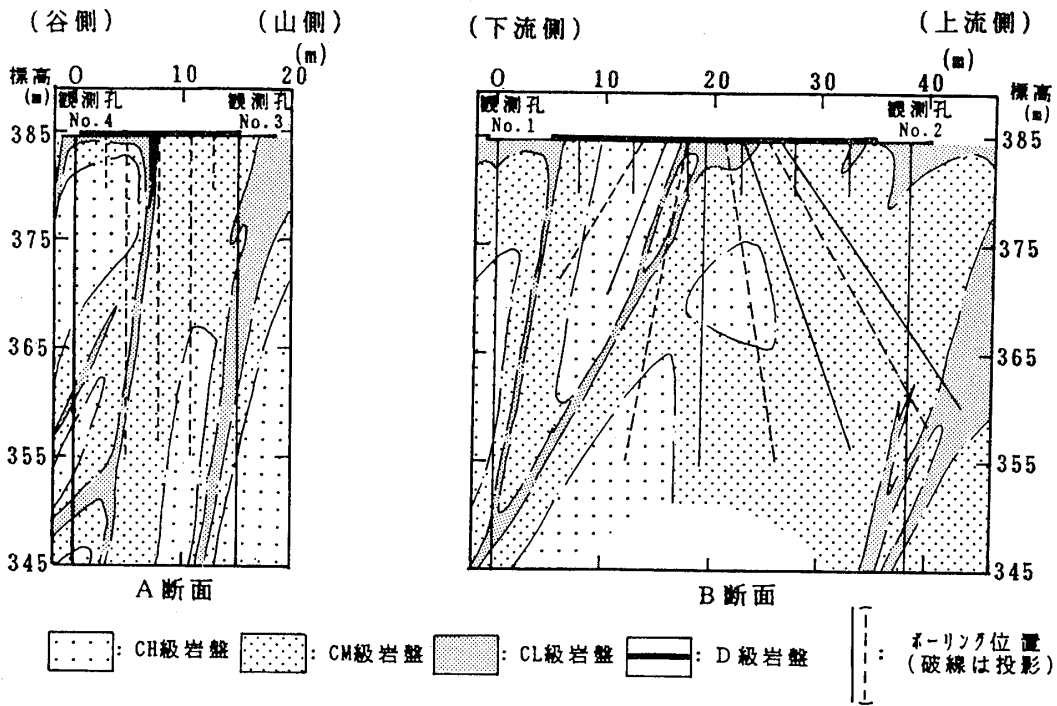


図-2 テストヤードの岩盤等級区分 (断面図)
Fig.2 Grades of rock in test yard (profile)

次リング上 (B測線) およびそれに直交して設定した測線 (A測線) の2本である。したがって、A測線は、断層にはほぼ直交し、B測線は、NW-SE系断層と平行するものとなった。両測線の岩盤等級区分断面図を示すと、図-2に示すようになる。

(1) A測線断面の岩盤状況

A測線断面においては、NW-SE系断層を中心にし

て、その両側にそれにほぼ平行な2条の断層を確認しており、いずれも高角度で谷側に傾斜している。断層の規模は、ヤード中央の断層が、幅約50cmの破碎帯を有するのに対し、山側に分布する断層は、中央の断層に較べると、相対的に破碎帯幅が広がっている。ただし、谷側に分布する断層については、テストヤードの外側に位置しており、未調査のためその詳細は不明である。

表-1 岩盤等級区分基準表
Table 1 Rock grade standards

岩盤区分	一般特徴		露頭観察		横坑観察		ボーリングコア観察			弾性波速度 km/sec 1 2 3 4	ルジオン 値の範囲	代表的細区分 の組み合わせ	
	節 間隔(cm)	性状	節 間隔(cm)	性状	理 ^{*2} 性状	ヘア ク クの 性状	反発度 ^{*3}	コアの 形状	平均 コア長 (cm)			RQD (%)	横 坑
A	(100以上) ^{*1}	(完全密着)	100以上	完全密着	極めてわずかに完全密着	40以上	棒状	100	90以上	1 5 10 15	A I a	a 1	
B	(50~100) ^{*1}	(密着)	100~50	完全密着	極めてわずかに完全密着	30以上	棒状	50	100~50		A II a	a 1	
C	50~20	密着(部分的に開口部がある)	50~20	完全密着	集中箇所 点密着	50~20	棒状 一部 菱形状	10	50~30		A II b	a 1 a 2	
													新鮮堅硬岩主体。割れ目沿いに風化変質が容易に割れない
C _M	20~5	開口気味 粘土シーム 挟在	20~5	幅1~5cmの粘土シーム。風化変質は流入粘土挟在	比較的多くあり、開口気味あり	40~20	菱形状 角礫状	10以下	30~0		B II b B III b B I c	b 2 b 3	
													新鮮堅硬岩主体。割れ目沿いに風化変質が容易に割れない
D	5以下	開口または粘土物質挟在	5以下	マサ岩	開口状。風化変質著しい	20以下	角礫状 砂状 粘土状	0			B II c C I c	c 3 c 4 c 5	
													新鮮堅硬岩主体。割れ目沿いに風化変質が容易に割れない

*1 ()内は、露頭ではほとんどみられない。
 *2 節理と称するものは長さ1m以上にもの。
 *3 シュエミットハンマーの反発度。
 注：岩質は次の2群に区別される(一般には、(2)群の岩相が(1)群に比し硬質。
 (1) 中〜粗粒花崗岩、斑状花崗岩などの中〜粗粒相。
 (2) 細粒花崗岩(アプタイト)の細粒相。

これらの断層に挟まれた部分は、 C_M 級岩盤が主体であり、部分的に C_H 級岩盤となっている。

(2) B測線断面の岩盤状況

B測線断面は、ヤード中央のNW-SE系断層にほぼ平行する断面である。したがって、本来は高角度断層であるヤード中央の断層が、見掛け上緩やかな傾斜となって表されている。また、この断層がアンジュレーションを有する断層であり、本測線と2度交差するため、断面上にも2ヶ所に現れる。

岩盤は C_M 級岩盤を主体とするが、断層に近接する断

面であることから、この断層との位置関係で岩盤状況が変化する。すなわち、下流側は、断層が測線から離れていく傾向にあるため、相対的に岩盤が良好となり、 C_H 級岩盤が分布する。また、上流側はNE-SW系のシームおよび節理の影響を受け、 C_L 級岩盤の幅が相対的に広がっている。

2・2 グ라우チング孔の配置と測定計画

グラウチングによる断層周辺の改良効果を検討することを目的としているので、テストヤードの中央部にNW

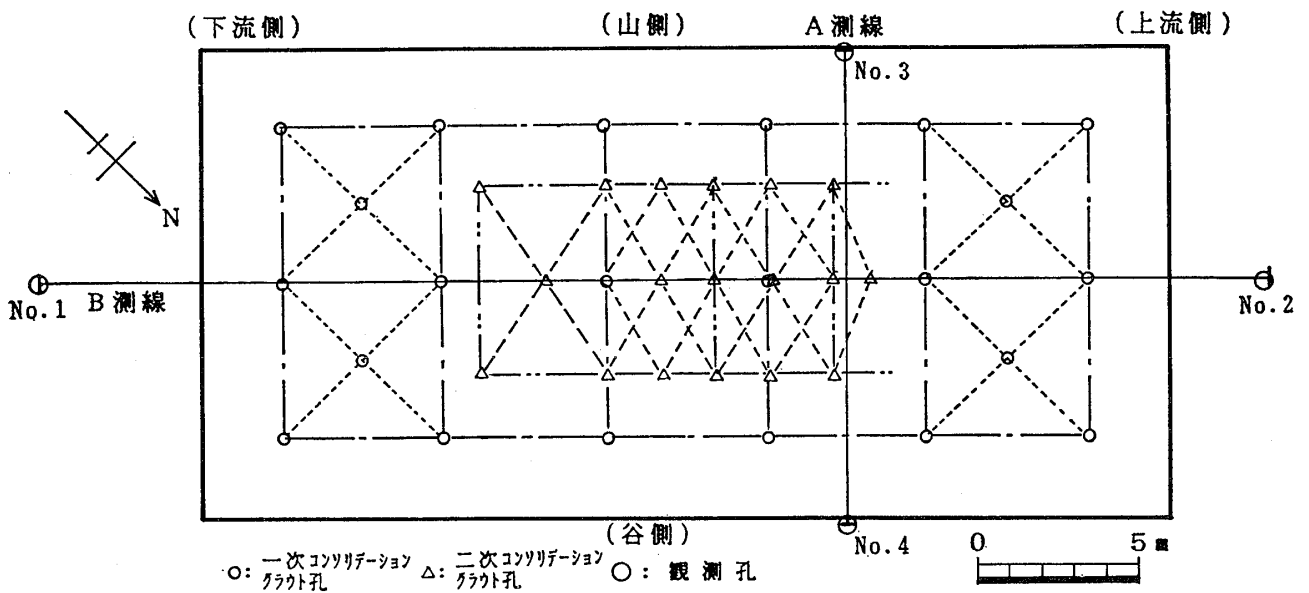


図-3 グ라우チング孔の配置 (平面図)
Fig. 3 Location of grouting holes (plane view)

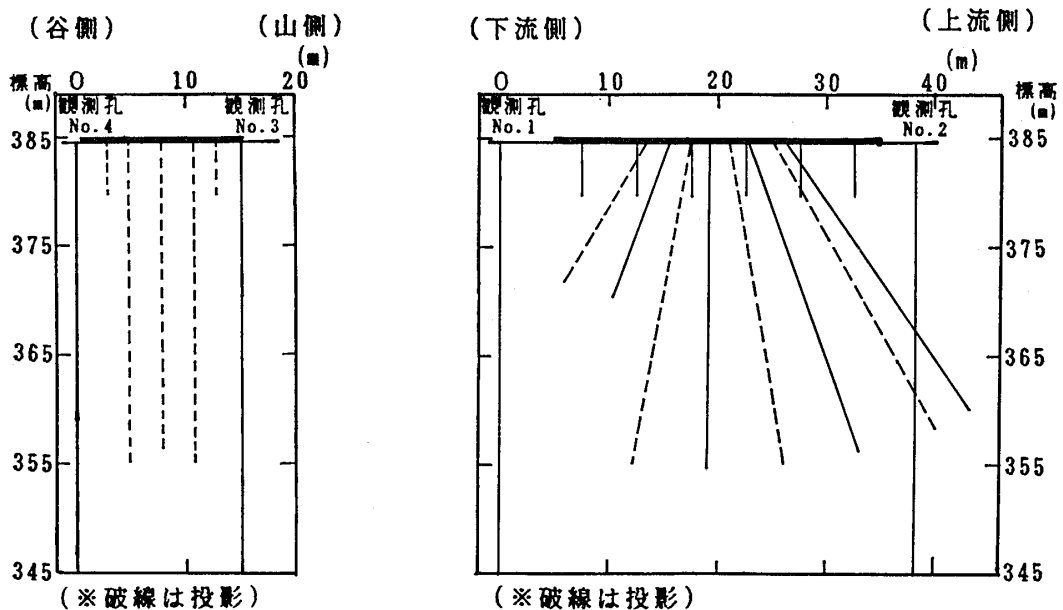


図-4 グ라우チング孔の配置 (断面図)
Fig. 4 Location of grouting holes (profile)

-SE系の断層が存在するような位置にヤードを選定した。その形は、幅15m×長さ30mの長方形である。

図-3に示すように、このヤード内において、1次コンソリデーショングラウチングのために18孔(延べ深度90m)、2次コンソリデーショングラウチングのために12孔(延べ深度315m)のボーリングが施工された。

当該ダムでは、2次コンソリデーショングラウチングおよびカーテングラウチングは、堤体内の監査廊あるいは上流フーチング部からの施工となる。このために、2次コンソリデーショングラウチングにおいては、改良範囲の面的な広がり確保のために、各点から上下流方向へ扇型にグラウチング孔を展開し、おおむね深度30mまでを改良対象範囲とする計画である(図-4参照)。また、グラウト材料には、高炉B種セメントを使用し、改良目標値(2次コンソリデーショングラウチング後)として5Lu以下を設定している。したがって、テストグラウチングにおいては、上記の仕様でグラウチングが施工された。

このテストグラウチングにおける改良効果の判定のため

に、上下流に広がる扇型のグラウチング孔に沿う断面を対象としてB測線を、また、それに直交する方向にA測線を設定した。また、改良対象深度がおおむね30mであることから、観測深度は、測定精度を考慮して、深度40mとし、各測線の両端に測定孔を掘削した。

3 ジオトモグラフィのための調査および解析

グラウチングによる岩盤の改良効果の判定のために実施したトモグラフィ手法は、弾性波速度トモグラフィと比抵抗トモグラフィの2つの方法である。改良効果の判定が目的であることから、ジオトモグラフィ解析のための測定は、1次グラウチング施工前および2次グラウチング施工後の2回実施し、その結果の比較を行なうこととした。したがって、グラウチング前後における測定は同一の仕様で行なった。

3・1 弾性波速度トモグラフィ

図-5は弾性波速度トモグラフィの測定概念図であ

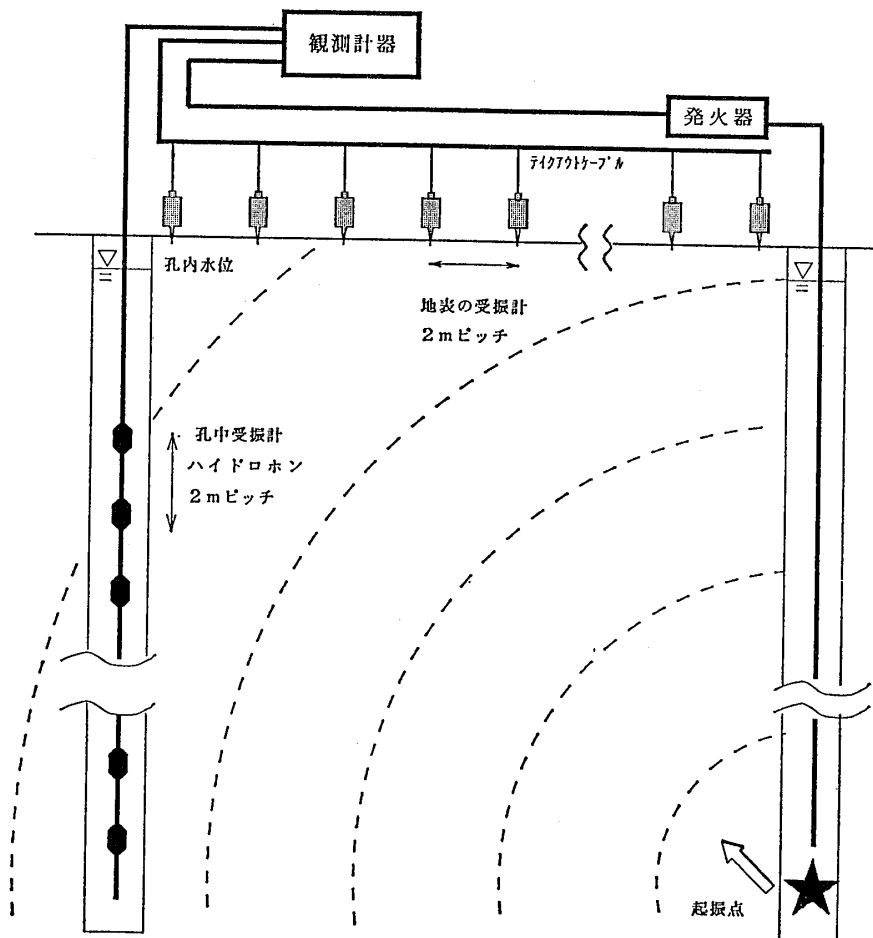


図-5 弾性波速度トモグラフィのための測定概念図

Fig.5 Outline of measurement by elastic wave velocity tomography

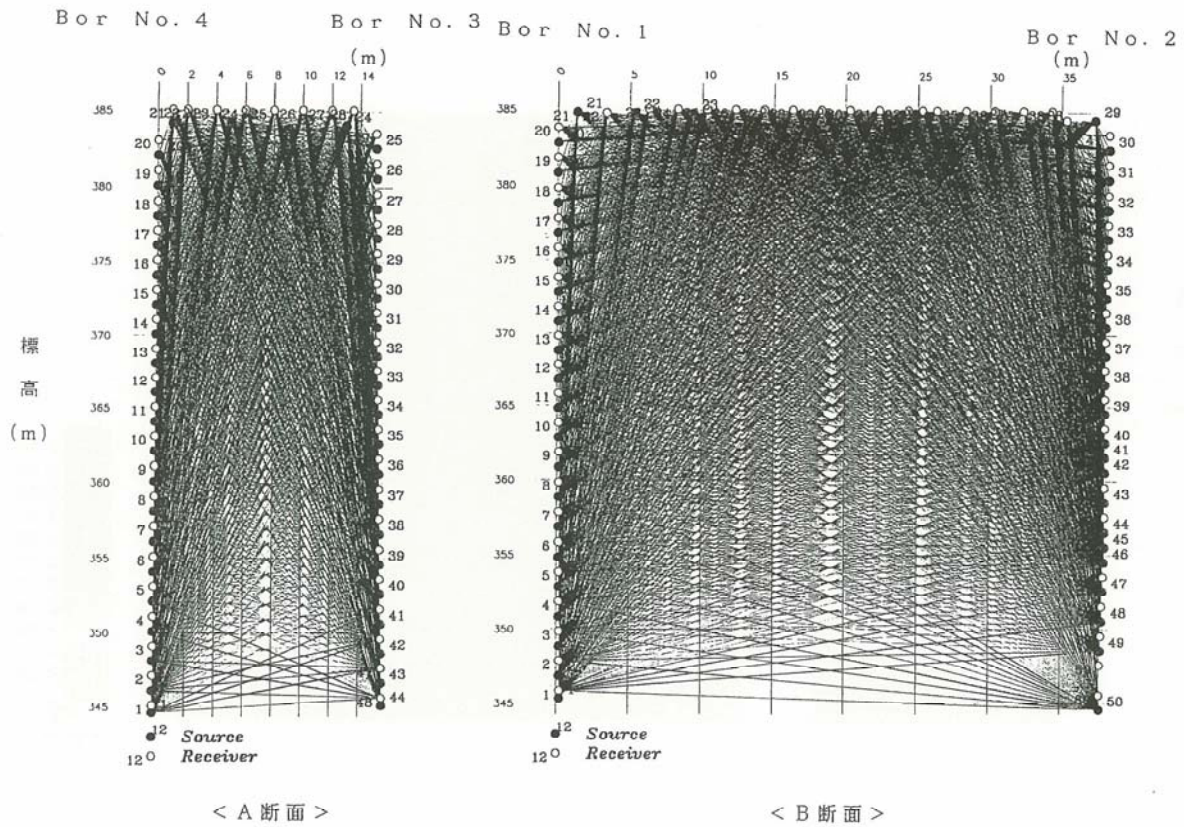


図-6 弾性波速度トモグラフィのための測定パターン
 Fig.6 Patterns of measurement by elastic wave velocity tomography

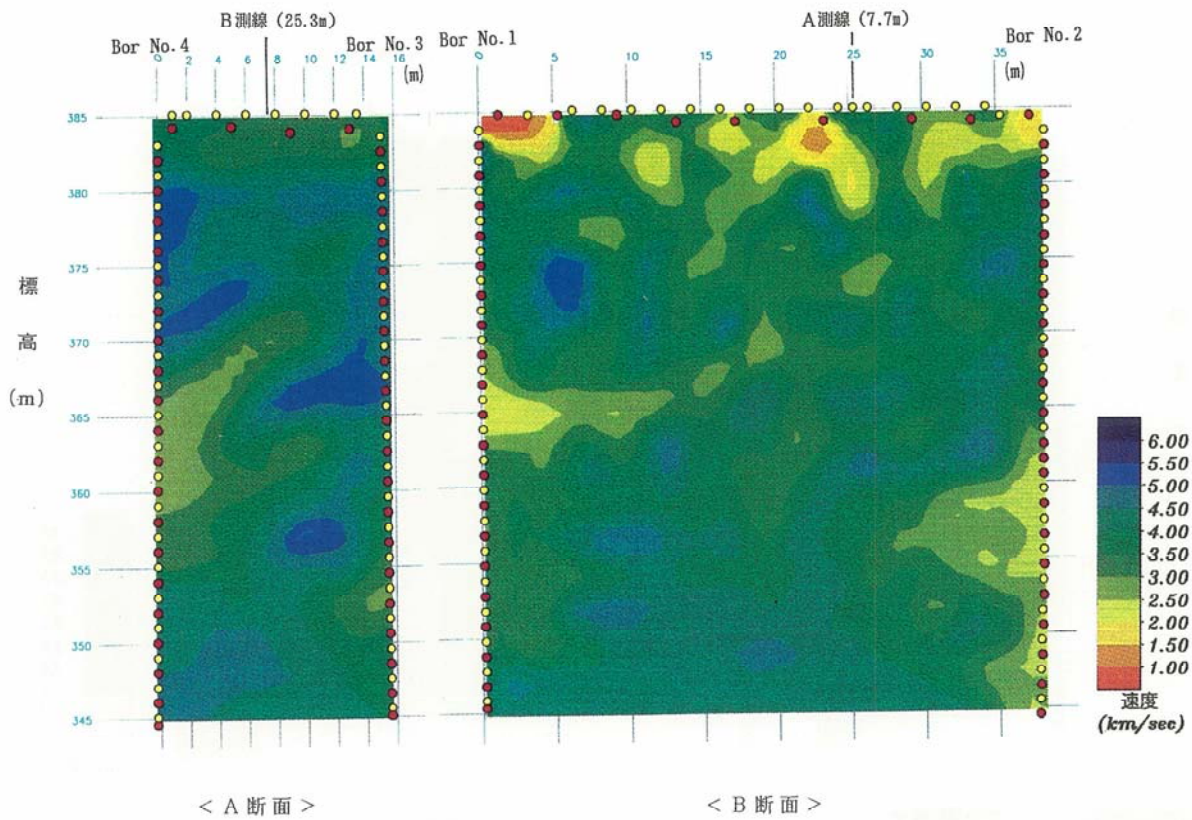


図-7 弾性波速度トモグラフィ解析結果 (グラウチング前)
 Fig.7 Elastic wave velocity tomography analysis results (before grouting)

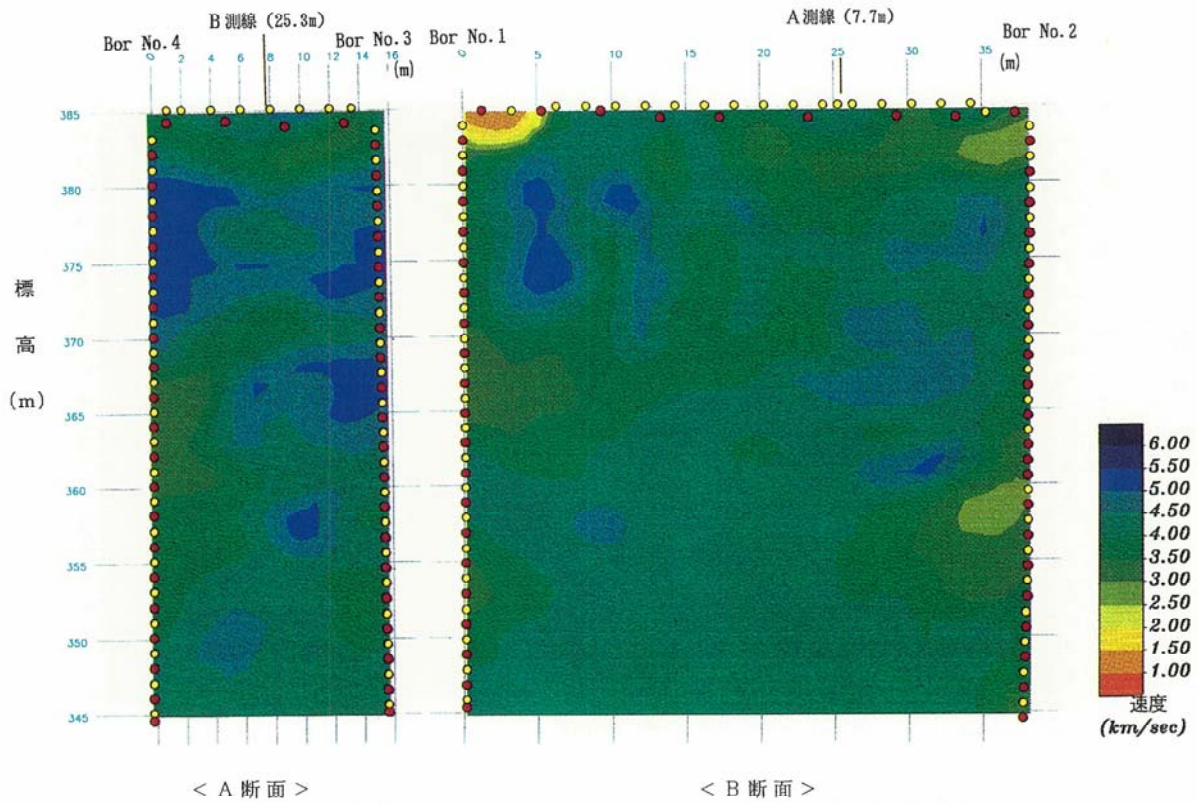


図-8 弾性波速度トモグラフィ解析結果 (グラウチング後)
 Fig.8 Elastic wave velocity tomography analysis results (after grouting)

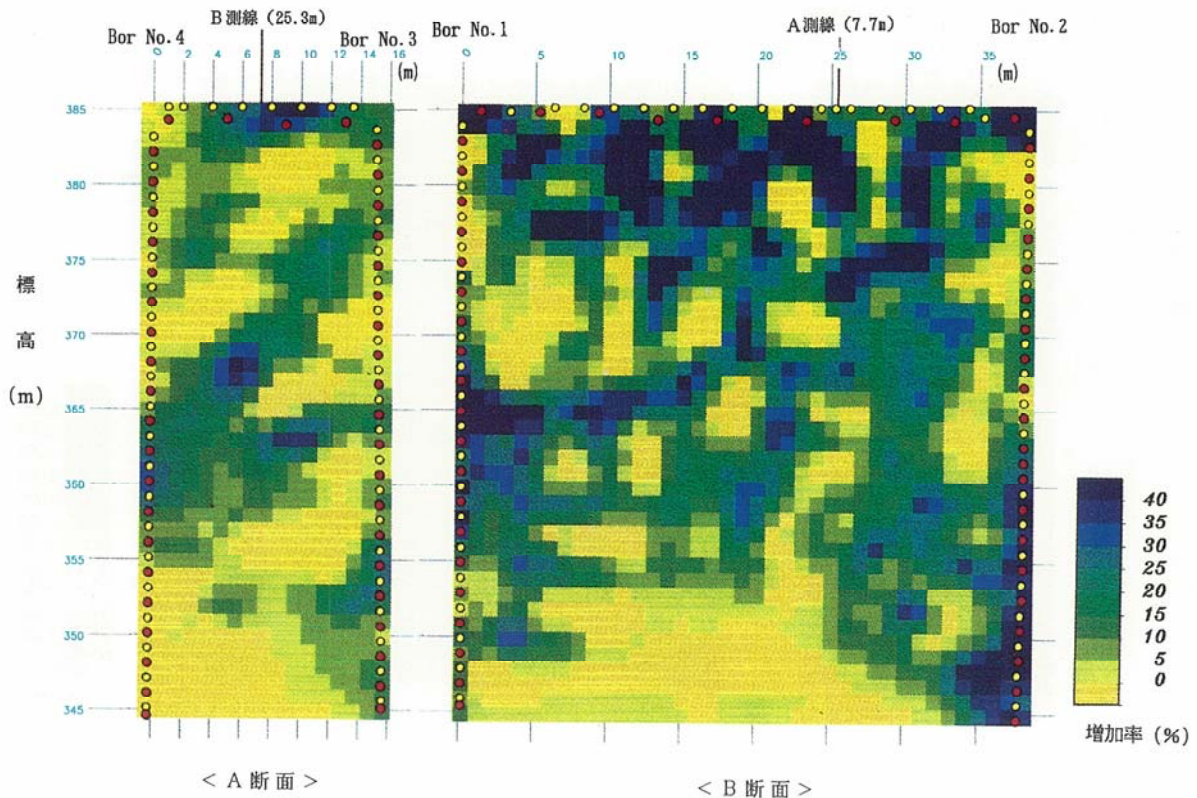


図-9 グ라우チング後の弾性波速度の増加率の分布
 Fig.9 Distribution of elastic wave velocity increase ratios after grouting

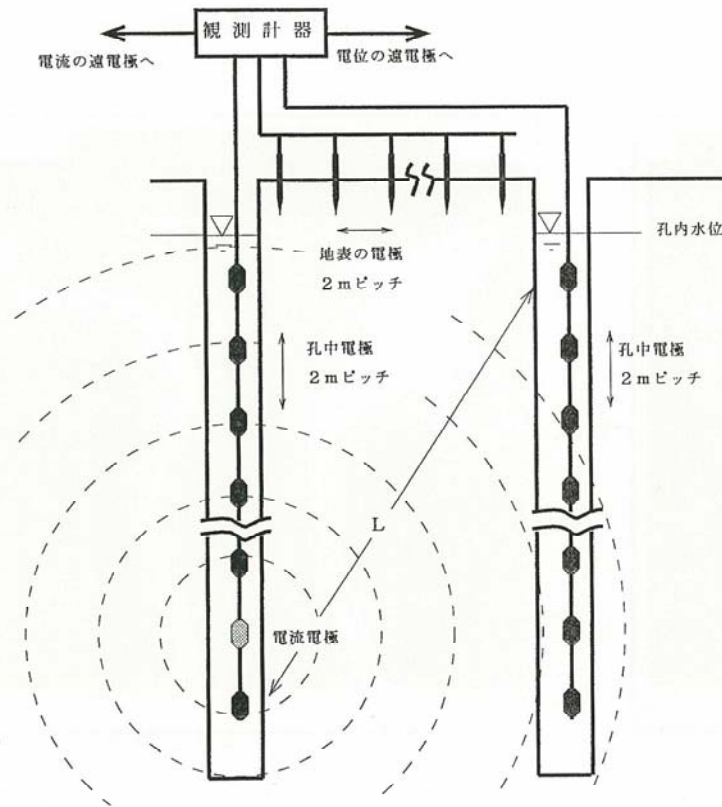


図-10 比抵抗トモグラフィのための測定概念図
Fig.10 Outline of measurement by resistivity tomography

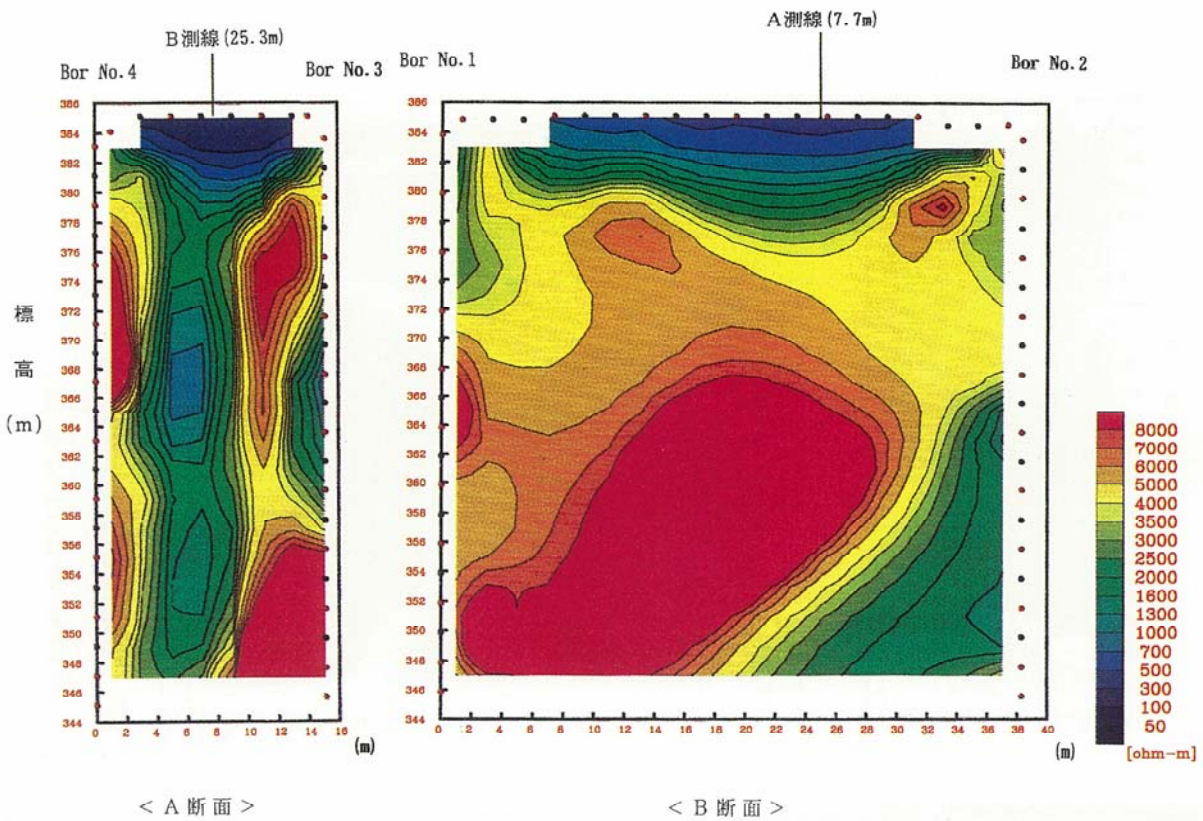


図-11 比抵抗トモグラフィ解析結果 (グラウチング前)
Fig.11 Resistivity tomography analysis results (before grouting)

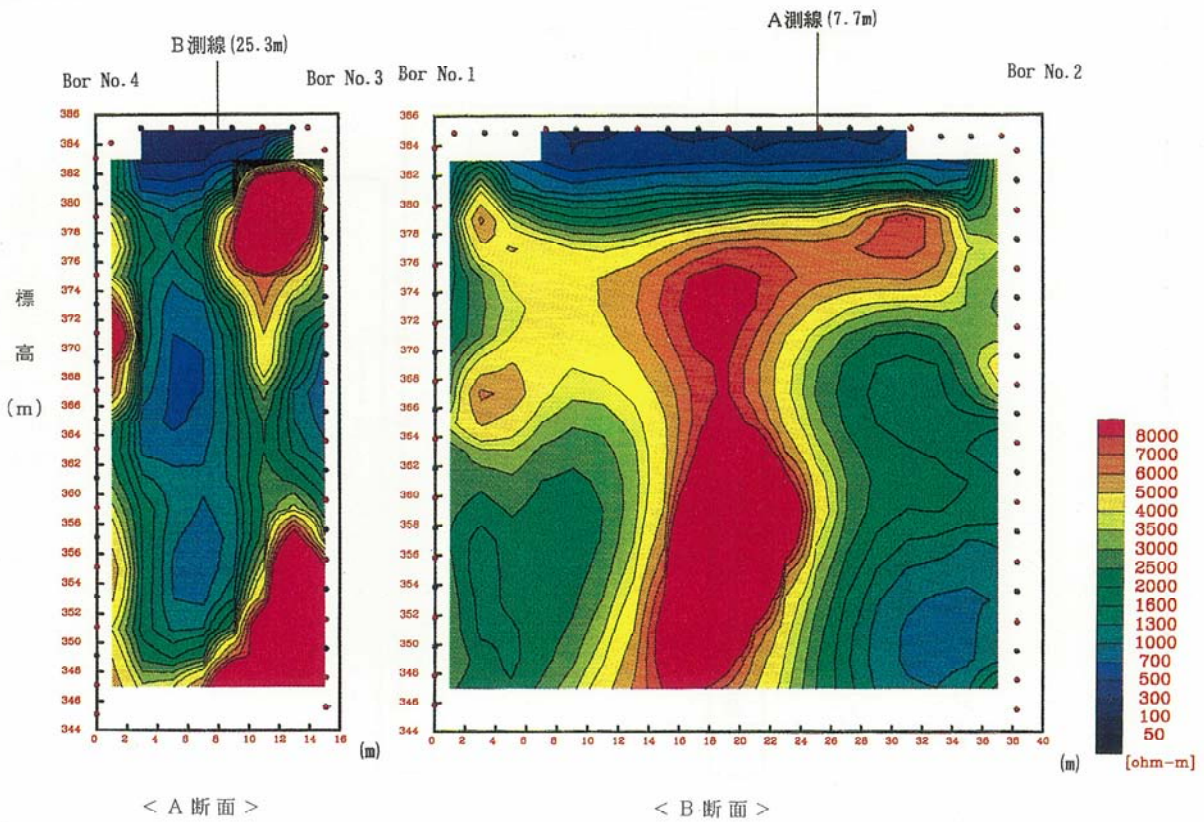


図-12 比抵抗トモグラフィ解析結果 (グラウチング後)
 Fig.12 Resistivity tomography analysis results (after grouting)

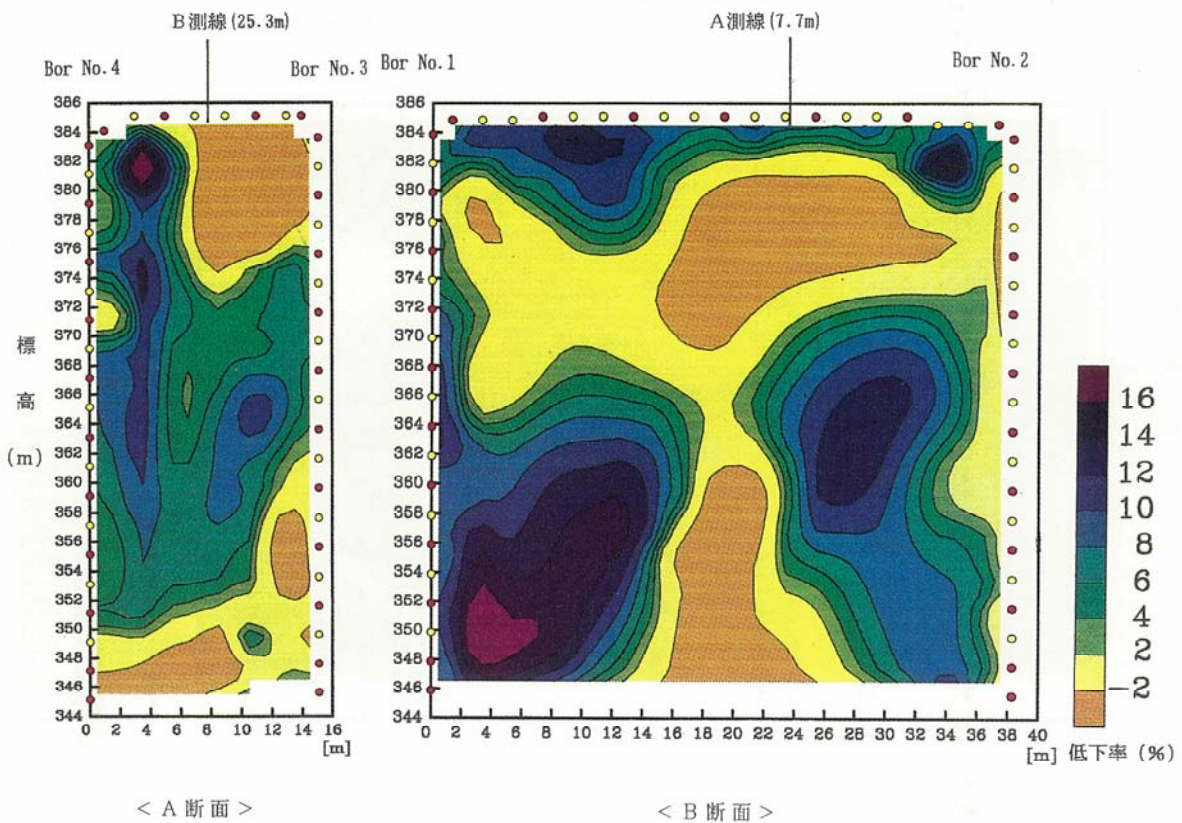


図-13 グ라우チング後の比抵抗の低下率の分布
 Fig.13 Distribution of resistivity decrease ratios after grouting

る。

起振方法は、ごく少量の爆薬を使用した。起振点がカバーコンクリート上となるところでは、コアドリルを用いて地山に達するまで削孔した。受振には、地表部では固有周波数28 Hzの受振計を使用し、観測ボーリング孔中ではハイドロフォン（音圧受振計）を使用した。

起振点間隔は、孔中では2 m、地表では4～6 mとした。また、受振点間隔は2 mとし、起振点と受振点の間隔は1 mとした。

各測線における起振点と受振点の位置および観測パターンは、図一6に示すとおりである。なお、観測時の計器の主な設定値は、以下のとおりである。

- ・サンプリングタイム : 0.04 msec
- ・データ収録時間長 : 40.96 msec
- ・ローカットフィルター : 10 Hz
- ・ハイカットフィルター : 1000 Hz

解析には、断面を1片2 mの正方形セルに分割し、各セルの速度を計算し、速度の分布を求めた。各セルの速度は、反復法解析によって求めた。なお、今回の解析では、セルの位置を1 mずらしたものについても速度を計算し、それら両者を合成し、最終的には、1片1 mの正方形セルの速度分布を求めた。

(1) グ라우チング前の弾性波速度分布

弾性波速度トモグラフィによるグラウチング前の弾性波速度分布は、図一7に示すとおりである。

A断面においては、全体的には3.0～4.0 km/secの速度を示しているが、地表付近、No. 3孔の標高350～355m付近およびNo. 4孔の標高360～365m付近には、3.0 km/sec以下の速度を示す箇所が分布している。

B断面においては、全体的には3.0～4.0 km/secの速度を示しているが、地表付近（標高380m～385m）、No. 1孔の標高365m付近およびNo. 2孔の標高345～360m付近には、3.0 km/sec以下の速度を示す箇所が分布している。

テストヤードにおける岩盤スケッチおよびボーリングコア観察に基づいた地質観察によると、試験箇所の岩盤は、C_M級岩盤が主体であり、部分的には、C_H級岩盤が分布していることが確認されている。また、断層沿いの箇所は、C_L級岩盤となっていることが確認された。弾性波速度トモグラフィ解析の結果は、おおむね、この岩盤状況と調和的であった。

(2) グ라우チング後の弾性波速度分布

グラウチング後の弾性波速度分布は、図一8に示すとおりである。

A断面においては、3.0 km/sec以下の速度を示す箇所

は消滅し、全体的に3.0～5.0 km/secの速度分布を示している。

B断面においては、3.0 km/sec以下の速度を示す箇所が、No. 1孔の表層付近、No. 2孔の表層付近およびNo. 2孔の標高360 m付近にわずかに認められるが、全体的には、3.0～5.0 km/secの速度分布を示している。

(3) グ라우チングによる弾性波速度の増加率分布
グラウトによって地盤内の空隙が充填されることによる弾性波速度の増加率(α)を次式のように定義する。

$$\alpha(\%) = \frac{V_g - V_0}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

ここに、V₀ : グ라우チング前の弾性波速度

V_g : グ라우チング後の弾性波速度

(1)式によって求めた各セルの弾性波速度の増加率分布は、図一9に示すとおりである。

A断面においては、グラウチングの対象範囲（深度30 mまで）である標高355m以浅においては、全体的には5～20%程度の増加率を示している。とくに、グラウチング前の弾性波速度が3.0 km/sec以下であった箇所（地表付近、No. 3孔の標高350～355m付近およびNo. 4孔の標高360～365m付近）においては、20～40%の増加率を示している。

B断面においては、グラウチングの対象範囲（深度30 mまで）である標高355m以浅においては、全体的には10～30%程度の増加率を示している。とくに、グラウチング前の弾性波速度が3.0 km/sec以下であった箇所（地表付近、No. 1孔の標高365m付近およびNo. 2孔の標高345～360m付近）においては、A断面の場合と同じように、30%以上の増加率を示している。

3・2 比抵抗トモグラフィ

図一10は、比抵抗トモグラフィの測定概念図である。

電極は、ボーリング孔内と地表に2 m間隔で配置し、電極設置点がかバーコンクリート上となる箇所では、地山に達するまで削孔して、電極棒を設置した。通電は2 m間隔で行い、他の全ての電極で電位を測定した。

また、各測線における電極設置位置および観測パターンは、基本的には弾性波速度トモグラフィの場合と同様にした。

解析は、断面を1片2 mの正方形セルに分割し、各セルの比抵抗を計算し、比抵抗の分布を求めた。各セルにおける比抵抗は、反復法解析によって求めた。

(1) グ라우チング前の比抵抗分布

比抵抗トモグラフィによるグラウチング前の比抵抗分

布は、図-11に示すとおりである。

A断面においては、断面の中央付近に、比抵抗が1,000~2,000Ω-mを示す顕著な低比抵抗のゾーンが上下方向に分布し、その左右側方は、4,000~8,000Ω-m以上の比抵抗を示している。

B断面においては、全体的に4,000~8,000Ω-mの比抵抗を示しているが、No.2孔の標高365m以深には1,000~2,000Ω-mの低比抵抗ゾーンが分布している。

地質観察の結果および露頭における比抵抗測定の結果を総合すると、比抵抗が4,000Ω-m以上を示すA断面の周辺部およびB断面の大部分は、比較的割れ目が少なく、新鮮・堅硬な岩盤状況にあると推察される。

また、地質観察によって、ヤード中央部を上下流方向(NW-SE)に延びる傾斜がほぼ鉛直の断層と、これと平行な断層沿いの箇所、C_L級岩盤が分布していることが確認されている。

以上のことから、A断面の中央付近に分布する低比抵抗ゾーンは、断層に内在する粘土や断層沿いの割れ目に存在する地下水の影響によって、他の箇所よりも相対的に比抵抗値が低くなっているものと推察される。

なお、地表付近の1,000Ω-m以下の値を示す低比抵抗ゾーンは、カバーコンクリートの影響によるものと推察される。

(2) グラウチング後の比抵抗分布

グラウチング後の比抵抗分布は、図-12に示すとおりである。

A断面は、中央付近の上下方向に、低比抵抗ゾーンがあり、その左右側方に、高比抵抗値が分布するという形状は変わらないが、全体的には、2,000Ω-m以下の比抵抗値を示す範囲が増加し、4,000Ω-m以上の比抵抗値を示す範囲が減少している。

B断面は、4,000Ω-m以上の値を示す範囲が減少し、断面の上流側および下流側の標高370m以深の観測領域において、グラウト前に比べて、1,000~3,000Ω-mの値を示す範囲がより広く分布している。

(3) グラウチングによる比抵抗の低下率

グラウチングによって地盤内の間隙が充填されることによる比抵抗の低下率(β)を次式のように定義する。

$$\beta(\%) = \frac{\log \rho_0 - \log \rho_g}{\log \rho_g} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 ρ_0 : グラウチング前の比抵抗

ρ_g : グラウチング後の比抵抗

(2)式によって求めた各セルの比抵抗の低下率分布は、図-13に示すとおりである。

A断面における比抵抗の低下率は、おおむね4~10%を示している。

B断面における比抵抗の低下率は、おおむね4~16%を示し、とくに、No.1孔付近の標高360m以深およびNo.2孔側の標高365m付近における比抵抗の低下が著しく現れている。

4 弾性波速度による改良効果の検討

4・1 グラウチングに伴う弾性波速度変化の試算

地山のグラウチング後における弾性波速度の変化を定量的に求めるためには、弾性波速度が異なる薄層が分布する場合、その弾性波速度を求める方法に準じて行うことになる。

薄層が分布する場合の弾性波速度を求める方法については、Wyllieの時間平均式(Wyllie et al., 1956)が、一般によく知られている。この方法は、図-14に示すように、厚さが、 L_1, L_2, \dots, L_n なるn個の亀裂が存在する岩盤のP波速度と、厚さが $L_c (=L_1+L_2+\dots+L_n)$ なる1個の亀裂が存在する岩盤のP波速度とは等しいとする考え方である。工藤(1963)は、この考え方がグラウチングに関する速度増加計算に適用できることを示している。

しかし、一方、佐々ほか(1984)および渡辺ほか(1989)は、薄層が分布するときの弾性波速度は、境界面で一度も反射せずに透過する波動と、層内で多重反射してきた波動との重ね合わせによって形成されていることを実験と数値計算によって示し、透過のみによる波動が初動を形成していると考え、Wyllieの時間平均式の適用に関しては、検討が必要であるという指摘をしている。

上述のように、亀裂岩盤で観測される弾性波速度に対する時間平均式の適用には検討の余地があるようであるが、ここでは、工藤(1963)のグラウチングに伴う速度変化についての検討を参考にして、時間平均式を適用して、グラウチングに伴う弾性波速度を算出することにする。

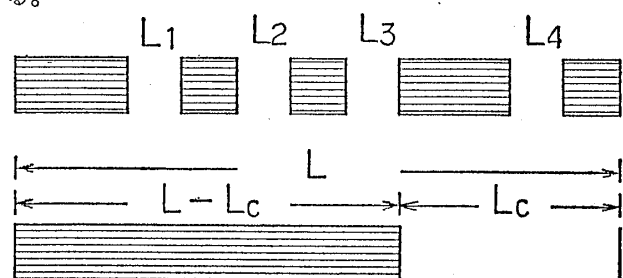


図-14 時間平均式の説明

Fig. 14 Explanation of time-average equation

表一2 グ라우チング材注入による弾性波速度の増加率

Table 2 Rates of increase in elastic wave velocity values due to the injection of grout

グラウチング前の岩盤の弾性波速度 V_0 (km/sec)	亀裂のない良好岩盤の弾性波速度 V_s (km/sec)	グラウチング前の岩盤の間隙比 n	グラウチング後の岩盤の弾性波速度 V_g (km/sec)	速度増加率 α (%)
2.5	5.0	0.43	3.7	48
3.0	5.0	0.286	4.1	37
3.5	5.0	0.184	4.4	26
4.0	5.0	0.141	4.5	13
4.5	5.0	0.083	4.7	4
5.0	5.5	0.038	5.3	6

工藤 (1963) によれば, グラウト材が注入された後における地山の速度 (V_g) は, 次式で与えられる。

$$\frac{1}{V} = \frac{1 - (n_c + n_g)}{V_s} + \frac{n_c}{V_c} + \frac{n_g}{V_w} \quad (3)$$

- ここに, V_s : 亀裂のない良好岩盤の弾性波速度
- V_c : グラウト材の弾性波速度
- V_w : 地下水の弾性波速度
- n_c : グラウト材の容積比
- n_g : 地下水の容積比
- $n_c + n_g (=n)$: 岩盤の間隙比

(3)式を用いて計算を行うに当たって, パラメータを次のように決定した。

- ① 亀裂のない良好な岩盤の弾性波速度 V_s については, 当地における既存の岩石試験 (P波速度測定) の結果によって, 5.0 km/sec とした。
- ② 地下水の弾性波速度 V_w については, 水中におけるP波速度1.5 km/sec とした。
- ③ グ라우チング前は, 地山の空隙の全てが地下水によって満たされているものと仮定する。この場合, (3)式において, $n_c=0$ であり, グ라우チング前の弾性波速度トモグラフィで求められた地山の弾性波速度 V_0 を V_g として, グ라우チング前の岩盤の間隙比 $n (=n_g)$ を算出した。
- ④ ③で求められた間隙比 n で表される空隙の全てがグラウト材に置き換えられたとし, (3)式において $n_g=0$ ($n=n_c$ となる) として V_g を算出した。
- ⑤ グラウト材の弾性波速度 V_c は, 水・セメント比 $W:C=1:1$ で作成した供試体の材令4週時におけるP波速度の測定結果より, 2.8 km/sec とした。

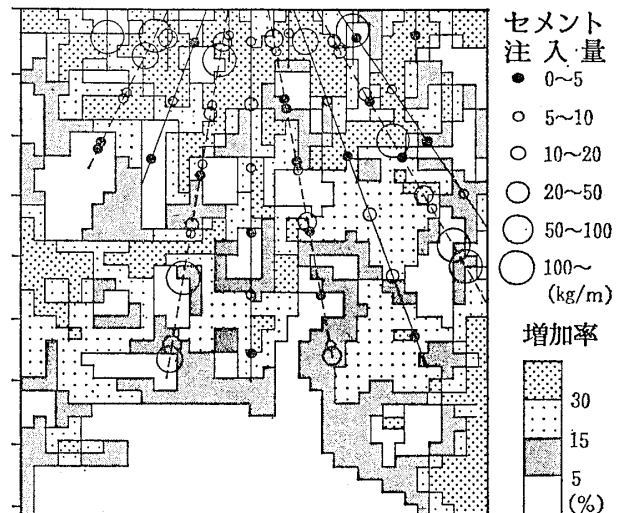
計算結果は, 表一2に示すようになった。

岩盤の間隙比の値は, 常識的に考えられている値よりも, かなり大きな数値となっている。これは, 亀裂を含む地山の弾性波速度の低下は, 単に亀裂の幅だけでなく, 亀裂の本数や測定する弾性波の波長にも影響されるためと考えられる。しかし, ここでは, 単純化するために, あえて空隙の全てがグラウト材に置き換えられたとして試算した。

4・2 テスタードにおけるグラウチングと弾性波速度の変化について

グラウチングによる改良効果を検討するために, B断面における弾性波速度の増加率とセメント注入量を対比した結果を図一15に示す。

この結果によると, セメントが注入された箇所では,



図一15 グ라우チングによる速度増加率とセメント注入量の分布

Fig. 15 Velocity increase ratio due to grouting and distribution of injected cement

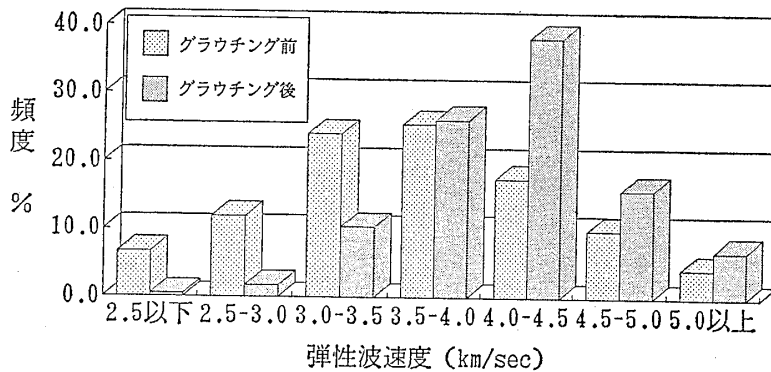


図-16 グラウチング前後の弾性波速度の頻度分布

Fig. 16 Frequency distribution of elastic wave velocity values before and after grouting

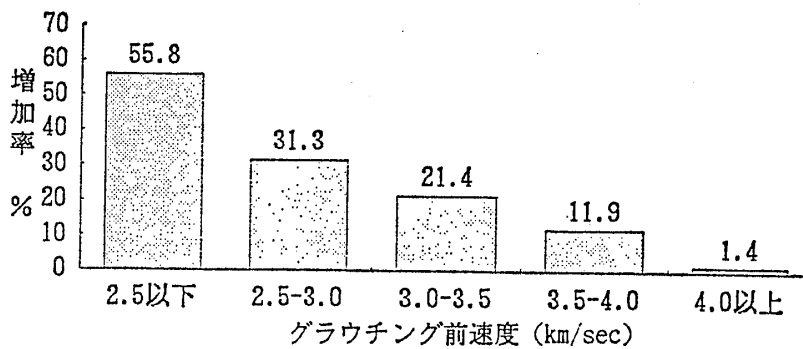


図-17 グラウチング前の弾性波速度と平均増加率の関係

Fig. 17 Relationship between elastic wave velocity and average rate of increase before grouting

おおむね弾性波速度の増加が認められ、グラウチングによる改良効果が期待される。しかし、一方でNo.1孔の標高365m付近、No.2孔の標高350m付近などのように、本来グラウチング孔が到達していない箇所においても、弾性波速度の増加が認められる。地質観察の結果や比抵抗の変化状況などを参照すると、上記の結果は、割れ目沿いにグラウト材が浸透した結果と推察される。

さらに、グラウチング範囲（標高355m以浅）における弾性波速度の変化をより定量的に検討するために、A断面およびB断面の標高355m以浅の箇所の解析結果を用いて、統計処理を行った。

図-16にグラウチング前および後の弾性波速度の頻度分布を比較して示す。この図によれば、グラウチングによって、弾性波速度が増加（平均では3.7 km/sec → 4.1 km/sec）するとともに、均質化（対象区域の50%の領域の速度が4.0~4.5 km/secの範囲にある）が認められる。また、弾性波速度の増加（増加率5%以上）は、全体の60%以上の領域で認められ、平均の増加率は13.9%である。

また、図-17に示すように、グラウチングによる速度

の増加率は、グラウチング前の速度が4.0 km/sec以下の場合には、グラウチング前の速度が低いほど速度の増加率は大きく、グラウチング前の速度が4.0 km/sec以上の場合には、その増加がほとんど認められない。

さらに、速度増加の関係を詳しく検討するために、各セルごとのグラウチング前の速度(X)とグラウチング後の速度増加量(ΔY)の関係を求めた。この結果は、図-18に示すとおりである。この図によれば、グラウチング前の弾性波速度が1.0~4.0 km/secの範囲においては、グラウチング前の速度(X)とグラウチング後の速度増加量(ΔY)の間に次の回帰式が得られる。

$$\Delta Y = -0.46X + 2.18$$

(X: 1.0~4.0 km/sec) (4)

(4)式をグラウチング後の速度(Y)とグラウチング前の速度(X)との関係式に書き直すと、次のようになる。

$$Y = 0.54X + 2.18$$

(X: 1.0~4.0 km/sec) (5)

(5)式は、弾性波速度によって岩盤を評価した場合、グ

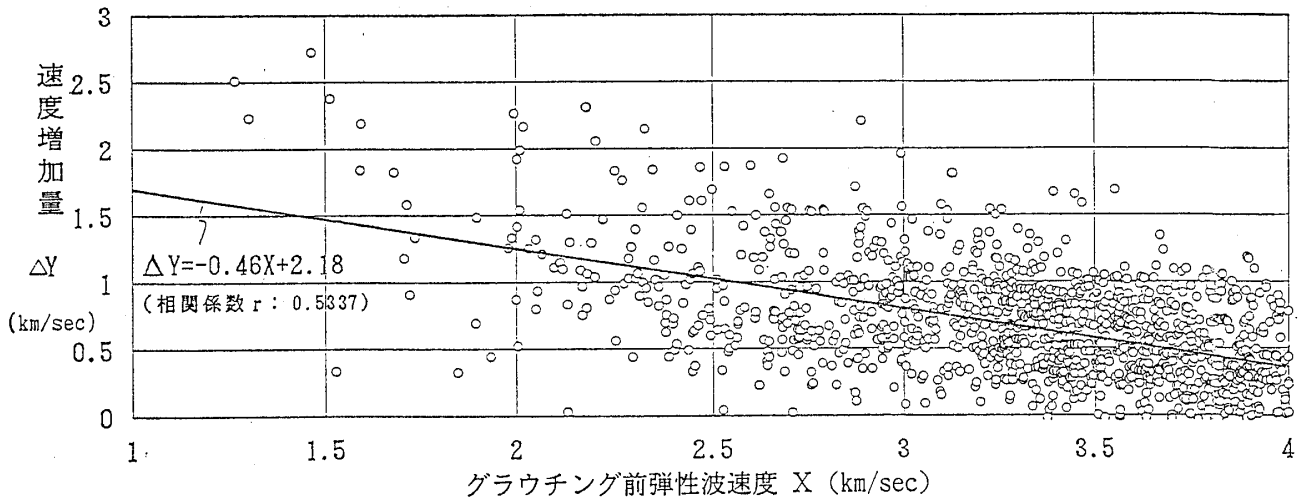


図-18 グラウチング前の弾性波速度と速度増加量との関係

Fig. 18 Relationship between elastic wave velocity and amount of increase before grouting

表-3 回帰式と時間平均式によるグラウチング後の岩盤速度の比較

Table 3 Comparison of rock velocities after grouting as determined by the regressive and time-average formulas

グラウチング前の岩盤の弾性波速度 V ₀ (km/sec)	グラウチング後の岩盤の弾性波速度 (km/sec)		回帰式
	実測値による回帰式	時間平均式	時間平均式×100%
2.5	3.5	3.7	94.6
3.0	3.8	4.1	92.7
3.5	4.1	4.4	93.2
4.0	4.3	4.5	95.6

グラウチング前の速度が2.2 km/sec 以下を示す C_L 級相当岩盤は、グラウチングによって、ほとんど消滅することを示している。

(5)式(実測値による回帰式)と(3)式(時間平均式)によって計算した値を比較すると、表-3に示すようになる。この結果によると、回帰式による値は、時間平均式による値の90~95%を示しており、両者はきわめて良く一致しているといえる。

以上の結果、弾性波速度の変化程度から改良効果を評価した場合、調査地における基礎岩盤は、グラウチングによって、割れ目にグラウト材が充填され、期待された改良効果が得られたと判断される。とくに、グラウチング前の速度が低い岩盤(割れ目の多い岩盤)ほど速度増加の程度が大きいことがわかった。

5 比抵抗による改良効果の検討

テストヤードに分布する花崗岩の比抵抗は、一般的に高い(図-19参照)。一方、グラウト材として使用するセメントミルクの比抵抗は、花崗岩に比べて極めて低く、両者が接して分布する場合には、数値に有意な差が生じることが予想される。したがって、地盤のグラウチング前後の比抵抗を測定することによって、グラウト材の浸入した範囲を推定することが可能となる。

5.1 対比データの測定

一般に、弾性波速度と地盤状況、工学的性質などとの関係は、比較的よく知られているが、比抵抗とそれらの間には、土質の種類、地層水の比抵抗、孔隙率、水飽和率など関連する要素が多いため、あまり明確な関係は得られていない。そこで、本調査地において、関連するいくつかの要素と比抵抗の関係を把握するため、対比データの測定を行った。対比のために測定した対象は、基礎岩盤(花崗岩)、地下水、グラウトミルクである。

(1) 露頭比抵抗測定

調査地付近に表出している露頭の比抵抗を、2極法によって測定した。測定方法は、図-20に示す。

探査深度は7 m程度とし、電極間隔を1 mとした。

対象とした岩盤は、C_M級~C_H級であるが、測定の結果、岩盤等級による比抵抗値の違いはあまり見られず、おおむね、4,000~8,000Ω-mを示した。

(2) 電気伝導度測定

携帯用デジタル伝導度計を使用して、テストヤード付近の水(地下水、河川水など)の電気伝導度を測定した。

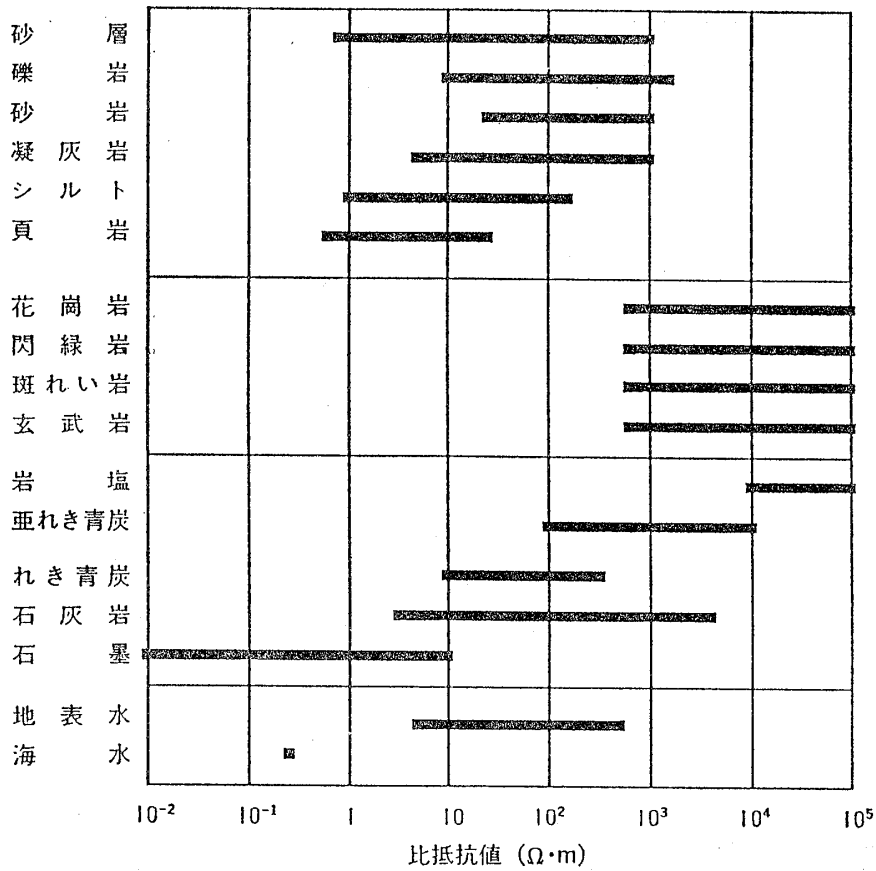


図-19 岩石などの比抵抗の値 (物理探査学会「図解物理探査」, 1989より)
 Fig. 19 Resistivity values of rock, etc. (SEGJ, 1989)

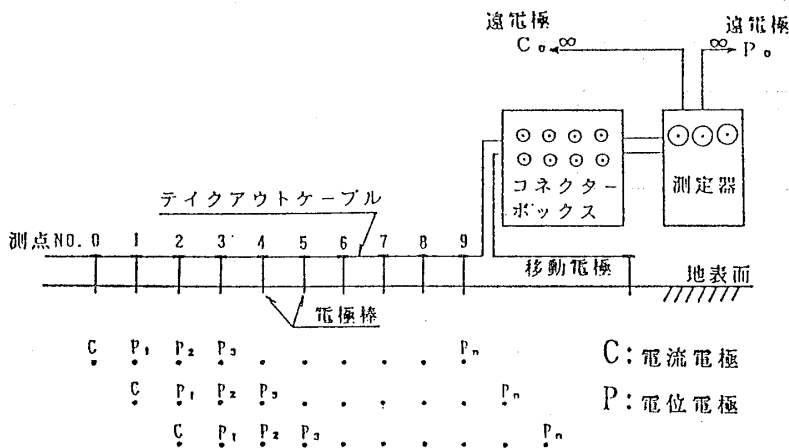


図-20 電気探査測定法の概念図
 Fig. 20 Outline of the electrical exploration measurement method

比抵抗は電気伝導度の逆数として求められる。表-4に測定結果を示す。

(3) グラウト材の比抵抗測定

グラウチングに使用しているセメントミルクの比抵抗を測定するために、以下の手順で供試体を作製した。

- ① セメントミルクの混合比は、W:C=1:1とした。

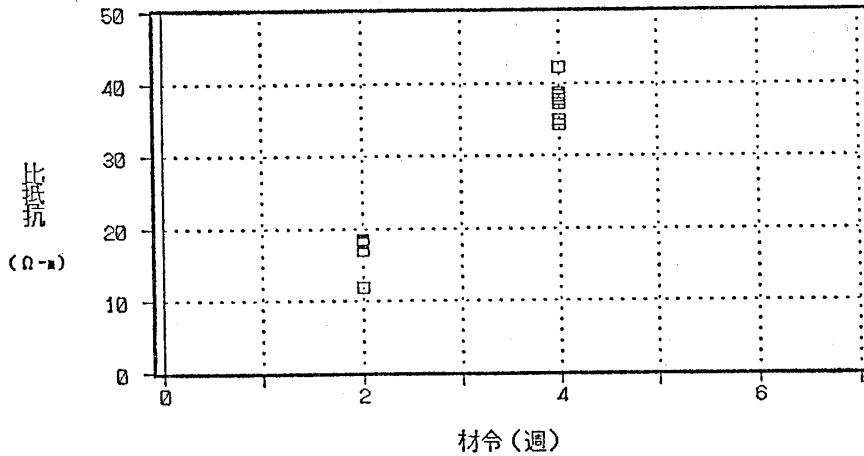
- ② グラウチング用セメントミルクを、VP 50の塩ビパイプ (L=10cm, 20cm) の筒に投入し、硬化するまでグラウチングに使用している水を入れた水槽の中で養生した。比抵抗測定時の材令は、2週、4週とした。

サンプルの比抵抗測定方法は、周囲を銅線で縛り、これを電位電極とし、電流電極は銅板を端面に押し当て、

表一4 いろいろな水の電気伝導度測定結果

Table 4 Results of various measurements of electrical conductivity of water

	水の種類	温度 (°C)	伝導度(ms/cm)		比抵抗 (Ω・m)	備考
			計測値	25°C換算値		
①	グラウチングに使用した水	16.6	0.047	0.056	179	沢水
②	横坑から流出した水	16.7	0.125	0.150	67	
③	河川水(ダム軸下流)	16.4	0.066	0.080	125	
④	水道水(広島市)	18.1	0.062	0.072	139	
⑤	岩盤試験箇所のみ水	23.4	0.527	0.546	18	
⑥	ホースの水	22.5	0.045	0.048	208	沢水
⑦	掘削孔のみ水	16.7	6.770	8.080	1	〃
		14.7	5.310	6.640	2	〃
		13.8	5.330	6.820	1	〃
⑧	孔内水(No.2孔)	11.6	0.630	0.856	12	〃



図一21 グラウト材の比抵抗測定結果

Fig. 21 Resistivity measurements of grout

電位電極間隔を、3 cm, 4 cm, 5 cm の三種類とし、その平均値をサンプルの比抵抗とした。

測定した電圧と電流から比抵抗は次式により算出する。

$$\rho = K \cdot V / I, \quad \text{ただし, } K = S / l$$

ここに、 ρ : 比抵抗

V : 電圧

I : 電流

l : 電位電極間隔

S : 断面積

測定結果は図一21に示すとおりであり、材令4週時で、35~40Ω-mであった。

5・2 グラウチングに伴う比抵抗変化の試算

藤原ほか(1981)によれば、地層の比抵抗と土質パラメータを結びつけた Archie の式が岩盤にも適用できることを述べており、これに従って、グラウチング前後に

おける岩盤の比抵抗の関係を示す式を導いた。すなわち、

$$\rho_0 = F \cdot \rho_w \quad (6)$$

ここに、 ρ_0 : 100%帯水した岩盤の比抵抗

ρ_w : 岩盤の孔隙を満たしている孔隙水の比抵抗

F : 「地層比抵抗係数」と称し、孔隙率 n の関数として

$$F = 1/n^m \quad (7)$$

と表すことができる。

m : 充填指数

未固結の砂 1.3~1.8

砂岩 1.7~2.0

多孔質な石灰岩 1.7~2.3

堅硬な岩石 2.3以上

(6)式と(7)式から

表-5 グラウト材注入による比抵抗の低下率

Table 5 Rate of decrease in resistivity due to the injection of grout

グラウチング前の岩盤の比抵抗 $\rho_0(\Omega \cdot m)$	地下水の比抵抗 $\rho_w(\Omega \cdot m)$	地層比抵抗係数 F	グラウチング材の比抵抗 $\rho_c(\Omega \cdot m)$	グラウチング後の岩盤の比抵抗 $\rho_i(\Omega \cdot m)$	比抵抗低下率 β (%)
20,000	70	285.7	35	10,000	7.0
10,000	70	142.9	35	5,000	7.5
8,000	70	114.3	35	4,000	7.7
6,000	70	85.7	35	3,000	8.0
5,000	70	71.4	35	2,500	8.1
4,000	70	57.1	35	2,000	8.4
3,000	70	42.9	35	1,500	8.7
2,000	70	28.6	35	1,000	9.1
1,000	70	14.3	35	500	10.0

$$\rho_0 = \rho_w / n^m \quad (8)$$

となる。これらの関係は、グラウチング前に岩盤の孔隙を満たしていた孔隙水が、グラウト材に置換された場合にも適用できると考える。すなわち、グラウト材の比抵抗を ρ_c 、グラウト材の浸入した岩盤の比抵抗を ρ_g とすれば、近似的に、

$$F = \rho_g / \rho_c \quad (9)$$

となる。

(6)式と(9)式から

$$\rho_g = \rho_0 \cdot \rho_c / \rho_w \quad (10)$$

が得られる。

(10)式で計算を行うに当たって、パラメータを次のようにして決定した。

- ① 地下水の比抵抗 ρ_w は、現地の横坑から流出している地下水の電気伝導度を測定し、比抵抗に換算した。その結果より、 $\rho_w = 70 \Omega \cdot m$ とする。
- ② グラウト材の比抵抗 ρ_c は、セメントミルクの比抵抗測定結果より、 $\rho_c = 35 \Omega \cdot m$ とする。

注入前の空隙内の地下水が全てグラウト材に置き換えられたと仮定し、(10)式を適用して、グラウチング後の岩盤の比抵抗変化を計算した。その結果は表-5に示すとおりである。

5・3 テストヤードにおけるグラウチングと比抵抗変化について

5・2で検討したように、もともと高い比抵抗値を示す岩盤内に、低比抵抗体であるグラウト材が注入されることによって、岩盤の比抵抗値が低下することが予測される。吉住(1972)は、セメント注入量と比抵抗低下率

の間に、ある程度の関係が認められると報告している。そこで、グラウチングによる改良効果を検討するために、B断面における比抵抗の低下率とセメント注入量を対比した結果を図-22に示す。

この結果、セメント注入量による比抵抗の変化については、おおむね良好な対応を示している。また、一方では、グラウチング孔が達していないNo.1孔の標高365m以深においても、著しい比抵抗の低下が認められるが、4・2において述べたように、割れ目沿いにグラウト材が浸透したものと推察される。

また、グラウチング範囲(標高355m以浅)における比抵抗の変化状況を、より定量的に示すために、A断面およびB断面の標高355m以浅の解析結果を用いて、統計処理を行った。

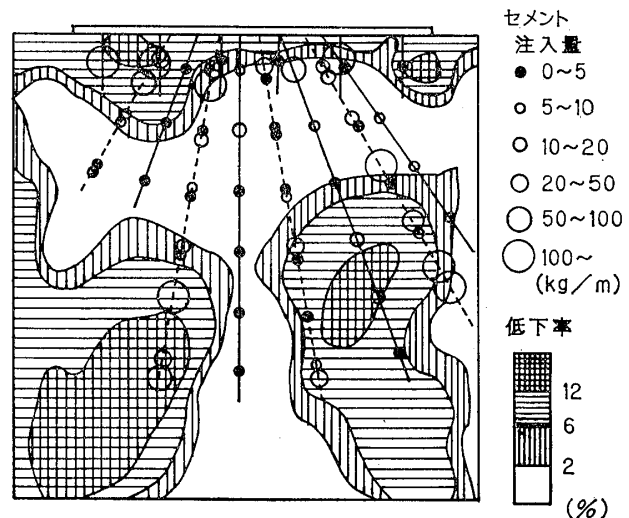


図-22 グラウチングによる比抵抗の低下率とセメント注入量の分布

Fig. 22 Rate of decrease in resistivity due to grouting and distribution of injected cement

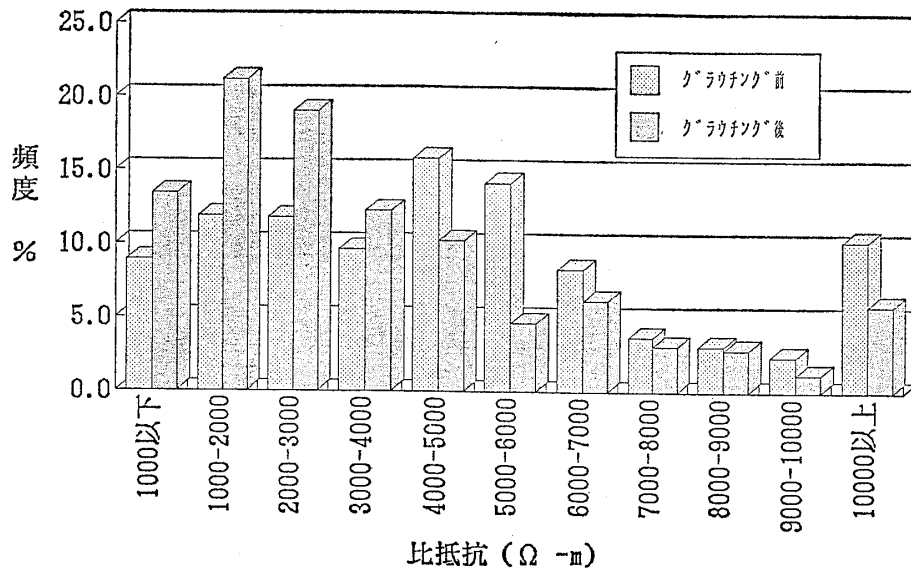


図-23 グラウチング前後の比抵抗の頻度分布

Fig. 23 Frequency distribution of resistivity values before and after grouting

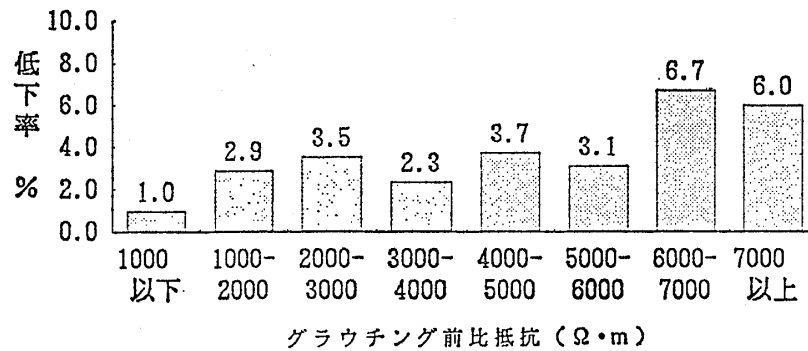


図-24 グラウチング前比抵抗と平均低下率の関係

Fig. 24 Resistivity before grouting and average rate of decrease

この結果、図-23の頻度分布に示すように、グラウチングによる比抵抗の低下は平均値で見ると、5,300Ω·m→4,400Ω·mである。比抵抗の低下（低下率2%以上）は全体の60%以上の領域で認められ、低下率の平均は、3.9%である。

グラウチングによる比抵抗の低下率は、図-24に示すように、グラウチング前の比抵抗が6,000Ω·m以下においては、2~3%とあまり変化しないが、6,000Ω·m以上では6%程度とやや大きな低下率を示した。

6 まとめ

コンソリデーショングラウチングによるダム基礎岩盤の改良効果を検証するために、実際のダムサイトに設けられたテストヤードにおいて、近年開発された弾性波速度トモグラフィと比抵抗トモグラフィの手法がどの程度有効であるかの試験を行った。試験の結果、つぎのことが明らかになった。

弾性波速度トモグラフィについて：

- ① 測線長が15mと38mの2本の測線について、それぞれの両端に掘削された2本のボーリング（深度は40m）に囲まれた断面内において、グラウチング前後における弾性波速度の変化は明瞭であった。
- ② グラウチング前に弾性波速度が3.0 km/sec以下の箇所では、グラウチング後に弾性波速度が20~40%の増加を示し、グラウチング範囲（標高355m以浅）では、平均的に、4.1 km/sec程度の速度となった。
- ③ グラウチングによる弾性波速度の増加率は、グラウチング前の速度が低いほど大きな値を示しているが、グラウチング前の速度が4.0 km/sec以上であった箇所では、グラウチング後の速度の増加は、ほとんど認められなかった。

比抵抗トモグラフィについては：

- ① 弾性波速度トモグラフィの場合と同じ測線を用

いて実施し、それらの断面内の比抵抗の分布は、グラウチングの前後で明瞭な変化を示した。

- ② グラウチング前に、比抵抗の値が4,000~8,000 Ω -mであった領域は、グラウチング後は、その領域が縮少した。
- ③ グラウチングによる比抵抗の低下率は、グラウチング前の値が6,000 Ω -m以下であった箇所では、2~3%とその変化は小さく、6,000 Ω -m以上であった箇所では、平均的に6%とやや大きな値となった。

比抵抗の低下率の範囲は4~10%であった。

グラウチング孔底の深度以下においても、割れ目沿いにグラウト材が浸透したものと推察され、速度や比抵抗の変化が現れていた。

コンソリデーショングラウチングの目的とするところは立体的な地盤の改良であり、従来のグラウチングの効果の確認は、いわば線的なものにとどまっていたため、十分な効果の判定ができなかったと考えられる。この意味において、今回実施したトモグラフィによる断面内の弾性波速度および比抵抗の変化から、グラウチングの効果を実定的ではあるが判定することができたことは、意義あることと思っている。

今後は計測値の変化が工学的な改良と、どの程度対応するのかを明らかにすることが課題となる。

参 考 文 献

藤原忠一，橋本憲和（1981）：岩石の比抵抗と孔隙率について 物理探査 第34巻 第2号 pp.32~36.

服部邦男，河村精一，川上 純，板倉武好，坂下 晋（1990）：ジオトモグラフィによるグラウト

ト注入範囲の調査 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集 第3部 pp.1120-1121.

小島圭二，神尾重雄，石橋弘道，内山成和，斉藤秀樹，島裕雅（1989）：ジオトモグラフィによる岩盤の画像化（その1）応用地質 30巻 3号 pp.1-10.

工藤慎一（1963）：弾性波によるグラウト効果の調査—その定量的解釈の試み—土木技術資料 5-6 pp.1-6.

増田秀夫（1961）：わが国におけるコンクリートダム基礎岩盤の弾性波速度に関する応用地球物理学的研究技術研究所報告（土木・61006）電力中研.

佐々宏一，劉 明治，杉本卓司（1984）：水で飽和した亀裂を含む岩盤のP波伝播特性 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 pp.163~168.

渡辺俊樹，佐々宏一，芦田 譲，岸本宗丸（1989）：多層の薄層からなる低速度帯がP波に及ぼす影響について 物理探査 第42巻 第2号 pp.75~81.

Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R. and Gardner, L. W. (1956): Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media, Geophysics, 21, pp. 41-70.

吉住永三郎（1972）：ダム工事におけるグラウト効果の電気的測定 日本ダム協会第三回コンクリートダム施工技術講習会テキスト pp.73-85.

(財)国土開発技術研究センター（1983）：グラウチング技術指針同解説 p.37~40.