

(5) 比抵抗トモグラフィーのグラウト注入状況把握への適用

前田建設工業(株)	正会員	○	高橋	浩
同 上	同 上		井上	博之
東京電力(株)	同 上		安田	登

Application of grouting effects for rock mass using resistivity tomography

Hiroshi TAKAHASHI,	Maeda Crop.
Hiroyuki INOUE ,	ditto
Noboru YASUDA ,	Tokyo Electric Power Co., Inc.

Abstract

Grouting in dam constructing is performed in order to improve watertightness, and mechanic properties of foundation on rocks (grouting effects).

In this study, we applied the Resistivity-tomography to evaluation of grouting effects. Then, the Resistivity-tomography was carried on at an actual dam site in order to compare the grout volume, resistivity difference rate of rock mass before and after grouting, and geological feature distribution.

From the test results, The possibility of realizing that evaluation of grouting effects using the Resistivity-tomography was confirmed.

1. はじめに

近年のダム建設においては、立地点の枯渇化に伴い地質構造ならびに地盤物性などが複雑になり、岩盤の緩みや断裂の分布・性状等を解明するための新しい地盤探査手法の開発が必要となってきた。特にダムサイトの地盤の透水性やグラウトの止水効果のより合理的な評価手法の開発は工学上の急務となっている。このため、最近、グラウトの効果判定手法に、ジオトモグラフィー技術を適用することが試みられている。ジオトモグラフィーは地質の状況を画像化できるため、地盤物性の変化なども捉えるには有益な技術と考えられている。

そこで、本研究ではジオトモグラフィーの一種である比抵抗トモグラフィーを適用し、グラウトに用いるセメントミルクの電気抵抗が周辺の岩盤より低いことに着目して岩盤内のグラウト注入状況の確認を精度よく行うことを試みた。今回は、某ダム予定地でのブランクセットグラウチング試験地点において実施したグラウト施工前後での比抵抗トモグラフィー結果から、ダム基礎岩盤でのグラウト効果判定への可能性を検討した。さらに、簡易な孔-孔間の比抵抗測定をグラウト施工段階を追って実施し得られた結果よりグラウト後のトモグラフィー測定時期の検討も行った。

2. 実験概要

試験ヤードの岩盤はC_MからC_Lの多種礫岩および安山岩であった。グラウチングは23m×6mのヤード内で実施した(孔配置は図-2参照)。注入深度はG.L. 0~10mを2ステージに分け、1ステージの注入区間は

5 mとした。測定断面は地表測線（測線長約12m）とその両端の鉛直ボーリング孔（掘削深度約15m）に囲まれた、ほぼ長方形の鉛直断面とした。また、測定は電極間隔を1 mとしグラウト注入前後で実施した。^{1) 2)}

3. 実験結果および考察

3.1 グラウト注入前後の比抵抗変化率とグラウト注入実績との比較

(1) トモグラム断面での比較

グラウト前後の比抵抗値の変化を、式1)で算出される比抵抗変化率 α により、トモグラムとして表したのが図-1である。グラウト後で比抵抗値が減少した領域では、比抵抗変化率は負の値となり、測定断面の大部分の領域において比抵抗値が減少（変化率0~-20%が大部分を占める）したことがわかる。

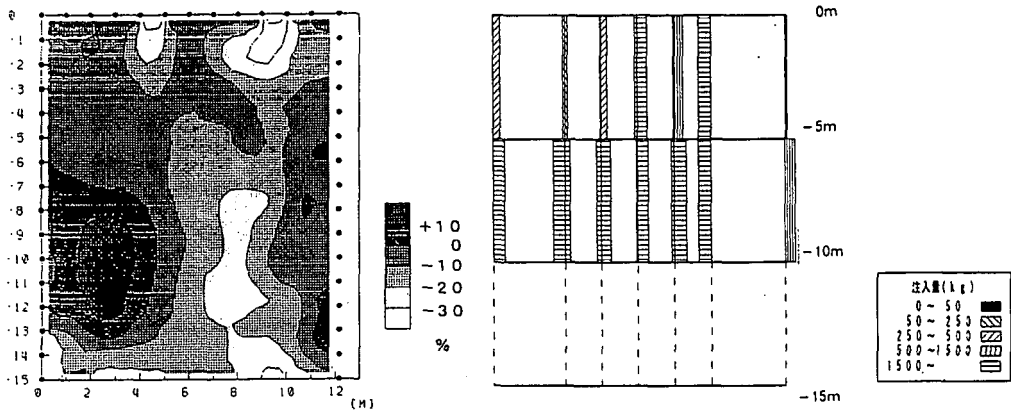


図-1 比抵抗変化率トモグラム

$$\alpha = ((\log \rho_2 - \log \rho_1) / \log \rho_1) \times 100 \quad \text{----- 1)}$$

ただし、 α : 比抵抗値の変化率 (%)

ρ_1, ρ_2 : グラウト注入前後の比抵抗値

比抵抗変化率トモグラム、測定断面近傍のグラウト注入実績ならびに想定された岩級区分を対比した結果を表-1に示す。

表-1 グラウト注入前後 比抵抗変化率分布とグラウト注入実績との対比

ｸﾞﾗｳﾄﾞ No.	主ｸﾞﾗｳﾄﾞ No.	注入量 (kg)	Ｌｕ値	注入圧力 (kgf/cm ²)	岩級	比抵抗変化率 (+、-) (大、中、小)	トモグラムと グラウト実績 の整合性	想定注入形態	補 足 説 明		
G(1,1)	2-9	255	中	64	大	1.4	CL CLM	-小	△	均等注入的	注入量は中程度で、Lu値は大きく、比抵抗変化率の低下が小さい。グリッド全体にグラウトが注入されていると思われる。
G(1,2)	2-15	355	中	101	大	1.5	CL CLM	-中	○	均等注入的	注入量は中程度で、Lu値は大きく、比抵抗変化率の低下は中程度である。ｸﾞﾗｳﾄﾞ全体にｸﾞﾗｳﾄﾞが注入されていると思われる。
G(1,3)	1-3	5196	大	169	大	0.5	CL CLM CH	-中	△	部分的な均等 注入、局所注 入的	CL級岩盤に多く注入されていると思われる。 その部分の比抵抗値の減少が大きい。
G(2,1)	2-9	1559	大	0.5	小	6.4	CLM CH	+小	×	局所注入的	注入量が多いがLu値が小さく、比抵抗値が増加もしくは変化しているため、他の領域にｸﾞﾗｳﾄﾞが注入されていると思われる。
G(2,2)	2-15	854	中大	21	中	6.3	CL CLM CH	-中	○	均等注入的	注入量の大部分はグリッド左側の部分のCL級岩盤に注入されていると思われる。
G(2,3)	1-3 2-14	1829 1314	大 中大	13 1	中 小	6.7 6.4	CLM CH	-大 ±小	○ ×	均等注入的 局所注入的	Lu値が小さく注入量が多い。そのため、注入量の大部分はグリッドの右側部分に注入されたと思われる。 注入量が多いがLu値がとて小さい。比抵抗値の変化もあまりみられない。そのため他の領域へ注入されたと思われる。
G(3,1)	2-9	-	-	-	-	-	CH	±小	-	-	CH級岩盤であり、グラウト注入された様子は見られない。
G(3,2)	2-15	-	-	-	-	-	CLM CH	-中	-	-	グリッドの右側の部分は2-15孔からの均等注入、左側の部分は1-3孔からの局所注入の影響と思われる。
G(3,3)	1-3 2-14	-	-	-	-	-	CH	±小	-	-	CH級岩盤であり、特に注入は認められない。

011, 11	011, 21	011, 31
012, 11	012, 21	012, 31
013, 11	013, 21	013, 31

注入量 (kg)	Lu	比抵抗変化率	トモグラムと グラウト実績の 整合性	想定注入形態
0 ~ 50 小	0 ~ 5 小	+: 増加	+	均等注入的
50 ~ 250 小中	5 ~ 10 小中	-: 減少	-	均等注入的
250 ~ 500 中	10 ~ 20 中	小: 0 ~ 10%	○: よい	局所注入的
500 ~ 1500 中大	30 ~ 50 中大	中: 10 ~ 20%	△: 少しよい	大きな亀裂に沿って局所的に注入された形態
1500 ~ 大	50 ~ 大	大: 20 ~ %	×: 悪い	

ここでは、測定断面を水平3×鉛直3のグリッドに分割し、グリッドごとの比較を行った。これより、各断面ともにG.L. 0～-5m間では比抵抗変化率と注入実績との整合性は良く、G.L. -5～-10m間では、整合性が悪いことがわかった。

これは、以下のように推測される。

- ① G.L. 0～-5m間では岩級区分の低い部分（ C_L 、 C_{LM} ）が多く、また注入圧（1.5～3.0kgf/cm²）も低かったので、グラウトがその領域に充填され、見かけグリッドが均質になった。
- ② G.L. -5～-10m間では岩級区分の高い部分（ C_M 、 C_H ）が多く、しかも注入圧（7.0～8.0kgf/cm²）が高かったので、グラウトは局所的に充填された。

以上のことにより、グラウト注入前後のトモグラム結果（比抵抗変化率分布）、グラウト注入実績、岩盤状態等を総合的に評価することにより（グリッド単位程度）グラウト注入状況の判定が可能であることが示された。また、G.L. -10～-15m間は比抵抗変化率の結果しかないために、直接比較はできていないが、この領域にも2ステージで実施されたグラウトが充填されたものと考えられる。³⁾

(2) グラウト孔の分布平面での比較

各ステージ毎の注入量と比抵抗変化率（ステージ区間の平均値）を併記したものを図-3に示す。これらの図より各ステージともに、測定断面近傍に注入量の大きいグラウト孔が存在するところでは、比抵抗値は大きく低下（変化率が負の値）していることがわかり、比抵抗トモグラフィーでグラウト注入の効果判定が可能であることが推察される。⁴⁾

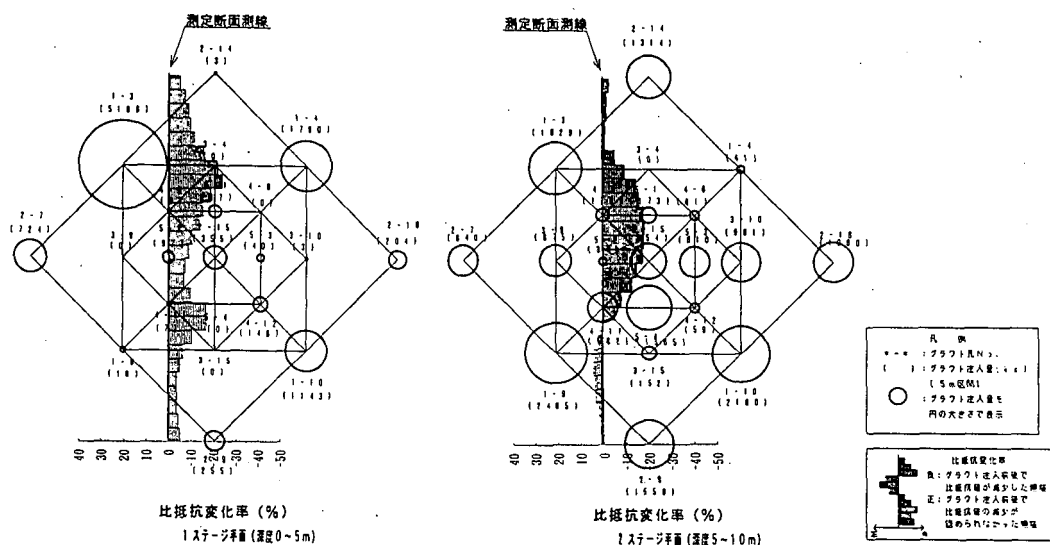


図-2 グラウト孔配置および注入量と比抵抗変化率（ステージ間の平均値）

3.2 グラウト効果確認のためのトモグラフィー測定時期の検討

本実験で簡易に孔-孔間の同深度の電極を利用して、2極法の比抵抗測定を施工段階を追って継続的に行った。図-4に孔-孔間測定の施工中の見かけ比抵抗値の経時変化と測定断面近傍のグラウト孔の注入実績を示した。これより初期に行われた注入量の多い（総注入量10000kg）グラウト注入後の見かけ比抵抗（A点）は、初期値に比べ大きく低下している（初期値の1/10程度）。その後（約2日後）の見かけ比抵抗値（B点）はA点のそれと比べ増加している（初期値の1/2程度）が、この間グラウト注入は行われていない。また、B点の直後に約2000kg程度のグラウト注入が行われ、その直後（C点）の見かけ比抵抗は再び低下し

ている。さらに、D点までは（約3日後）主だったグラウト注入は無く、見かけ比抵抗はC点と比べ増加している。比抵抗値の増減の要因は地下水位の変動や温度変化等も考えられるが、今回の主要因としては、グラウト注入による比抵抗値の低下と、グラウト材であるセメントミルクの硬化の進行に伴う比抵抗値の増加にあると考えられる。

図-5にセメントミルクの硬化進行にともなう比抵抗値の変化を示す。これは、普通ポルトランドのセメントミルク（W:C=1:1、湿潤養生）を練混ぜ直後から経時的に比抵抗値を室内測定したものである。この図から、セメントミルクの比抵抗値は、硬化まではほぼ一定で、凝結時間を超えると急速に増加するが、その後増加の割合は緩やかになることがわかる。

また、この比抵抗増加の開始時間、増加の程度は養生状態、温度等様々な要因によって異なってくることは言うまでもない。すなわち、地盤にグラウトされたセメントミルクは養生状態や温度に応じて異なった比抵抗値増加の経路をたどることになる。

ここで、グラウトに伴う地山の比抵抗値の変化を整理すると次のようになる。図-6に地山の構成状態と地山の見かけ比抵抗値の関係を模式図で示す。

初期地山の構成は基質部、および、亀裂や空隙を満たす水、空気である。グラウト注入により、この空隙にセメントミルクが充填され、水や空気の占める領域が減少する。充填されたセメントミルク（硬化前、数 $\Omega \cdot m$ 程度）は基質部（数100～数1000 $\Omega \cdot m$ 程度）、水（100 $\Omega \cdot m$ 程度）や空気（絶縁物質）と比べて比抵抗値は極めて低い、このため、グラウト直後の地山全体の見かけ比抵抗値は初期地山と比べて低くなる。その後、セメントミルクの硬化に伴い、セメントミルクの比抵抗値は増加し、それによって、地山全体の見かけ比抵抗値もグラウト直後のそれよりも増加する。さらに長期的には初期地山の値に近づくと考えられる。

以上のようにグラウト前後の比抵抗変化（低下）は注入セメント量、注入圧や注入された領域だけに比例するものではなく、材令や養生状態にも大きく左右される。したがって、グラウト注入後の測定においては、

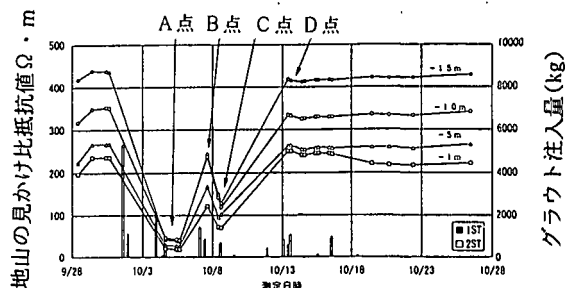


図-3 孔-孔間測定見かけ比抵抗値とグラウト注入量経時変化図

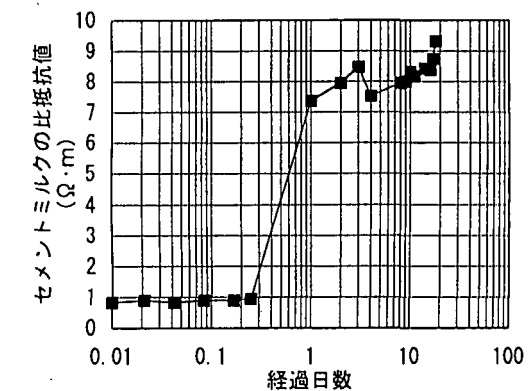


図-4 セメントミルクの硬化に伴う比抵抗値変化

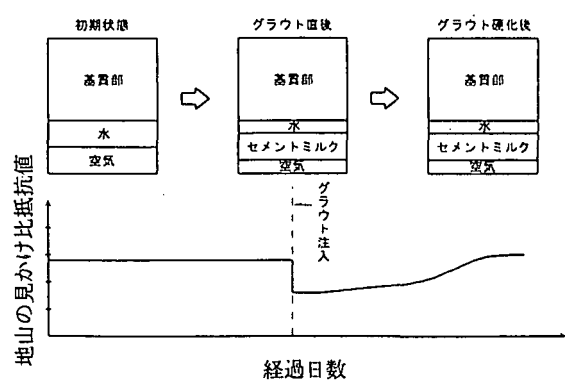


図-5 地山の構成状態と地山の見かけ比抵抗値関係図

測定の時期が重要であると考えられる。すなわち、グラウティングによる注入状況を把握する目的であればグラウト直後（終結前）に測定することが有効であることがわかった。

4. おわりに

今回の研究で得られた知見を以下に示す。

- ① グラウト注入により地山の比抵抗分布は変化し、グラウト注入前後のトモグラム結果（比抵抗変化率分布）、グラウト注入実績、岩盤状態等を総合的に評価することによりグラウト注入状況の判定が可能であることが示された。
- ② グラウトされるセメントミルクの比抵抗は硬化に伴い増加することが確認でき、注入状況をより精度良く把握するためには、グラウト後の測定はグラウト直後に行うのが望ましいことがわかった。すなわち、グラウト施工の段階毎に測定を行うことによって、各段階のグラウトの注入状況をより明確に把握することが可能であると考えられる。

このように、グラウトの注入状況を判定する手段として、比抵抗トモグラフィーは有効であることが示され、グラウト効果判定手法としての有用性が確認された。今後さらに比抵抗トモグラフィーを、グラウト効果判定手法としての精度を向上させるためには、トモグラフィー結果と物理量（透水係数、強度等）との対応付けと共に、より詳細で明確なグラウト注入状況の把握が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 島 裕雅：二極法電極配置データを用いた実用的な二次元比抵抗自動解析法— 比抵抗映像法の解析法と適用例 一、物理探査、第45巻、第3号、pp. 204～223、1992
- 2) 鈴木 浩一、藤光 康浩、日々野 敏、是石 康則：金剛地点における比抵抗トモグラフィー法探査結果、物理探査、第44号第6号、pp. 247～252、1991
- 3) 石井 康夫、矢嶋 壮吉：建設工事の地質診断と処方、土木工学社、p. 50、1983
- 4) 井上 博之、高橋 浩、神藤 健一、安田 登：比抵抗トモグラフィーでのグラウト注入状況の把握に関する研究、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、第3部門、pp. 60～61