

(94) 電磁波トモグラフィによる グラウティング前後での地盤状況の比較

ハザマ技術研究所 正会員 ○稲葉秀雄
ハザマ技術研究所 向上拡張

The Investigation of Rock Mass Condition
Using Electromagnetic Tomography before and after Grouting

Hideo INABA Hazama Corporation
Hiromi KOJO Hazama Corporation

Abstract

Crosshole measurement using electromagnetic waves was performed in rock mass. The change of electric properties of rock mass was estimated quantitatively.

The electromagnetic tomography indicates that the grouting decreased the electromagnetic properties of jointed rock mass. It was confirmed that the change of electromagnetic properties coincide with the change of lugeon value.

1. はじめに

ダム建設の対象地盤が複雑化、多様化するとともに、グラウトの施工数量も多くなる傾向にある。また、コンクリートの打設や盛立てによる地盤の変形や透水性の変化を考慮して、合理的な設計・施工を目指そうとする動きもある。こうした情勢に伴って、従来の方法をより実用的に補助し得るようなグラウト効果の補助的判定方法の確立が望まれている。

このような状況で、近年ET型レーダーを用いた電磁波探査技術の発達が見られ、地盤特性の評価に用いる試みがなされている。電磁波を用いることの特徴・意味は、対象地盤の電磁気的性質の不均一性や平均的性質を検出することにより、水みち・グラウティング効果といった地盤の電磁気的性質と関係の深い現象を調査する上で利点を有するほかに、過去、様々な手法で試みられてきた岩盤亀裂構造の推定に対し、有力な手がかりを与える可能性があるという点にある。実際、時間平均則と呼ばれる電磁波透過の際の媒質の電磁物性の平均則が成り立つ範囲では、亀裂に関するかなり細かい情報を電磁波トモグラフィは持っている可能性がある。

本論文では、こうした背景で行われたグラウティング前後のダム基礎岩盤から得た電磁波トモグラフィ解析について紹介し、岩盤の電磁物性の分布と変化を定量的に解釈することによって、グラウティング効果について考察を加え、さらに岩盤の保水状態および亀裂構造に関する推定について簡単な検討を加える。

2. 調査概要

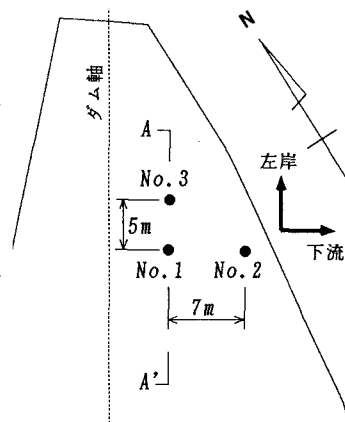
2.1 調査位置および地質の概要

調査地点はコンクリートダムの建設地点である。調査地点を構成する岩石は流紋岩類が主体であり、凝灰角礫岩および貫入岩脈の玢岩が小規模に分布している。これらの岩石は一般に堅硬・緻密であるが、節理が発達し熱水変質作用により珪化、粘土化がみられる部分も存在する。調査地点には3本のボーリング孔（鉛直、L=30m）を削孔した。孔間距離は5.0mおよび7.0mで、3本のボーリング孔は直交する2軸を形成している。調査地点の概要を図-1に示す。また、調査地点の露頭で観察された主な亀裂、シームを図-2に示す。

2.2 調査方法

ゲラツク施工後の調査は調査地点付近のゲラツクがほぼ完了した約4ヵ月後に行った。ゲラツク前の調査の時点では、調査用ボーリング孔内に地下水面は確認されなかったが、ゲラツク後の調査の時点では堤体のコンクリートの打設が進行しており、コンクリートの湿潤養生を行っていたために調査範囲はほぼ全体に地下水位以下であった。(図-1 参照)

調査機器は、ハガマと川崎地質院が共同開発した岩盤レーザ探査システムで、アンテナは中心周波数80MHzのゲル体アンテナである。送受信アンテナを50cmピッチで上下させ、トモグラフィ解析のためのデータを収集した。解析に用いた測線数は約800測線である。各測線毎の電磁波伝播時間、振幅をデータとして用い、調査断面を25cm×50cmの格子に分けてトモグラフィ解析を行った。セル数は1100である。



3. 調査結果

トモグラフィ解析結果を用い、岩盤の電磁物性の変化を定量的に把握するために次のような処理を行った。すなわち、トモグラフィ解析によって得られた電磁波伝播速度、減衰係数、比誘電率、導電率の分布それぞれについて全セル(1100セル)の平均値、標準偏差を算出し、(平均値±標準偏差)によってセルを区分した(図-3～6)。同時に速度、減衰係数、比誘電率、導電率の度数分布を求め、図に示した。

電磁波伝播速度および減衰係数の分布図について、それぞれa:ゲラツク前のトモグラフィ解析結果、b:ゲラツク後の解析結果をゲラツク前と同じ基準で色分けしたもの、c:ゲラツク後の解析結果をゲラツク後の平均値、標準偏差を用いて色分けしたものである。本論文では調査を行った2断面のうち、孔間距離5.0mのNo.1-No.3孔間の断面についてのみ報告することとした。

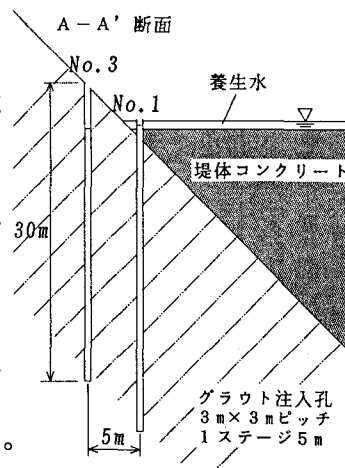


図-1 調査地点の概要

4. 検討

4.1 ゲラツクによる電磁物性のバリエーションの変化

速度・減衰係数・比誘電率・導電率ともに平均値がわずかに変化し、かつ断面上でのバリエーションが縮小した。バリエーションの縮小は、亀裂へのグラウト侵入による電磁物性の平均化で説明できる。すなわち、岩盤基質部・挟在物・空気・水といった岩盤構成要素は互いに大きく異なる電磁物性を持っているため、これらが空間的に混在しているとバリエーションが大きくなる。そして亀裂にグラウトが侵入すると、亀裂中の流体(空気・水)とグラウトが部分的に置き替わることによって、岩盤全体の電磁物性は岩盤基質部の電磁物性に近づく方向に平均化される。このバリエーションの減少は、観測値においても符合している。

4.2 ゲラツクによる電磁物性の平均値の変化

速度の平均値はわずかな増加を示している。電磁波速度 V と比誘電率 ϵ は、 $V=C/\sqrt{\epsilon}$ 、(C は真空または空気中の電磁波速度)で表され、岩盤構成要素の比誘電率によって模式的に説明することができる。いま、ある測線に沿って時間平均則が成り立つものと仮定すると、 $\sqrt{\epsilon} = \sum f_i \sqrt{\epsilon_i}$ 、($\sum f_i = 1$)によって示される比誘電率の平均則が導かれる。この式を用いると、亀裂内

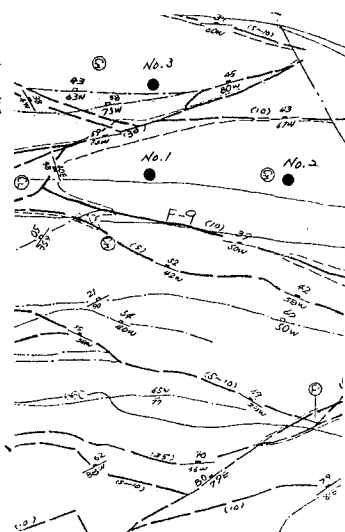


図-2 主な亀裂、シーム

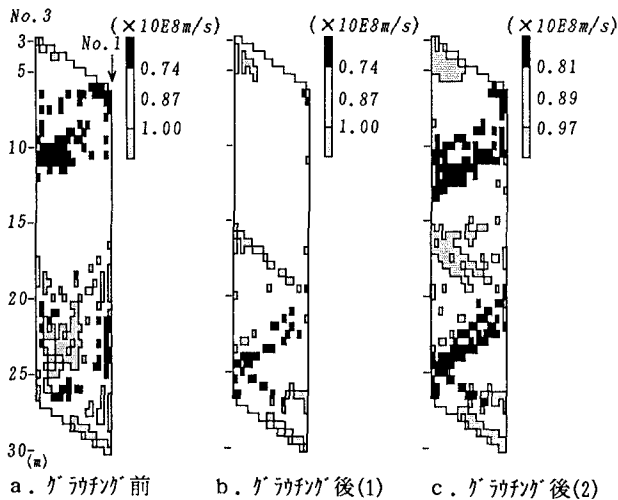


図-3 伝播速度分布

伝播速度 度数分布 (n=1100)

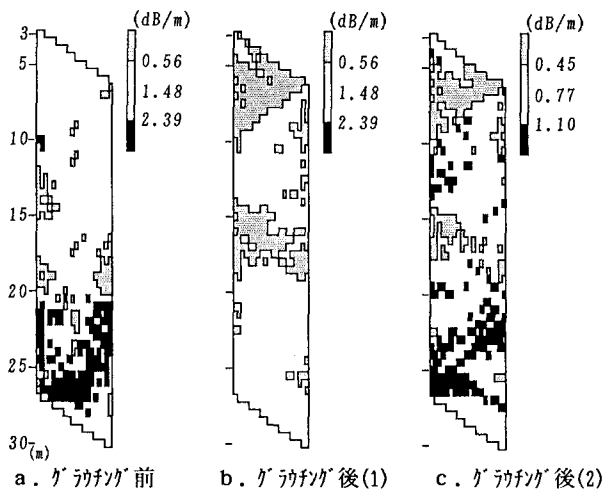
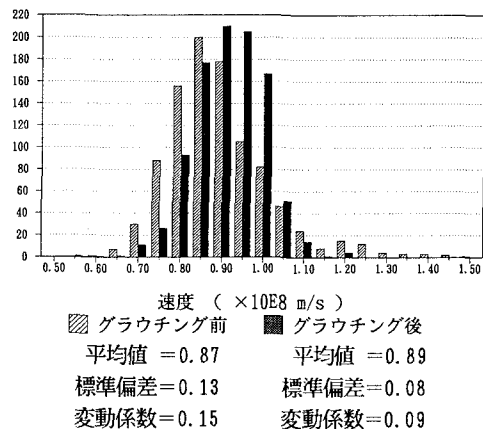


図-4 減衰係数分布

減衰係数 度数分布 (n=1100)

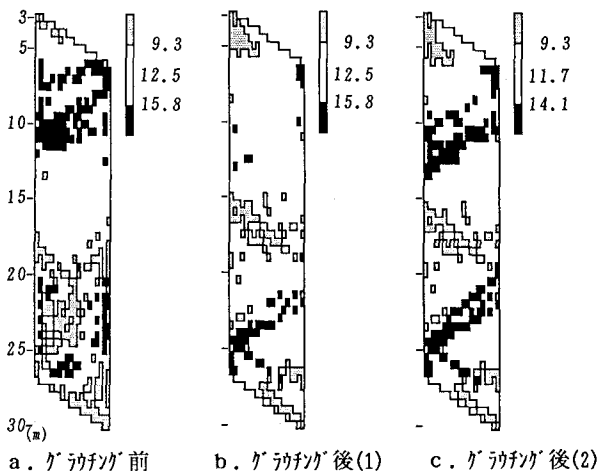
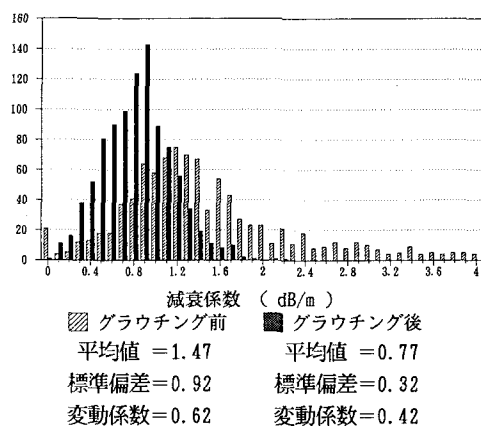
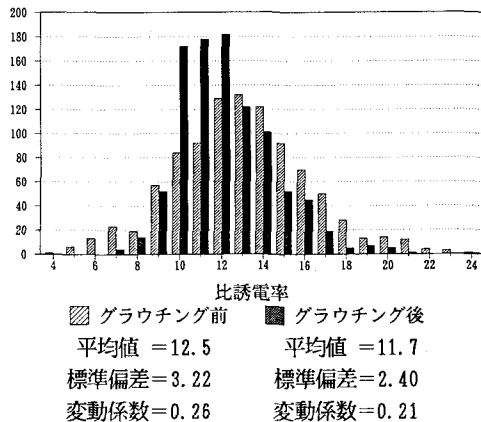


図-5 比誘電率分布

比誘電率 度数分布 (n=1100)



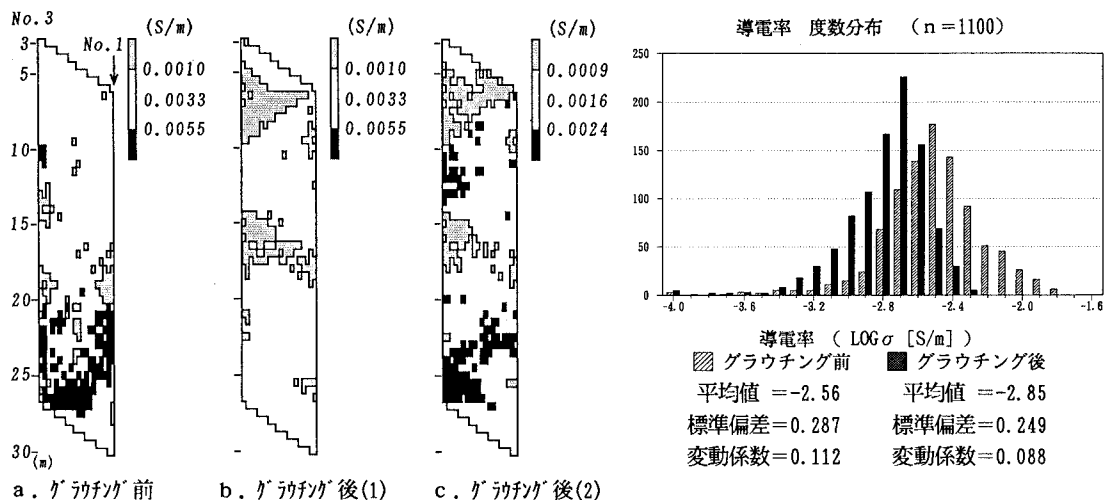


図-6 導電率分布

表-1 地盤を構成する物質の比誘電率 (ϵ_r)、導電率 (σ)

	比誘電率 (ϵ_r)		導電率 (σ [S/m])	
	湿润状態	乾燥状態	湿润状態	乾燥状態
流紋岩 (基質部)	8.0	5.5	0.01	0.001
挟在粘土	50 ~ 4		1 ~ 0.001	
地下水	81		0.01 ~ 0.001	
空気	1.0		≈ 0	
グラウト材	40	4	0.15	0.0009

注1) 流紋岩の値は、調査用孔のボーリングコアを用いた試験結果

注2) グラウト材の値は、室内において硬化させた供試体の試験結果

注3) 表-1より、比誘電率、導電率の大小関係は以下のように表される

比誘電率 (ϵ_r) : 空気 << 基質部 < 挟在粘土、グラウト材 < 地下水
 導電率 (σ) : 空気 << 基質部 < 地下水 < グラウト材、挟在粘土

表-2 調査断面近傍のルジオン値分布

	グラウチング前 (1, 2次孔)	グラウチング後 (3, 4, 5次孔)	グラウチング後 (探査用孔)
平均値	9.10	2.57	3.23
標準偏差	12.46	1.29	2.08
変動係数	1.37	0.503	0.642
データ数	15	10	12

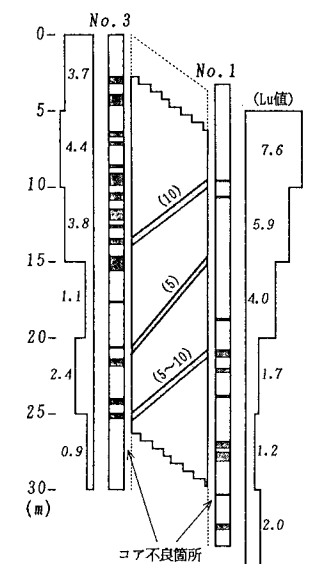


図-7 シームの位置および
調査孔のルジオン値
() 内は地表面でのシームの幅

の飽和状態、挟在粘土の有無、グラウト侵入の有無の8つの組合せに対する岩盤全体の平均比誘電率を求めることができる。ここで、表-1の湿润状態の値とともに、 $n=0.015$ (横坑での調査結果から求めた間隙率)、 $nc=n/2=0.0075$ (挟在粘土含有率[仮定])、 $ng=0.004$ (グラウト全体積と全注入量から概算したグラウト含有率)、 $S=0$ (不飽和時の飽和度)、 $S=1$ (飽和時の飽和度)とすると、岩盤全体の平均比誘電率は $\epsilon=7.85\sim 8.53$ の範囲となる。この中からグラウチングによって電磁波速度が増加する(比誘電率が低下する)組合せを捜すと、グラウチング前後とも飽和状態であって、しかも平均比誘電率の実測値が $\epsilon=11$ 程度とやや大きいことを考慮すると、挟在粘土を含み、用いた間隙率もやや多めに設定した組合せにしなければならないことが判った。

すなわちグラウチング前の岩盤は、ボーリング孔内水位が低いという意味では不飽和であるが、電磁物性で言うと部分的飽和状態にあり、粘土を挟在し、それらが互いに不連続の状態で分布していたものと解釈される。す

なわち、微少亀裂や孤立した亀裂群が雨水起源の水分を保持している可能性は一般に高く、いわゆる不飽和亀裂は開口幅の相対的に大きい透水連続性のあるものと考えることができる。そのような不飽和亀裂に遭遇したホーリング孔は水位を保持することができず、例えば削孔中に逸水を生じる。速度以外の各電磁物性についても、ほぼ同様のことが互いに矛盾なく言える。

4.3 トゲツィに見られる特徴

ここで示したトゲツィは、理解を助けるために、いずれも平均値± σ を境界とする強調を施している。このような強調により、トゲツィの濃淡から構造を推定するという従来の曖昧な解釈の仕方をもう一步進め、岩盤構成要素の電磁物性を念頭に置いた地質学的解釈に発展させることができる。例えばシムとの関係を見てみる。露頭に見られる3本のシムは、いずれも粘土を挟在し、斜めに断面を横切っている。これらのシムは、トゲツィ中に明確には現れないものも1本あるが、他のものはトゲツィ上でのゾーンングを規定するものとして影響を示している。最も下のシムは、上部の亀裂を部分飽和させ下部の不飽和亀裂と分離していたが、不飽和亀裂がグアウトで填充され、シム下部も飽和状態に変化している。上段のシムは同様に上部の飽和亀裂を支えており、シム自体の電磁物性はあまり大きく変化しないものの、それより上部へのグアウト侵入を助けた格好となっている。中段のシムは他と異なり、深部では粘土を挟在していない。このシム周辺は細かい飽和亀裂の集合となっており、グラツィンによってあまり影響を受けていないように見える。

5. 結論

グラツィン前後の電磁トゲツィについて検討を行った結果、岩盤の電磁物性の変化を介して岩盤亀裂に関する興味深い情報が得られることが判った。すなわち、

- 1) 亀裂性岩盤における電磁物性および ρ_{w} 値の ρ_{w} はグラツィンによって減少し、各平均値も微妙に変化した。
- 2) この変化と ρ_{w} の減少は、いずれも亀裂へのグアウト填充によって合理的に説明することができ、電磁波トゲツィによってグアウト効果の補助的判定が可能であることが判った。
- 3) 電磁物性の模式的計算と考察によれば、グラツィン前の岩盤は大部分が互いに連続もしくは孤立した部分的飽和状態にあり、不飽和な開口亀裂がホーリング孔内の水位保持条件を左右していたものと推定される。
- 4) この状態で、グラツィン孔と連続性のある開口亀裂から順にグアウトが填充されてゆくと、空隙が減少するのに伴って透水性が低下し、保水性が改善されて飽和領域が連結するものと想像される。
- 5) グアウトの侵入によって飽和領域が発達すると、透水性の ρ_{w} が平均化されて、やがてホーリング孔内に地下水位が保持されるようになる

など、岩盤構成要素間でのグラツィンによる詳細な変化を示唆する結果が得られた。

今後、岩盤亀裂に関する情報を調査・施工の各時点で収集・総合し、とりわけ電磁波トゲツィを援用することによって、亀裂分布の特徴が抽出され、意味ある岩盤亀裂構造を探ることができるようになると思われる。

謝辞

パルス方式のホーリング岩盤レーダーを協同開発した川崎地質開発部・登内氏他、現場でのデータ採取に協力頂いたパルマ技術本部・弘末、同土木本部・滝沢、同技研・塩崎、構造計測部・六川の各氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 北村孝海、米田俊一、寺戸康隆、中川浩二：岩盤レーダーによる水みち推定およびグラウト硬化過程と効果の推定、土木学会論文集No. 454、pp. 83～92、1992