

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

北村孝海*・米田俊一**・寺戸康隆***・
中川浩二****

電磁波を用いた岩盤の調査を行い、次のような結果が得られた。①岩盤の電気特性の変化は、電磁波の振幅の変化として捉えることができる。②岩盤中の高透水性ゾーン（水みち）が、岩盤中へ塩水を注入する前後の結果の差から推定された。③岩盤にグラウティングを行い、経時的に調査をすることにより、セメントの硬化状況と侵入状況が捉えられ、さらに1ヶ月後の塩水注入前後での調査によりグラウトの侵入範囲が推定された。

Keywords: borehole radar, exploration, hydraulic pathways, grouting effects

1. まえがき

ダム建設の対象地盤は、ますます複雑化、多様化する傾向にある。これに伴ってグラウトの設計・施工数量は一段と多くなり、実用的なグラウト効果の判定方法の確立が望まれている。

このような状況において、近年ボアホール型レーダを用いた電磁波探査技術の発達が見られ、各種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は、他の地盤調査法、特に弾性波探査法と比べて、対象地盤の電気的性質を反映した結果を提供するところにある。換言すれば、地盤の電気的性質の不均一性や不連続性を検出することによる地盤探査が可能であるのみならず、水みちあるいはグラウト効果といった直接あるいは若干の工夫により、地盤の電気的性質を変化させる場合の調査に大きな利点を有するといえる。

この特徴を活かした探査としては、A. L. RAMIREZら¹⁾により、岩盤中に塩水を注入する前後で電磁波探査を行い、注入前後の振幅変化をもとに塩水の浸入領域を割り出し、水みちの推定を行ったものが見られる。また、国内においては、花崗岩盤に塩水を注入し、塩水浸入領域がルジオンテストで得られた高透水性ゾーンとよく一致していることと節理の卓越方向に沿っていることを示した例が見られる²⁾。

一方、地盤の電気的性質を利用する他の方法として比抵抗法（電気探査法）がある。この方法は、探査方法としての歴史も古く、吉住³⁾によってグラウト注入前後の比抵抗の変化を利用してグラウト効果の推定がなされている。また、最近では小島⁴⁾によって、塩水を注入す

る前後の比抵抗の変化から、塩水の浸入領域を推定した事例が報告されている。

このように、電磁波探査、電気探査ともに地盤の電気的性質が変化する調査に適用されているが、特に電磁波探査は電気探査よりも分解能が高いと言われており⁵⁾、詳細な水みち探査、グラウトの施工管理・グラウトの効果判定ができる可能性を有している。

本研究において、筆者らはボアホール型岩盤レーダを用いた電磁波探査によって、水みち探査、グラウトの浸入範囲の推定・止水性の効果判定等への適用実験を試み、その結果を密な間隔でコアリングされたボーリングコア観察結果と比較検討を行うなどによりいくつかの知見を得た。本論文は、これらについて報告するものである。

2. 調査位置および地質概要

調査対象岩盤は、必ずしも良好でないダム基礎岩盤として今後しばしば出現が予想され、グラウトによる改良が必要とされるC_L級岩盤を基準において選定することとした。また、この場合、グラウトに用いるセメントは多くのグラウトに用いられる高炉セメントB種と高炉セメントB種では改良が困難とされる場合に用いられることのある超微粒子セメントを用いることを念頭においている。

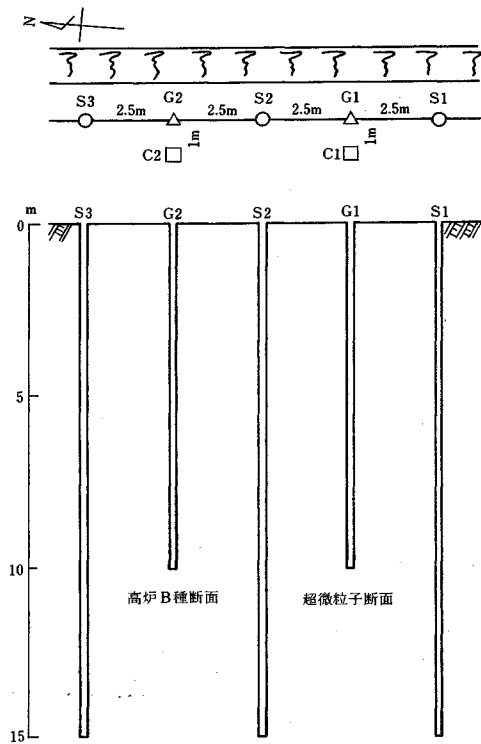
種々検討の結果、調査対象地盤として山口県宇部市にある宇部興産（株）採石場内の一地点を選定した。調査位置の地質は、中生代三畳系である埴生層群に区分され、けつ岩、細粒砂岩からなっている。地表においては節理、層理が発達し、節理・層理に沿い破片状〜塊状に岩片が剝離しやすい傾向を示している。地表およびボーリングコアの観察によれば、岩盤の岩級区分はC_M〜D級の範囲に分布し、多くはC_L級岩盤に相当する。地層の走向はN 80W〜EWとほぼ東西であり、傾斜は50°程度の

* (株)間組 技術研究所
(〒305 茨城県つくば市間組字西向 515-1)

** 工修 宇部興産（株）セメント・関連事業本部

*** 日本基礎技術（株）調査設計第三部

**** 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科



図一 ポーリング孔配置図

北落ちを示しているが、節理は層理に沿うもの、斜交するもの、直交するものと多岐にわたっている。

3. 実験の目的と実験方法、調査・解析方法

(1) 実験の目的と実験方法

本実験において目的としたものは、主として次の諸点である。

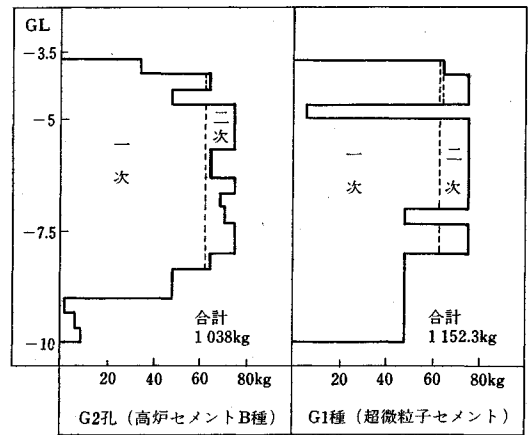
- ① グラウト前の水みちの把握
- ② グラウトの浸入、硬化過程の評価
- ③ グラウト有効範囲の推定

これらの目的のために以下のような実験を行った。

調査地点には岩盤レーダーによる計測のため孔径66mm、深さ15mのボーリング孔を孔間距離5mで直線上に3本(S1, S2, S3)設置した(図一)。計測は、隣接する2孔を利用して透過法により行い、得られた受信波から2孔間での電磁波の伝搬速度と振幅減衰を求めている。

計測の順序としては、まず自然状態の地盤について調査し、次にボーリング孔を用いて地盤に塩水を注入した後調査を行った。すなわち、両計測結果の比較からグラウト前の地盤の水みちが推定されることを期待したものである。

塩水は約5%濃度のものを上記のボーリング孔S3とS2の中間に設けたG2孔の深度GL-3.5~10m



図二 セメント注入量

の区間に注入した。塩水注入は2段階に分けて行い、第一段階では500l、第二段階では944lの注入量であった。第一段階と第二段階の塩水注入後にS3とS2孔の洗浄を行って、各々岩盤レーダーによる探査を行った。

この後、グラウトの硬化過程、グラウトの侵入範囲、グラウトによる止水性の効果を調べるため、地盤にグラウトを注入し、その後経時的な計測を行った。

グラウト注入は、G2孔とG1孔を拡孔(φ66mm→86mm)し、二重管ダブルパッカー注入方式にて行った。グラウト材のセメントは、宇部興産(株)製の高炉セメントB種、超微粒子セメントを用いて、G2孔へは高炉セメントB種、G1孔へは超微粒子セメントを注入した。以降、S3孔とS2孔に挟まれる断面を高炉B種断面、S2孔とS1孔に挟まれる断面を超微粒子断面と呼ぶことにする。単孔注入であるので、両断面にほぼ同量のグラウトが注入されるように強制的な注入を行った。これはトモグラフィ解析を行ってグラウト効果を判定する上での条件を揃えるためである。注入量は、高炉B種セメントが150~225kg/mで総注入量1038kg、超微粒子セメントが150~225kg/mで総注入量1152kgであった。注入圧は10~15kgf/cm²、注入時間は各ステージの平均で、高炉B種断面が44分、超微粒子断面が47分であった。セメント注入量を図二に示すが、配合は1次注入が水:セメント=6:1、2次注入が水:セメント=8:1である。

グラウト注入後は、高炉B種断面および超微粒子断面で経時的に岩盤レーダーによる計測を行った。これらの経時的計測結果から、グラウトの地盤中への侵入、硬化の過程を推測し、後に行うボーリングコアに認められるであろうセメント硬化体と比較することによりグラウチングの状況を把握することを目的としている。

約1ヶ月後の計測が終了した後、グラウトの侵入範囲とグラウトによる止水性改良効果を推定するため、グラ

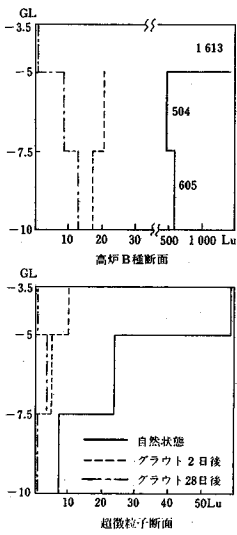


図-3 ルジオン試験結果

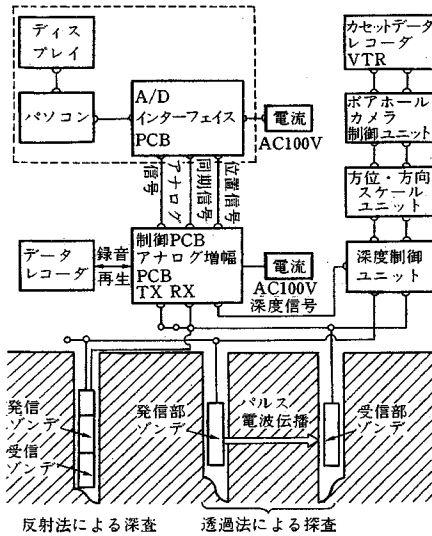


図-4 岩盤レーダーのブロックダイアグラム

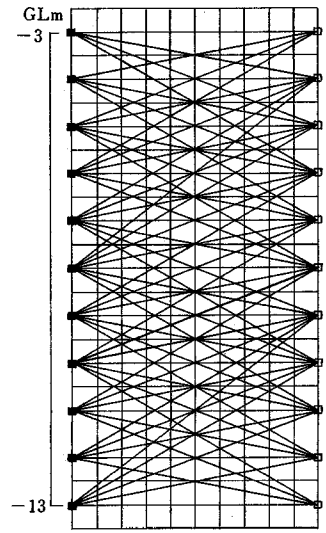


図-5 トモグラフィ測線

ウト注入孔の側方1mに設けたチェック孔C2孔とC1孔へ塩水を注入し、その後さらに岩盤レーダーによる計測を行った。この時の塩水注入は、C2孔へは注入圧1 kgf/cm²で30分間行い注入量約400 l、C1孔へは注入圧2 kgf/cm²で30分間行い注入量約150 lであった。

また、自然地盤およびグラウト注入後の透水性を調査するため、グラウト注入前にはG1およびG2孔を用いて1回、グラウト注入後には2日後と28日後の2回にわたりチェック孔C1およびC2を用いてルジオンテストを行った。ルジオンテストの結果を図-3に示す。

(2) 調査・解析方法

調査に用いた岩盤レーダー探査装置((株)間組・川崎地質(株)共同開発)のブロックダイアグラムを図-4に示す。今回の調査に用いたアンテナは、中心周波数80 MHzである。

トモグラフィ解析データを得るため、アンテナは1m間隔で上昇・下降させ、図-5に示すような測線についてデータを収集した。

トモグラフィ解析は、各セルの初期値の設定はBPT法により、地盤構造の再構成は反復法の中のWART法によった。トモグラフィ解析としては、速度トモグラフィ解析と比減衰トモグラフィ解析を行った。

ここで比減衰トモグラフィ解析で得られる比減衰とは、受信波形の振幅を基準となる定数で割り、その自然対数を用いて各セルの相対的な減衰定数を求めたものである。このため、一般に言われる減衰定数との違いを明らかにするため比減衰と呼ぶこととする。

4. 岩盤中の電磁波伝搬特性

一般に、媒質の電気的特性は誘電率、導電率、透磁率

によって特徴づけられ、電磁波の伝搬特性はこれらによって決定される。

媒質内を電磁波が伝わる際の伝搬速度は式(1)によって表わされる。

$$V = \sqrt{\frac{2}{\epsilon\mu}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)^{-1/2} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、V:媒質内の電磁波伝搬速度(m/sec)、ε:媒質の絶対誘電率(F/m)、μ:媒質の絶対透磁率(H/m)、σ:媒質の導電率(S/m)、ω:電磁波の角周波数(=2πf、f:周波数)である。

また、平面電磁波が媒質中を伝搬するときの減衰は式(2)で表わされる。

$$Ar = A_0 \exp(-\alpha r) \dots\dots\dots(2)$$

$$\alpha = 60\pi\sigma / \sqrt{\epsilon_r} \quad (\sigma / \omega\epsilon < 1 \text{ の場合})$$

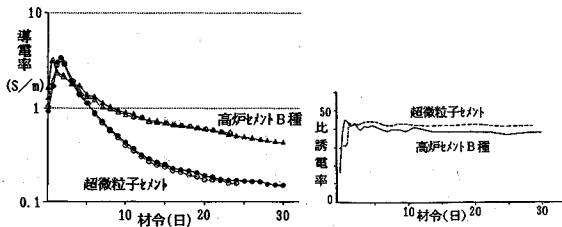
ここに、Ar:距離rでの受信振幅、A₀:発信振幅、r:伝搬距離(m)、α:減衰定数(1/m)、ε_r:比誘電率である。

岩盤は非磁性体と考えられ、上式より岩盤中を伝搬する電磁波の速度および振幅は、岩盤を構成する媒質の誘電率、導電率によって変化する。

いま岩盤内の節理等が地下水、塩水、グラウトによって充填された場合の電磁波の伝搬速度、振幅の状況を理解するために、表-1に示した岩盤、地下水、塩水、グラウトの誘電率、導電率を用いて検討を加える(なお、グラウトについては練り混ぜ直後から硬化過程の比誘電率、導電率の変化例を図-6に示す)。岩体の1m毎に幅1cmの隙間があり、これが5m続く場合を考え、この隙間が同種の岩体、地下水、塩水、グラウトでそれぞれ充填されたときの伝搬速度、振幅を式(1)、(2)を

表一 媒質の誘電率と導電率

種類	比誘電率	導電率 (S/m)	備考
岩盤	10	0.01	実験場けつ岩
地下水	80	0.02	実験場地下水
塩水	80	5	5%濃度
グラウト材	40	1	練混ぜ直後
グラウト材	45	3	極大値発生時
グラウト材	40	0.3	練混ぜ30日後



図一六 グラウト材の導電率，比誘電率

用いて理論的に求めたものが図一七である。

この図から、間隙が塩水、グラウトで充填されると伝搬速度は若干小さくなる（数%低下）程度であるが、振幅は著しく小さく（最小で1%以下）なることが認められる。また、充填物がグラウトの場合には、グラウトの硬化に伴って導電率が変化するため、伝搬速度、振幅も経時的に変化するものと考えられる。

さらに、伝搬経路中に異なる媒質があると、媒質間のインピーダンス比および挟在される媒質の幅によって透過する電磁波の振幅が変化するため、節理が多いゾーンでは振幅減衰がさらに大きいと推定される。

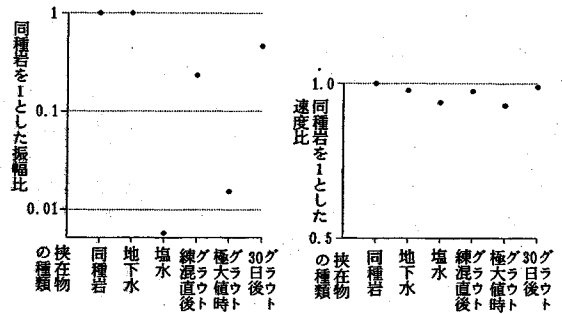
5. 水みち調査

グラウト前の地盤の水みちの状況を把握する目的で高炉B種断面においてG2孔に塩水を注入し、塩水の注入にともなう断面の電気的性質の変化を計測した。なお、ここで言う水みちとは、周辺に比べて高透水性を有するゾーンのことである。

(1) 調査結果

a) 電磁波比減衰トモグラフィ解析結果

自然状態、第一段階塩水注入後、第二段階塩水注入後の電磁波の減衰状況をトモグラフィ解析結果として表したものが図一八(a), (b), (c)である。自然状態においては断面中に顕著な減衰を示す部分はみられず、右上



図一七 挟在物による電磁波振幅，速度の違い

がりの層理あるいは節理に沿ったと思われるいくらか減衰の大きい部分が認められた程度である。しかし、第一段階および第二段階の塩水注入によりGL-7~10m付近の深度で著しく大きな減衰を示す部分の出現が認められる。

いま塩水がどの部分に侵入したかを明らかにするためには、自然地盤の比減衰分布に左右されることなく、塩水注入のみによる変化を見分けることが有効である。そこで、図一八(b)と図一八(a)、図一八(c)と図一八(a)とのトモグラフィ解析結果の差（以下、差トモグラフィ解析結果と呼ぶ。）を示したものが図一九(a), (b)である。凡例のAMP RATIOとは前述の相対的な減衰係数のことであり、差トモグラフィ解析結果のAMP RATIOは、注入後のAMP RATIO - 自然状態のAMP RATIOを表している。すなわち、これらの結果は塩水注入のみによる比減衰分布の変化状況を表していると解釈される。これによると塩水は第一段階の注入ではGL-7.5~9.5mの深度において右上がりの層理に沿った侵入が認められ、第二段階の注入によってその侵入幅が大きくなっている。

b) 電磁波伝搬速度トモグラフィ解析結果

自然状態、第一段階塩水注入後、第二段階塩水注入後の電磁波伝搬速度のトモグラフィ解析結果を示したものが図一十(a), (b), (c)である。自然地盤の結果では、層理の傾斜とほぼ同じ傾斜をもつ速度構造である右上がりの高速度帯の分布が見られる。塩水注入によって若干の速度の低下が見られるが特に顕著とは言えない。

(2) 結果の検討

比減衰トモグラフィ解析結果によるとGL-7~10mの区間において比減衰の変化が著しく、この区間へ導電率の高い塩水が侵入したため、著しい振幅低下が生じたことを示している。またこの状況は差トモグラフィ解析結果である図一九(a), (b)において顕著に表れており、塩水の侵入がかなり狭い範囲に選択的に行われ、かつそれが若干右上がりにある幅で生じたことが認められる。ここで塩水は前述のようにGL-3.5~10mの

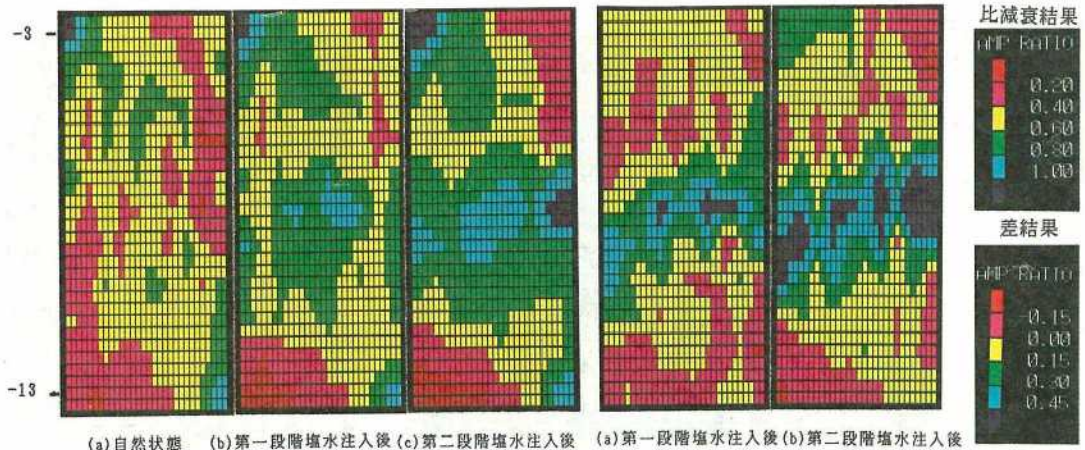


図-8 比減衰トモグラフィ結果 (高炉 B 種断面)

図-9 自然状態との差トモグラフィ結果 (高炉 B 種断面)

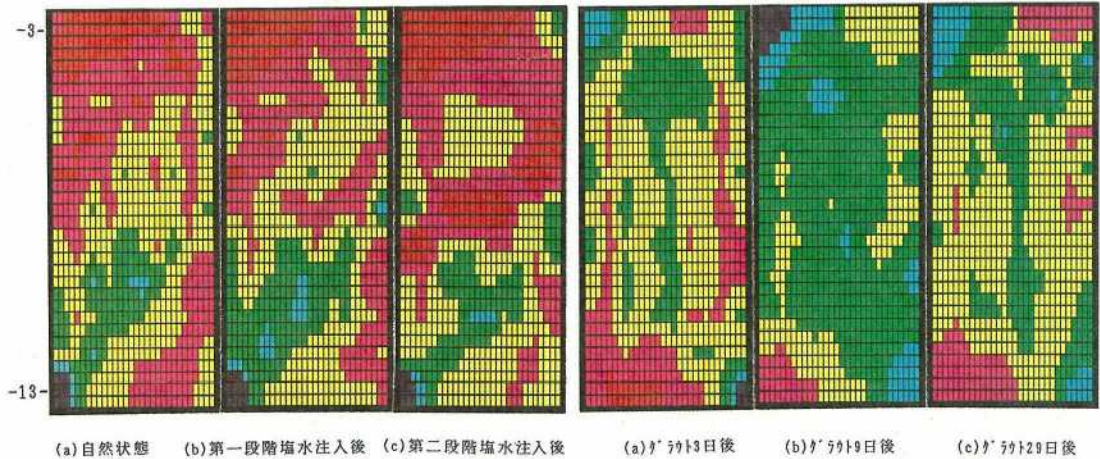


図-10 速度トモグラフィ結果 (高炉 B 種断面)

図-11 比減衰トモグラフィ結果 (高炉 B 種断面)

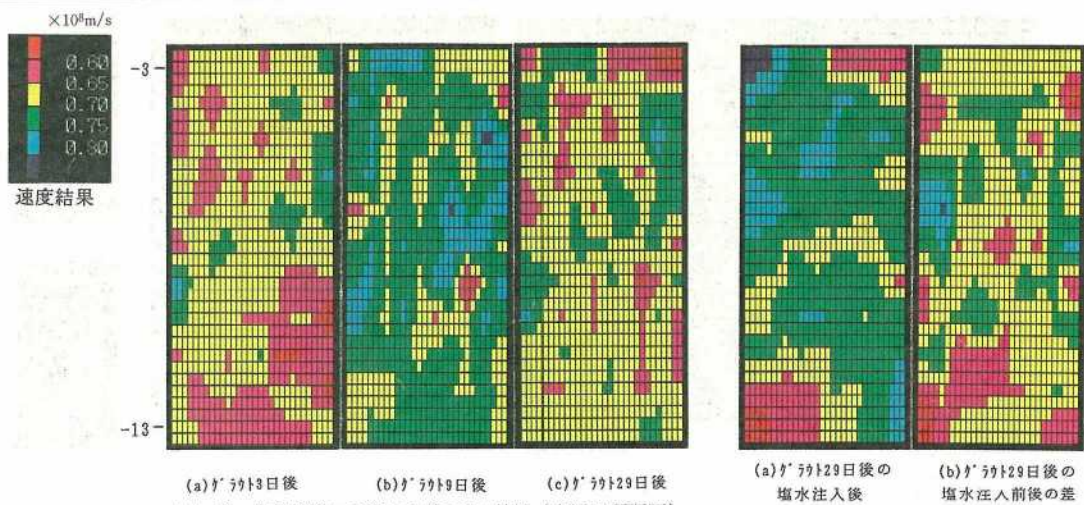
間に 1 ステージの注入を行っており、塩水注入が広い幅に対して行われているにもかかわらず、解析結果から判断すると、GL-7~10 m あたりから集中して地盤中へ侵入したものと推察される。水みちと推定される部分はルジオン値の大きい部分と必ずしも一致しないが、これは電磁波トモグラフィの結果が探索断面の 2 次元の情報を表しているのに対し、ルジオン値はボーリング孔周りの 3 次元、つまりトモグラフィ面外の情報も表していることに起因すると考えられる。

一方、電磁波速度についても塩水注入により若干の速度低下が認められるが、その速度低下の程度はせいぜい 5~10% である。また先の試算によっても岩石中の水が塩水に置き変わっても特に電磁波速度に大きな変化は生じない。このことから、今回のような塩水注入の方法を用いて水みち調査を行う場合には、電磁波速度よりも電磁波の振幅に着目した比減衰トモグラフィ解析結果が有効である。

6. グラウト効果の調査

塩水注入による水みち調査の後、十分と思われる水押しを行い、断面内の塩水を放逐したと考えられる状態でグラウトを行った。グラウトは前述のように二重管ダブルパッカー注入方式によって行った。グラウトの注入圧力は 10~15 kgf/cm²、注入速度は 10 l/min 以下で、注入区間 1 区間 33 cm ごとの注入量は図-2 に示したとおりである。ここで後の参考とするため高炉 B 種セメントには緑色のクロムオキシサイドグリーン GX、超微粒子セメントには赤色のバイフェロックス 110 M の顔料を混入している。

グラウト注入後、高炉 B 種断面においては 3 日後、9 日後、29 日後に、超微粒子断面においては 2 日後、8 日後、28 日後に電磁波計測を行った。さらにグラウト注入 28・29 日後の電磁波計測を終えた後、注入孔の側方 1 m の位置にある C1・C2 孔 (図-1 参照) から先と



図一12 自然状態との差トモグラフィ結果 (高炉 B 種断面)

図一13 比減衰トモグラフィ結果 (高炉 B 種断面)

同様の方法で塩水注入を行いグラウトによる止水性の改良ならびにグラウト侵入範囲の推定を行った。

本章では、5章での速度トモグラフィ結果および4章での試算結果を参考にすると、速度トモグラフィには顕著な差が認められないと予想されるため、比減衰トモグラフィ結果に着目して検討を行うこととする。

(1) 高炉 B 種断面

a) グラウトの侵入による電磁波伝搬特性の経時変化

1) 調査結果

グラウト注入後3日、9日、29日における減衰の状況を示す電磁波の比減衰トモグラフィ解析結果を示したものが図一11 (a), (b), (c) である。これらによると、注入終了3日後の調査では、注入孔近傍に減衰の大きなゾーンが見られ、9日後の調査では減衰の大きなゾーンが調査領域全体に広がり、それが29日後の調査では再び狭くなり注入孔周辺に限られてくる様子が見られた。

いまこの状況をグラウトの侵入とそれに伴う電気的性質の変化として捉えるため、図一11の各図と自然状態である図一8 (a) との差を示す差トモグラフィ解析結果が図一12 (a), (b), (c) である。

これによると、図一12 (a) では若干減衰の変化状態に右上がりの傾向がみられ、図一12 (b) では変化がほぼ右上がりのまま減衰の大きいゾーンが断面全体に及んでいる。また図一12 (c) では図一12 (b) でみられた大きな変化は認められず、図一12 (a) に認められた程度の若干の変化が残るのみである。

2) 調査結果の検討

図一11 から明らかに認められるように、グラウト注入3日後よりも9日後の方が減衰が大きくなっている。これについては、室内実験においてグラウト練り混ぜ直後からの経時変化で誘電率の極大値、導電率の極大値が見られている (図一6参照) ことから、現地で注入した

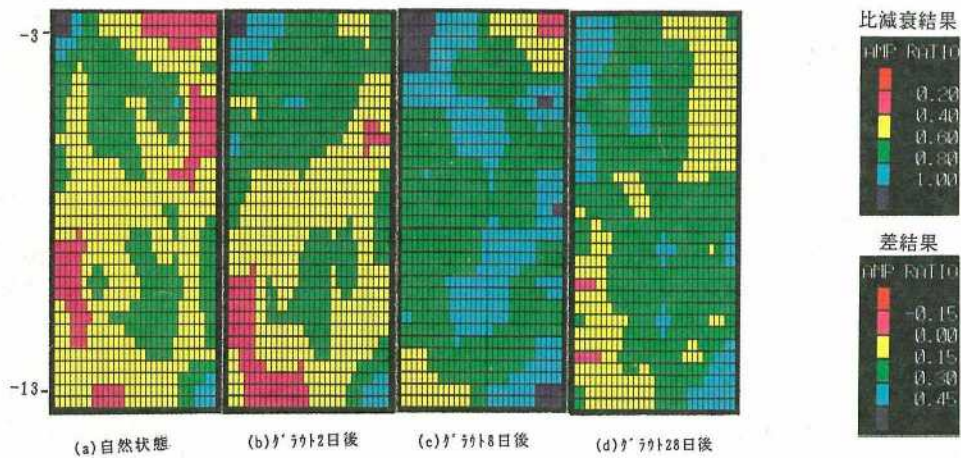
グラウトにおいても硬化過程での導電率・誘電率の変化によって、減衰の極大値が生じたものと思われる。なお室内と現地を比べて、誘電率・導電率の極大値が生じる時期がずれるのは、室内で10~20 cm \times 40 cm \times 40 cm の供試体を作成・養生することと、現地の岩盤へグラウトを注入することとの注入条件・養生条件の違いが大きく影響しているのではないかと考えられる。

また、9日後に減衰が大きくなったものが29日後に減衰が小さくなるのは、これも室内試験での傾向にも見られるとおり、グラウトの硬化に伴う誘電率の減少・導電率の減少を反映したものと判断される。しかし、29日後においても自然地盤の状態への回復には至っていない。

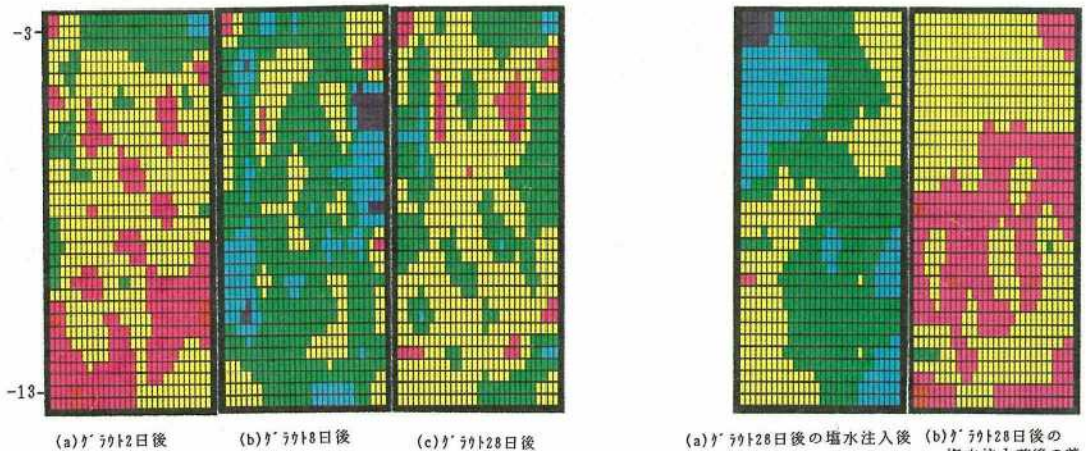
さらに、前章で述べた水みち調査においては、塩水注入によって明かな水みちと思われる領域が認められたのに対し、グラウトにおいては塩水注入の場合ほど顕著な傾向は認められていない。これは塩水注入が長さ6.5 m 区間の1ステージ注入であったのと比べて、グラウトが二重管ダブルパッカー方式による各バルブ (33 cm 間隔) ごとの強制注入によるもので、グラウトが水みちと思われる領域へ選択的に侵入したのではなく、断面に一律に強制注入されたためであると思われる。しかしグラウトにおいても塩水注入の水みちほどではないが右上がりの減衰変化領域の分布は認められ、塩水注入による水みちの推定がグラウト液の侵入方向の推定に有効であることを示している。

b) 塩水注入によるグラウト効果の推定

塩水注入後の比減衰トモグラフィが図一13(a)である。今これを塩水注入による減衰の変化を明らかにするために塩水注入前 (図一11 (c)) との差をとって示すと図一



図—14 比減衰トモグラフィ結果 (超微粒子断面)



図—15 自然状態との差トモグラフィ結果 (超微粒子断面)

図—16 比減衰トモグラフィ結果 (超微粒子断面)

13 (b) となる。

図—13 (b) を見ると、特徴的なことはグラウト孔近くである断面中心近くでの減衰の変化が小さく、少し離れたところで大きく現れていることである。

図—13 から、この断面のグラウト後の水みち及びグラウト効果について次のことが推定される。すなわち、グラウト注入孔の周囲はセメントミルクによるグラウト効果が顕著であり、塩水注入孔からの塩水はグラウト注入孔周囲へ侵入することが困難である。しかし塩水は強制的に注入されるためグラウトの改良範囲の外周部と推定される部分へは侵入し、減衰を大きくさせる。また、グラウト前に認められた水みちはグラウト孔の周囲ではグラウトが充填され消滅したものと考えられる。しかしグラウト孔から離れるとまだ水みちは残存しており、これを通してトモグラフィ断面への塩水の侵入があり、その結果が図—13 (b) におけるグラウト孔から遠いところで減衰を大きくしているものと思われる。このことは、

チェック孔 (塩水注入孔) でのルジオン値が 10~15 Lu (図—3参照) であり、まだ塩水の侵入する節理等がかなり残っており、セメントミルクが十分にそれらの節理に対してグラウト効果を示していないと判断されることと符合する。また、グラウト侵入範囲を図—13 (b) の差トモグラフィ結果から推定するとグラウト孔を中心に左右へ各々 1.5 m 程度と思われる。以上のようなことから、グラウト注入後に塩水注入を行い、その前後での電磁波の調査結果から、塩水の侵入範囲をわりだすことにより、グラウトが不十分な範囲の指摘に有効に利用できるものと考えられる。

(2) 超微粒子断面

a) グラウトの侵入による電磁波伝搬特性の経時変化
1) 調査結果

自然状態およびグラウト注入から 2 日後、8 日後、28 日後の電磁波振幅の変化を比減衰トモグラフィ解析結果

として表したものが図-14 (a), (b), (c), (d) であり、これを先の高炉 B 種断面の場合と同じく、グラウト後の各時期と自然状態との差トモグラフィ結果として表わしたものが図-15 (a), (b), (c) である。これらの図から、グラウト注入前の自然状態と比べて注入終了 2 日後の調査では、注入孔近傍の浅部で減衰の大きなゾーンが見られ、8 日後の調査では、減衰の大きなゾーンが調査領域全体に広がり、それが 28 日後の調査では減衰の大きなゾーンが狭くなる様子が見られる。

2) 調査結果の検討

減衰特性の変化は、前の高炉 B 種断面の場合と同じく、グラウト 2 日後よりも 8 日後において著しくまた 28 日後においてはかなりの回復を示した。この傾向は、高炉 B 種断面の場合と同じであり、やはりグラウトの硬化過程に伴う誘電率・導電率の変化を反映したものと解釈される。また、グラウトによる振幅減衰が断面全体にわたってほぼ一様にみられたことは、セメントミルクの侵入が二重管ダブルバッカー注入方式による強制注入によることもあり、断面にほぼ一様に強制注入されたことによると思われる。

b) 塩水注入によるグラウト効果の推定

塩水注入後の比減衰トモグラフィ解析結果が図-16 (a) であり、これを塩水注入による減衰変化を明らかにするために塩水注入前 (図-14 (d) 参照) との差をとって示したものが図-16 (b) である。

超微粒子断面においては、これらの図から見ると塩水注入前後で減衰にほとんど変化が見られない。

グラウト効果を推定するための塩水注入において、高炉 B 種断面では注入量が 400 l に達したのに対し超微粒子断面では 150 l に留まった。このことから、超微粒子断面においてはグラウト孔の周囲がかなりの範囲にわたってグラウトで止水されており、この部分への塩水の侵入が困難であったものと観察される。これは、チェック孔でのルジオン値が 1~2 Lu であることと対応しており、グラウトがこの断面の節理等によく侵入し、岩盤の止水性が高まっているといえる。

この断面でのグラウト侵入範囲の推定は注入塩水量が少ないこともあって必ずしも容易ではないが、グラウト注入孔を中心に各々左右へ 2.5 m 程度、すなわちほぼ調査領域全体に拡がっているものと考えられる。

(3) 電磁波調査結果とコア観察によるグラウト有効範囲の比較

a) 電磁波調査結果から推定したグラウト有効範囲

電磁波調査結果からのグラウト有効範囲については、図-13 (b)、図-16 (b) に示した結果をもとに推定する。これらの図は、塩水注入前後における振幅減衰の差を表わしたものであり、図中の負の値となっている領域は塩水注入前の振幅減衰が塩水注入後より大きいことを

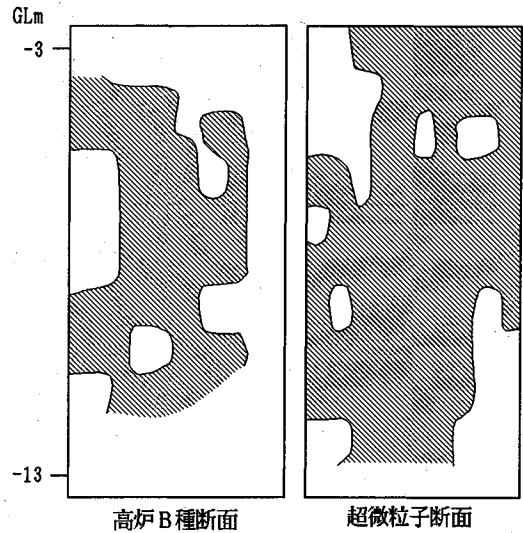


図-17 電磁波調査からのグラウト有効範囲

示し、正の値の領域はその逆を示している。ここで、塩水注入前の振幅減衰が塩水注入後より大きくなる理由が見当たらないことから、負の領域は現地計測時の誤差およびトモグラフィ解析時の誤差が含まれて生じたものと推定される。(誤差が解析結果に与える影響については現在検討中であるが、誤差を定量的に評価することが困難なこともあり、本論では言及しない。)

そこで、トモグラフィ結果に含まれる誤差以上に塩水注入による影響が有意に生じた領域を推定するため、誤差の平均値と標準偏差を求め、(平均値+標準偏差の2倍)以上の変化が生じた領域を塩水領域(グラウト未侵入領域)と判断した。これから推定したグラウト有効範囲が図-17である。この図から、高炉 B 種断面ではグラウト有効範囲がかなり狭いのに対し、超微粒子断面ではかなり広い範囲にわたってグラウトが侵入したものと推定される。

b) ボーリングコアの観察から推定したグラウト有効範囲

調査断面内に 1 m 間隔でボーリングを行い、そのコア観察からグラウト注入時に混ぜた色素を含むセメント硬化体が認められる範囲を包絡するように求めたグラウト有効範囲を図-18 に示す。

高炉 B 種断面においては、グラウト有効範囲はグラウト注入孔を中心として拡がっているがその有効範囲は比較的狭い。

超微粒子断面においては、高炉 B 種断面に比べてグラウト有効範囲が広く、グラウト注入孔から左へ 1.5 m 程度、右へ 2 m 以上の範囲となっている。

また、両断面ともグラウト侵入範囲の上下への広がりについては、グラウト注入区間から上下へ各々 1~1.5

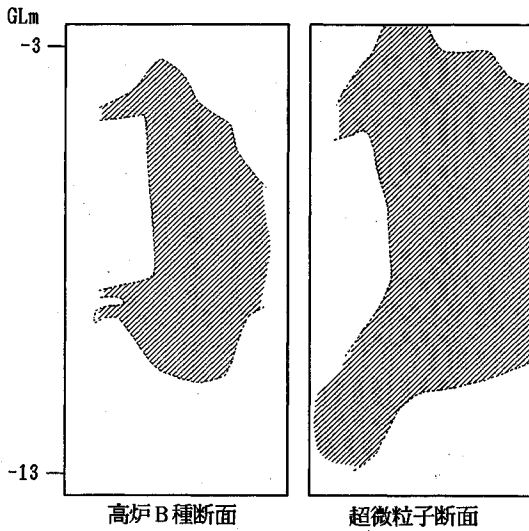


図-18 ボーリングコアからのグラウト有効範囲

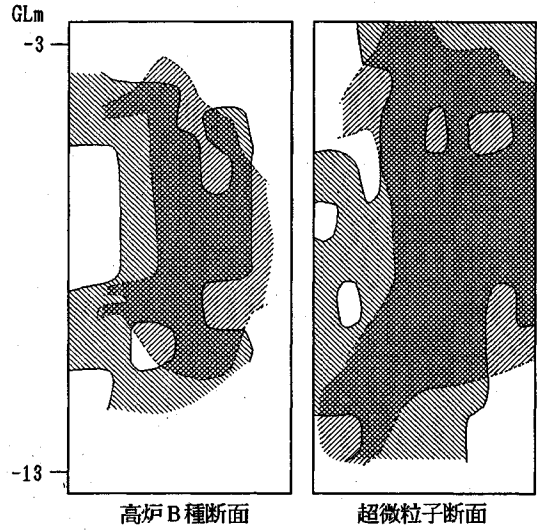


図-19 グラウト有効範囲の比較

m 程度の範囲に侵入するに留まっている。

c) 電磁波調査結果とボーリングコア観察からのグラウト有効範囲の比較

電磁波調査結果からグラウト有効範囲を推定した結果とボーリングコア観察からグラウト有効範囲を推定した結果とを重ねて図-19に示す。電磁波調査結果およびコア観察とも高炉セメントB種より超微粒子セメントの方が広い範囲に侵入したことを示している。岩盤条件が全く同じではないが超微粒子セメントの浸透性が高い可能性を示している。

電磁波調査とコア観察からのグラウト有効範囲を比較すると、高炉B種断面・超微粒子断面とも部分的には推定有効範囲が異なる箇所は見られるものの、全体的な有効範囲としては両者の結果は類似の結果を示していると解釈される。

7. あとがき

本論文では、ダム建設地盤の多様化、複雑化に伴い、ますますその確立が要望されるグラウト効果の判定手法として岩盤レーダーによる電磁波トモグラフィの利用を検討し、その実験から得られたいくつかの知見を示した。得られた結論を列挙すると以下のとおりである。

① 塩水あるいはグラウトが岩盤中へ侵入することによる電磁波の速度の変化率に比べて減衰の変化率がはるかに大きい。そのため、比減衰トモグラフィ結果と速度トモグラフィ結果とを比べると、比減衰トモグラフィ結果の方が地盤の電気的特性の変化を明瞭に反映する。

② 地盤に塩水を注入する前後での比減衰トモグラフィ結果の比較から水みちの推定が可能である。

③ グラウトの侵入・硬化過程は、比減衰トモグラフィ

結果に反映される。

④ セメントミルクの導電率は硬化の過程で大きく変化する。そのため、地盤の比減衰トモグラフィ結果はグラウト硬化の過程で変化し、長期的にはグラウト注入前の状態に近づく。

⑤ グラウト硬化後の塩水注入前後の比減衰トモグラフィ結果の比較により推定された有効グラウト範囲は、高密度に採取されたボーリングコアに認められたセメント硬化後の存在範囲とよく一致しており、定性的ではあるがグラウトの有効範囲の推定が可能である。

以上のように、岩盤レーダーによる電磁波比減衰トモグラフィは水みちの推定、グラウト侵入過程の評価ならびにグラウト有効範囲の推定に有用であることが示された。今後、電磁波による調査法の適用分野を広め、活用して行くためには、地盤物性等との関係、地盤構造との関係の把握、トモグラフィ解析の工夫・信頼性の向上、探査装置の性能向上が必要である。

最後に、現地調査に関して多大な御協力をいただいた山口大学工学部社会建設工学科坂尾技官、学生の皆様、地質およびグラウト侵入範囲の検討で貴重なご指導・御助言をいただいた東建地質調査(株)山口営業所北村所長他の皆様、また調査および結果の検討に御協力いただいた(株)間組、宇部興産(株)、日本基礎技術(株)の関係者の皆様に謝意を表す。

参考文献

- 1) A.L. RAMIREZ and R.J. LYTLE : Technical Note-Investigation of Fracture Flow Paths Using Alterant Geophysical Tomography, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.23, No.2, pp.165~169, 1986.
- 2) 向上弘美・北村孝海・塩崎 功・登内正治: ポアホール

- 型岩盤レーダーによる水みち探査への適用実験, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.136～140, 1990.2.
- 3) 吉住永三郎: ダム工事におけるグラウト効果の電氣的測定, 日本ダム協会第三回コンクリートダム施工技术講習会テキスト, 1972.
- 4) 小島圭二・神尾重雄・石橋弘道・内山成和・斎藤秀樹・島 裕雅: ジオトモグラフィーによる岩盤の画像化(その2) -岩盤内の地下水の流れの画像化-, 応用地質 30巻 4号, pp.1～10, 1989.12.
- 5) 利岡徹馬・竹中 久: 地下レーダーによる花崗岩中の割れ目調査, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.79～84, 1990.11.
- 6) 北村孝海・向上拓美・弘末文紀・登内正治: 亀裂を挟在する岩盤の電磁波伝播特性, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.85～90, 1990.11.
- (1991.8.13 受付)

ESTIMATION OF HYDRAULIC PATHWAYS AND GROUTING EFFECTS BY BORE-HOLE RADAR

Takaomi KITAMURA, Shun-ichi YONEDA, Yasutaka TERADO and Koji NAKAGAWA

An exploration using electric magnetic waves was performed in the rock mass. The results were as follows: ①The change of electric characteristics in the rock mass appears clearly in the change of electromagnetic waves amplitude. ②High permeability zones (hydraulic pathways) were estimated from tomographic data obtained before and after salt water injections. ③Two kinds of cement milk were grouted into the rock mass, and tomographic data were obtained in accordance to the time elapsed. From the results, the general states of the penetration and of the solidification of the cement milk were found. About one month after the grouting, the penetrated regions of the cement milk were approximately estimated by comparison before salt water injection results with after injection results.