

原石山における電気探査比抵抗トモグラフィーの適用と評価

松尾 達也¹・石橋 一恭²

¹(独)水資源機構 総合技術センター (〒330-6008 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2)

²(独)水資源機構 大山ダム建設所 (〒877-0201 大分県日田市大山町西大山482-1) .

大山ダムの骨材は多亀裂性岩盤の安山岩を使用している。浅部の安山岩の掘削開始後、想定よりも材質が良好でなかったため、調査ボーリングおよびボーリング孔を利用した電気探査比抵抗トモグラフィーを実施し、地質状況、材料分布、および材質について調査を実施した。

電気探査比抵抗トモグラフィーは、地下水位以下の地盤で適用されることが多いが、大山ダムの原石採取予定範囲内ではボーリングによる調査範囲内において地下水が確認されなかったため、新たな技術的な試みとして気泡ボーリングの泡をボーリング孔内に充填した電気探査比抵抗トモグラフィーを実施し、原石山の材料分布を把握することができた。

キーワード 電気探査比抵抗トモグラフィー、泡、多亀裂性岩盤

1. はじめに

大山ダムは、独立行政法人水資源機構によって、大分県日田市の筑後川水系赤石川に現在建設が進められており、「洪水調節」「既得用水の安定化・河川環境の保全」「新規利水（水道用水）」を目的とした多目的ダムである。

大山ダムは2010年12月に原石山の骨材採取が終了し、堤体のコンクリート打設が完了した。大山ダムの原石山では2009年12月に骨材採取を開始し、翌年4月に骨材採取予定の安山岩5層(以下、An5層)の上面付近に到達したものの、骨材として使用できる良好な岩が採取できない状況であった。

さらに、An5層の上面付近は不良材を含む様々な材料区分の材料が一つの切羽面に高角度に出現する状況であり、An5層は複雑な地質構造となっていることが想定された。このような複雑な地質構造をボーリング調査だけで把握するためには非常に密な調査を必要とする。そのため、ボーリング調査と電気探査比抵抗トモグラフィー探査(以下、比抵抗トモグラフィー)を併用し、調査費用や期間を削減するための効率的な調査を実施することとした。

比抵抗トモグラフィーはボーリング孔内の電極から電流を流すため、地下水位以下の地盤で適用されることが多い。

しかし、大山ダムの原石採取予定範囲内ではボーリングによる調査範囲内において地下水が確認されず、セメンテーションによる止水や連続注水等も検討したが、多亀裂性

岩盤であり、孔内水を確保することが困難と判断し、かつ効率性および費用を鑑み、新たな技術的な試みとして気泡ボーリングの泡をボーリング孔内に充填した比抵抗トモグラフィーを実施し(特許出願中:特願2009-077261)、原石山の材料分布を把握することとした。

2. 原石山の地質

図-1に当初設計時の原石山地質平面図、図-2に原石山地質断面図(G-5:主測線)、図-3に原石山材料区分断面図(G-5:主測線)を示す。

原石山骨材採取箇所地質は、主として新第三紀鮮新世の釈迦岳火山岩類(410~300万年前:年代測定に基づく)の安山岩並びに自破碎安山岩から構成される。地質構造は、多亀裂性岩盤の安山岩とその周辺の亀裂の少ない自破碎安山岩との互層構造となっている。

既往調査ボーリングにより層厚10m以上の安山岩層を5層確認しており、この5層の安山岩層を下位からAn1層、An2層…An5層と呼んでいる。このうち、骨材対象としたAn5層、An4層は亀裂性の安山岩であり、An5層は表層に近いこと、風化の影響が強い。一方An4層は風化の影響が少なく、非常に堅硬な岩盤である。

各安山岩層の間には自破碎安山岩(Au)が認められ、全体として互層状の地質構造を示している。

骨材として使用する最上位のAn5層は調査時点において、概ね骨材として使用可能なB1材およびB2材(材料区分については次章参照)が分布すると想定していた。

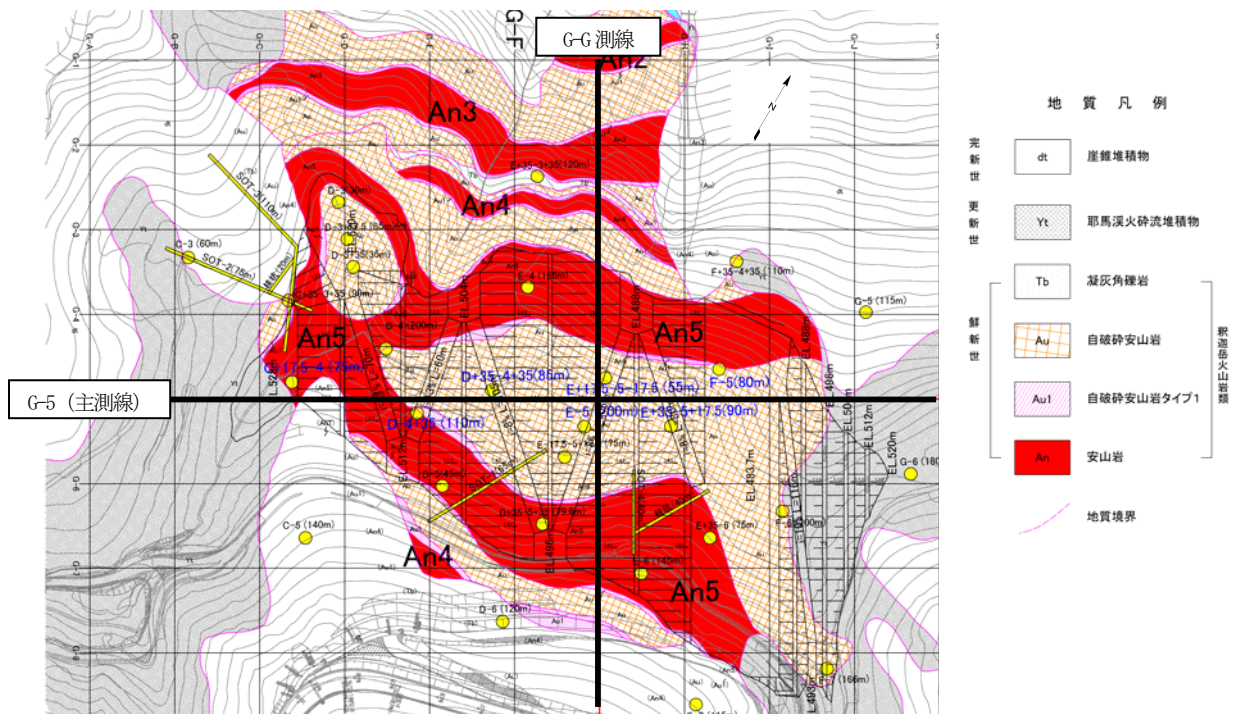


図-1 原石山地質平面図 (当初設計時)

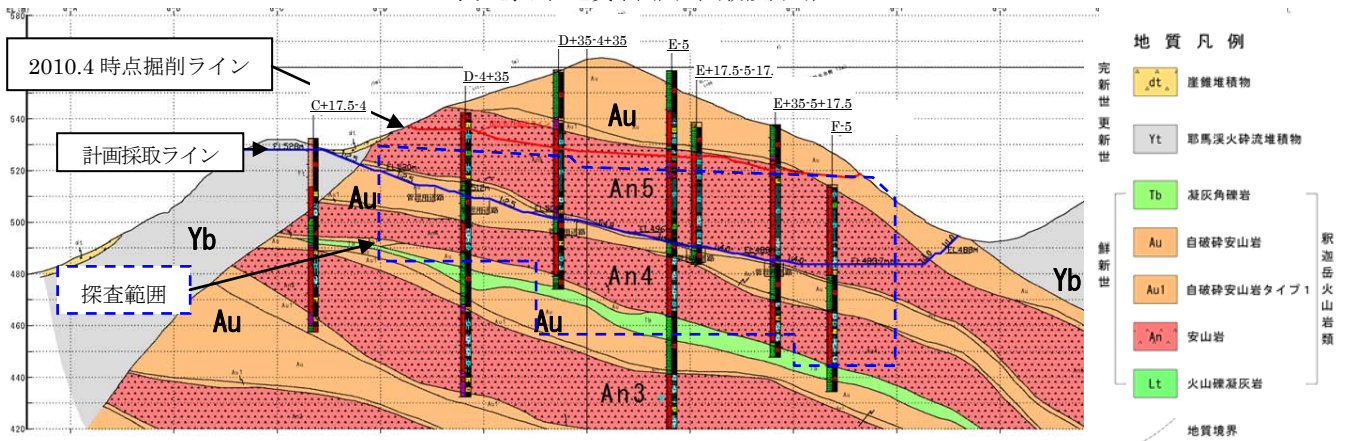


図-2 原石山地質断面図 G-5 測線 (当初設計時)

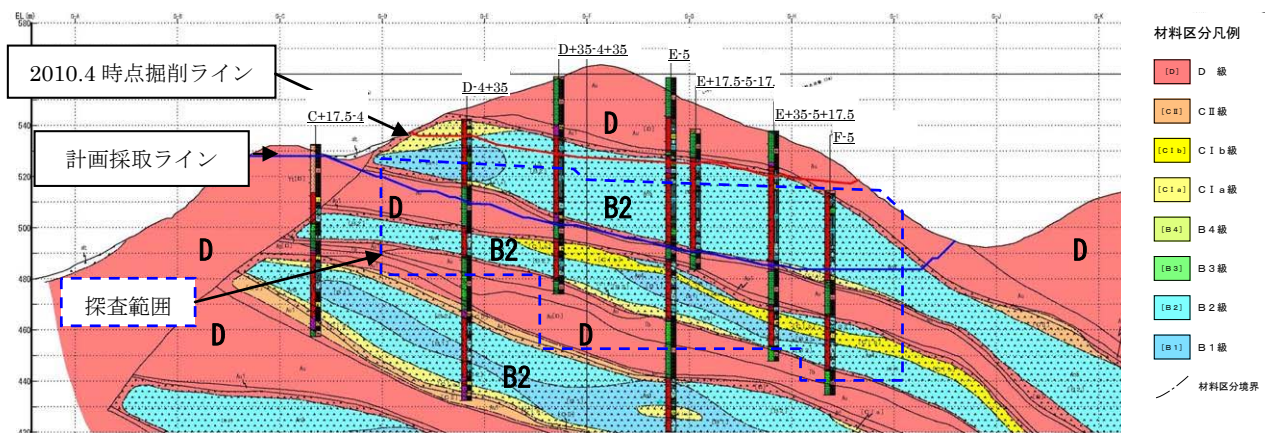


図-3 原石山材料区分断面図 G-5 測線 (当初設計時)

表-1 原石山材料区分表 (比重・吸水率は平均値)

材料区分	特徴	表乾比重(g/cm ³)	吸水率(%)	原石適否	区分	硬軟
B1	安山岩で硬軟区分B以上、割れ目間隔20cm以上。	2.64	1.61	原石○	B	概ね硬塊。ハンマーの強打で割れる。
B2	安山岩で硬軟区分B以上、割れ目間隔10~20cm程度。			原石○	C	中硬質。ハンマーの軽打で割れる。
B2'	安山岩で硬軟区分B程度、割れ目間隔5~20cm程度。岩片自体は堅硬であるが割れ目沿いに土砂又は薄い粘土分を狭在する。少量の不良材を含む。	-	-	原石○	D	軟質。ハンマーのピックで割れる。
B3	安山岩で割れ目に粘土を厚く含む箇所。岩片自体は堅硬であるが割れ目沿いは劣化している。ゾーンとしてほとんど分布しない。	2.46	1.36	△*1		
C I a	安山岩が赤色化した部分。密度・吸水率は規格のボ-ダ-付近である。品質のばらつきは大きい。赤色化が進んだものほど低品質。	2.46	3.20	原石○*2		
C I b	安山岩の多孔質・空隙質部。密度・吸水率は規格のボ-ダ-付近である。品質のばらつきは大きい。	2.46	2.79	×		
C II	自破砕安山岩タイプ1で硬軟区分B~D。中硬質部と軟質部が混在している。	-	-	×		
D	骨材原石として利用できない。	-	-	×		

*1 当初は、粘土分の除去が困難であることから全量廃棄としていたが、骨材採取率向上を図る上で自走式篩い機やスケルトンバケットを使用し粘土分を除去することで一部を原石として使用した。
*2 C I a材は単独材としては骨材品質を満足しないため、B材を混合して使用した。

3. 材料区分

大山ダムの原石山は安山岩が骨材採取対象であり、安山岩について骨材原石としての材料区分(表-1)を行っている。骨材原石として良好なB材(安山岩、B2、B2'、B3材)、若干品質が劣るがB材との混合により骨材原石として利用可能なCIa材、廃棄するCIb材およびD材(表土や崖錐堆積物、および自破砕安山岩)に区分される。

4. An5層上端掘削後のAn5層の状況

2010年4月にAn5層より上部の廃棄岩の掘削が進み、図-2中に示すように、An5層上端の原石採取予定箇所到达了。しかし、An5層のB2材が出現すると予想した標高に達しても、骨材原石となるようなB2材が連続して出現しない状況であった(図-4)。

掘削面状況の観察の結果、堅岩が分布すると予想した箇所について、図-4に示すように、風化の影響等に伴い高角度に軟質部が認められ、堅硬な岩塊と軟質部が高角度に交互に出現するような状況が観察された。



図-4 An5層上端付近の掘削状況

5. 追加調査

(1) 追加調査について

An5層の上端付近の掘削後、様々な材料(不良材を含む)が一つの切羽面に対して複雑に出現する状況であり、An5層は複雑な地質構造となっていることが想定された。このことから追加の調査ボーリングを実施することを検討したが、軟質部が高角度に分布しており、これらの高角度の地質的構造を把握するため、調査ボーリングと比抵抗トモグラフィーを併用して、面的に骨材の分布状況を把握することとした。本調査においては、調査ボーリング10孔(計598m)、およびボーリング孔間を利用した比抵抗トモグラフィー10測線(総延長1,593m)の追加調査を実施した。

図-5に調査ボーリングおよび比抵抗トモグラフィー探索測線位置図を示す。

(2) 比抵抗トモグラフィーについて

比抵抗トモグラフィーとは、物理探査手法の一つで地盤に直流電流を流し、電流の流れにくい部分の分布状況(電位差)から地盤性状を把握する比抵抗探査の一種である。

比抵抗トモグラフィーでは、表-2に示すように風化や変質の要因となる間隙状態や体積含水率および粘土鉱物含有量などを相対的に想定することができる。

掘削後の切羽の岩盤状況は当初想定と大きな相違が認められるとともに高角度の構造が認められ、複雑な地質構造となっていることが想定された。これをボーリング調査のみで把握しようとした場合、非常に密な調査を必要とし、調査ボーリングとトモグラフィーを組み合わせることによって地層の分布を把握することができれば、より少ない費用・期間で複雑な地質構造を把握できると考えた。

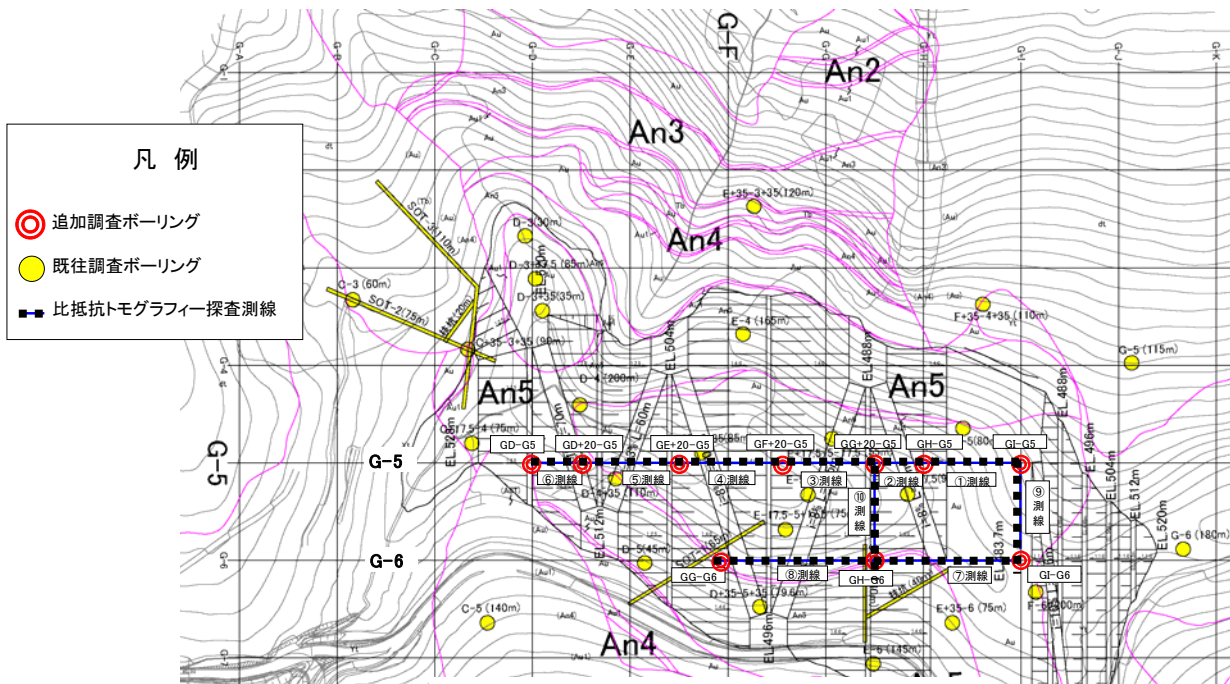


図-5 追加調査位置平面図

表-2 地盤の比抵抗に影響を及ぼす要因

要因	地盤の比抵抗の高低		地盤の関連現象
	低い ←	→ 高い	
間隙率	飽和状態 乾燥状態	大きい ← → 小さい 小さい ← → 大きい	風化、破砕帯
飽和度 (間隙率一定)	大きい ← → 小さい		地下水位
体積含水率 (間隙率 × 飽和度)	大きい ← → 小さい		風化、破砕帯
粘土鉱物含有量 (導電性鉱物)	多い ← → 少ない		風化、変質
地下水の比抵抗	低い ← → 高い		塩水など
温度(地温)	高い ← → 低い		地熱、温水

また、既往検討により吸水率が B2 材で 0.65~2.80%、C I a 材で 2.61~8.45%であり、両者に明瞭な差が認められるとともに廃棄岩の自破砕安山岩では 5.04~14.93%、同じく廃棄岩の凝灰角礫岩では 12.77~17.36%と大きな違いが認められた。当然良質な骨材では吸水率は小さく、不良材では吸水率は大きくなる。各材料区分で吸水率に差があるということは含水比にも違いがあるということであり電気的な比抵抗値にも違いを生じると考えた。よって、特に吸水率の差が大きい B2 材と廃棄岩の C II 材、D 材、および自破砕安山岩は高い確率で分離することが可能と考えられ、地質構造や材料分布の把握に有効と考えた。

(3) 比抵抗トモグラフィー調査の新たな取組

図-6 に比抵抗トモグラフィー測定の様式図を示す。

比抵抗トモグラフィーの測定は、まず調査箇所から約 1km 離れた 2 点に遠電極を設置し、遠電極と測定器を電線で接続した。次に孔内用電極ケーブルと地表電極を設置して測定器と接続した。なお、電極間隔は 2m ピッチとした。

孔内に設置した電極から電気を地盤内に流すには、孔内に通電性のある媒体を充填させる必要があった。

本調査では、孔内に電極が着いたコードの先端に泡を送るホースを接続して、電極コードと泡ホースを同時に挿入し、泡を噴き出させながら孔底まで下ろすことにより、孔内に泡を充填することとした(図-7)。測定中のポイントとしては、測定中も常に泡を噴射し続けること。また、長時間放置しても消えない細粒な泡を作成することである。

今回使用した泡は気泡ボーリングの泡(テルナイト社のテルフォーマー)を使用した(写真-1)。

(4) 調査ボーリングと比抵抗トモグラフィー測定結果

図-8 に主測線 G-5 測線における調査ボーリング結果及び比抵抗トモグラフィー結果を基に作成した比抵抗トモグラフィー断面図を示す。G-5 測線の測定範囲は調査ボーリング GD-G5 孔~GI-G5 孔間の標高 530~430m の範囲である。

An4 層は An5 層よりも側方連続性が良く高比抵抗部を追跡できる。An5 層中の B2 材と B3 材との境界は起伏に富み複雑である。An5 層中には高角度の自破砕安山岩 D 材、An4 層中にも B3 材相当の低比抵抗を示す高角度の構造が認められた。

図-9 に G-5 測線の材料区分断面図(骨材採取終了時)を示

すように、An4 層と An5 層間の自破砕安山岩 D 材の層厚や An5 層の上端部の B2 材と B3 材の境界の複雑な構造は掘削結果から概ね想定通りであった。

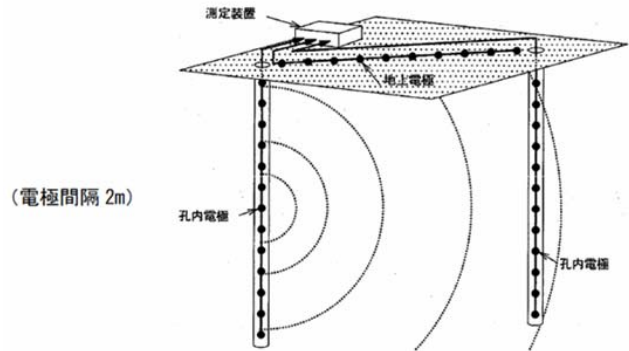


図-6 比抵抗トモグラフィー測定様式図¹⁾

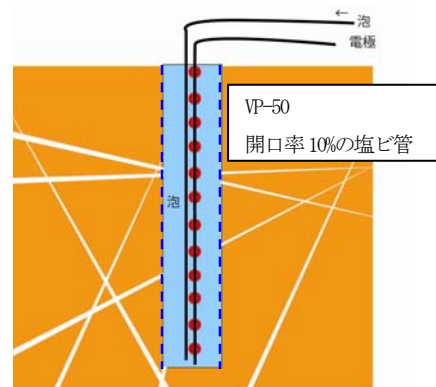


図-7 孔内の測定方法概念図



写真-1 孔口における使用した泡の写真

以下に G-5 測線の調査結果から想定された事象を述べる。

a) GE+20-G5 孔と GF+20-G5 孔間(標高 495~510m)に分布する低比抵抗領域：A 領域)

この低比抵抗領域の上位に位置する掘削面では吸水率の高い(すなわち低比抵抗)自破砕安山岩が分布している。このことからこの低比抵抗領域は地表から自破砕安山岩 D 材まで高角度に連続しているものと想定される。また、この自破砕安山岩の幅は掘削面や比抵抗断面図の情報から 15~20m と想定できた。

b) GG+20-G5 孔の孔口付近の低比抵抗領域 (B 領域)

GG+20-G5 孔周辺の地表部は降雨後の水はけが悪く、GG+20-G5 孔のボーリング結果においても自破碎安山岩が地表から 7.5m 程度まで連続しており、比抵抗トモグラフィー結果とも整合的であった。

c) An5 層の B2 材と B2' 材について

An5 層の B2 材と B2' 材との境界は比抵抗分布と調査ボーリング結果から区分した。比較的比抵抗の部分が不規則に認められ、B2 材と B2' 材の境界は起伏を伴って複雑に分布すると想定される。特に GF~GI 間では起伏の激しい箇所が認められ、調査ボーリングのみでは想定できなかった。また、B2' 材は An5 層上部に広く分布し、B2 材は An5 層の下部に主として分布することが想定できた。B1 材は、高比抵抗値を示す部分が少ないことから、その分布は少ないと想定される。なお、An5 層の比抵抗値は An4 層に比べ全般的に低い値を示すが、これは An4 層に比べボーリングコアの観察結果から岩盤内の割れ目が多く、割れ目内に粘土を狭在することにより含水比が An4 層より多くなっているためと想定される。

d) An4 層と An5 層間の自破碎安山岩

比抵抗分布と調査ボーリング結果により、An4 層と An5 層間の自破碎安山岩 D 材の層厚は 10~15m 程度で側方への連続性は良いと想定される。

比抵抗値としては 200~600Ω・m 程度の低い比抵抗値が得られた。

e) An4 層の B1 および B2 材

An4 層には C1b 及び B3 材が局所的に認められるものの、ボーリングコアの性状及び比抵抗分布から B1 および B2 材が主として分布すると想定される。また、概ね An5 層よりも An4 層の方が高比抵抗値を示す部分の割合が高く、良質な材料の占める割合が多いと想定される。

比抵抗値としては 500~1000Ω・m 以上の高い比抵抗値が得られた。

6. 追加調査結果と調査実施後の掘削状況

図-9 に骨材採取終了時点 (2010 年 11 月) での G-5 測線の材料区分断面図を示す。

骨材採取終了時点の掘削状況と追加調査ボーリングおよび比抵抗トモグラフィー測定から想定した材料区分を比較すると、以下の通りである。

- (1) An4 層と An5 層間の自破碎安山岩 D 材の層厚は概ね想定通りであった。
- (2) GE+20-G5 孔~GF+20-G5 孔間の標高 495~510m 付近に分布する低比抵抗領域は地表から自破碎安山岩 D 材まで高角度で連続せず、想定と異なった。
- (3) An5 層の上端部は B2' 材を主体とし、B2 材と B2' 材の境界は起伏に富み、複雑な構造を呈し、比抵抗トモグラフィーで想定された材料区分は想定通りであった。

GE+20-G5 孔~GF+20-G5 孔間の標高 495~510m 付近に分布する低比抵抗領域が地表から自破碎安山岩 D 材まで高角度で連続せず、想定と異なった点については、G-5 断

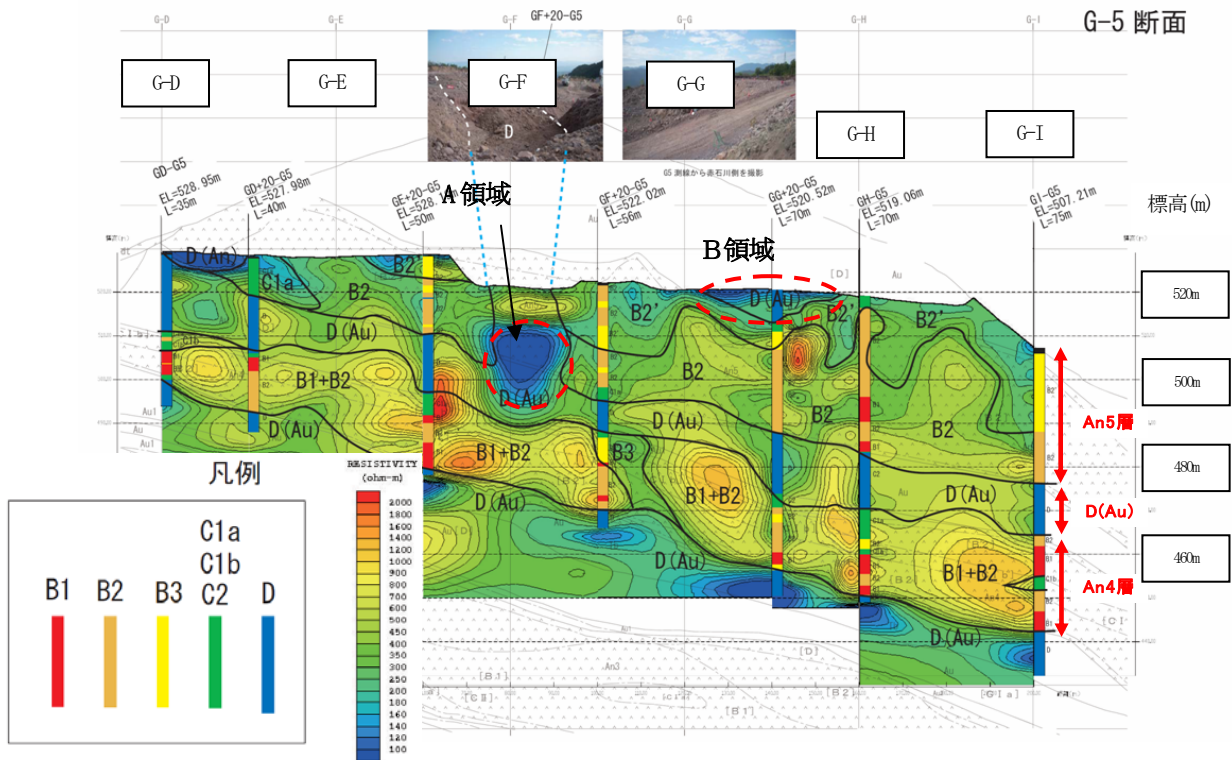


図-8 G-5 測線における比抵抗トモグラフィー断面図

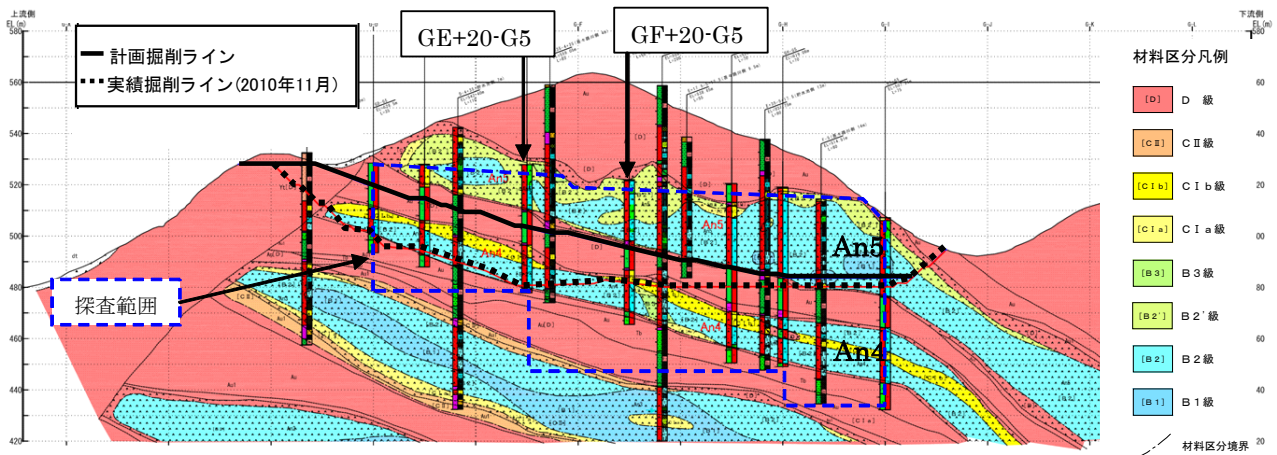


図-9 骨材採取終了時点での材料区分断面図(G-5 測線)

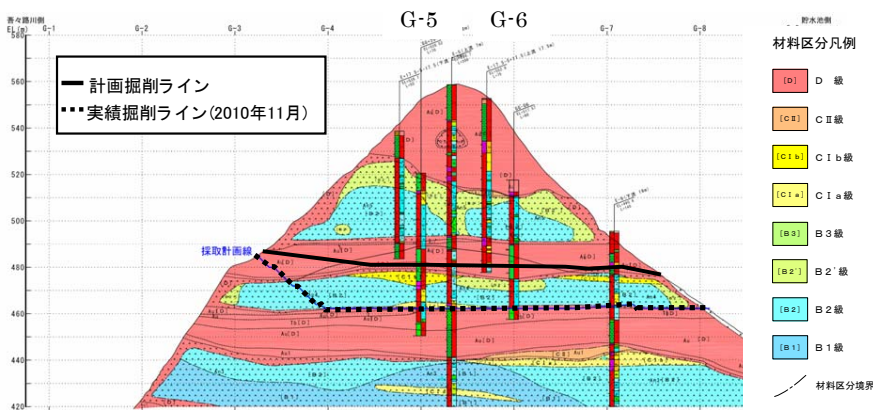


図-10 骨材採取終了時点での材料区分断面図(G-G 測線)



写真-2 G-G 測線付近の B2' 材

面上では下部に B2 材が認められたものの、B-5 断面に直交する材料区分図 (図-10 G-G 断面) から、近傍に粘土を多く狭在する B2' が鉛直に分布しており、この B2' の低比抵抗部を反映したものと考えられる (写真-2)。

また、An5 層の上端付近の起伏の富んだ状況や An5 層と An4 層間の自破砕安山岩 D 材については概ね想定通りの材料区分の骨材が採取できており、本論での調査検討は有効であったと考えられる。

7. まとめ

本論では、地下水の認められない箇所を実施したボーリング孔内に泡を使用した比抵抗トモグラフィーの適用および調査結果と現状の掘削状況を比較し、比抵抗トモグラフィー調査結果について評価を行った。

- 地下水の認められない多亀裂性岩盤である安山岩分布領域において、ボーリング孔内に泡(テルナイト社テルフォーマー)を使用することで孔間比抵抗トモグラフィーが実施可能であった。
- 比抵抗トモグラフィーにより、An4 層の B1 および B2 分布範囲では 500~1000Ω・m 以上の高比抵抗、An5 層と An4 層の間の自破砕安山岩 D 材では 200~600Ω・m 程度の低比抵抗の比抵抗値が得られた。An4 層の B1、B2 材の分布範囲と、An5 層と An4 層の間の自破砕安山岩 D

材を比抵抗値で区別することができた。

- 調査ボーリングと比抵抗トモグラフィーを併用した解析結果と実際の切羽の材料区分は概ね一致し、原石山全体の材料分布を把握することができ、本調査は有効であった。

8. おわりに

本論での検討結果を基に、An5 層のみでは骨材必要量を満足しないことが想定されたため、その下位の An4 層まで掘削を行い、骨材を採取した。

本検討にあたり新たな技術的な試みとして、多亀裂性岩盤の安山岩で地下水の認められない岩盤領域で泡を用いた比抵抗トモグラフィーは有効であることが確かめられた。

今後、このような条件下で地質構造を調査する場合の有効的な調査手法の一環となれば幸いである。なお、泡を用いた比抵抗トモグラフィー手法については、(独)水資源機構、(株)熊谷組、ダイヤコンサルタント(株)および(株)ジオフィールの4社で共同特許出願中である。

参考文献

- 1) 物理探査学会(2000), 物理探査適用の手引き(とくに土木分野への適用), p41.