

北海道の国道トンネル事業における電気探査の留意点

防災地質チーム

1. はじめに

電気探査は、トンネル建設の際に弾性波探査に次いでよく実施される物理探査である。その目的は、弾性波探査では十分に評価できない地質構造(例えば、深部に軟弱層=低速度層が予想される場合など)を知ることにある。電気探査で得られる比抵抗は、孔隙率、飽和度、固結度、粘土含有率、温度、岩盤強度および地下水の有無や状態に応じて、同じ地質体や岩石でも異なる値をとる。この性質を利用して、地下の地質状況や地下水流動を評価するもので、地すべり調査、地下水資源の評価、廃棄物処分場でのモニタリングなどに広く利用されている¹⁾。

本調査では、北海道の国道トンネル事業で実施された電気探査の事例を総括し、同探査法による地山評価の留意点を整理したので、以下に報告する。

2. トンネル事業における電気探査の事例

表-1に北海道の国道トンネルの地質調査で電気探査が実施された事例を示す。ここ数年間で、16トンネル、延べ約45.1kmが実施されている。これまで、防災地質チームでは、北海道の国道トンネル建設における地質的課題を整理するとともに、地質と比抵抗との対応について整理を行った^{2~3)}。今回調査では、収集、整理した事例について、測定仕様やデータの管理、トンネルの延長と探査延長、最大土被り厚さと探査深度、主な地質および適用目的について整理した。

2. 1 測定仕様やデータの管理

電気探査による地山評価の善し悪しは、測定データの品質の良否に左右される。このため、品質が後日確認できるように、測定時の仕様や探査データの詳細を電子データなどで保管することが重要である。必要な項目を以下に示す。

- ①電流・電位電極の座標値：とくに遠電極の位置
- ②測定位置図：縮尺、方位、測線、測点の位置
- ③測定方法：探査方式、測定手順、電極間隔、探査深

度、測定機器(名称、性能、分解能)

- ④解析方法：実際に行った処理手順ならびに内容
- ⑤解析結果：測定データ、初期モデル、理論モデルおよび比抵抗モデルの図面

今回の事例では、測定データに関する記載が省略、または不明なケースがみられた。これらを適切に管理しないと、追加探査による地山評価の精度向上に制約を受け、トンネル施工時の地山評価との対比で探査精度の検証を行うことが困難になるなど、課題が生じる。なお、データの品質に直結する、地山に応じた電流強度の設定については、3. 1章で述べる。

2. 2 トンネルの延長と探査延長、測線数

トンネルの延長と探査延長、測線数の関係には、下記の3つのケースがある。

(1) 1測線(トンネル延長 \leq 探査延長)

このケースは、全部で3事例(No. 4, 11, 16)である。トンネル路線全体において、同一条件でデータが得られるため、工学的に課題となる地質構造や岩相分布の見落としを少なくすることができる。しかし、下記のケースに較べると探査延長が大きく、調査コストも増大する。

(2) 1測線(トンネル延長 $>$ 探査延長)

このケースは、全部で6事例(No. 2, 3, 8, 10, 12, 15)である。詳細な地質性状を確認したい箇所(例えば、トンネル坑口部)だけを対象とするため、ケース(1)より経済的である。しかし、探査範囲が限定的なため、工学的に課題となる箇所の見落としリスクが、ケース(1)よりも高くなる。

(3) 複数測線を設定

このケースは、全部で7事例(No. 1, 5, 6, 7, 9, 13, 14)である。トンネル坑口部や計画ルート上に地すべり、また探査の必要範囲が複数存在する場合である。ケース(2)と同様、探査範囲が限られる場合が多いが、探査測線を交差または複数設定することで面的な比抵抗分布の取得が可能になる場合がある。

現在のところ、各断面において2次元解析のみを行うことが一般的である。しかし、最近では、探査デー

表-1 トンネル地質調査における電気探査の適用事例

トンネル			探査		主な地質	電気探査の適用目的と評価の概要
No.	延長 (m)	最大 土被り 厚さ(m)	延長 (m)	深度 (m)		
1	2,910	60	2,250 (2測線)	75	溶結凝灰岩、砂岩泥岩、 堆積物	地質構造・分布、水理状況の把握を目的に、比抵抗のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
2	2,699	320	2,050	200	砂岩泥岩、蛇紋岩	地質構造・分布、水理状況の把握を目的に、比抵抗のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
3	4,678	380	1,920	200	砂岩泥岩、蛇紋岩、 緑色片岩	地質構造・分布、水理状況の把握を目的に、比抵抗のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
4	1,142	140	1,200	200	火山角礫岩、石英安山岩（一部に熱水変質作用を受けたゾーンが分布）	トンネル工事中における施工計画への活用、地質構造の把握を目的に、低い比抵抗分布（100Ωm以下）のなかで、さらに低く分布（30Ωm以下）する箇所を粘土化帯（地質境界）として推定
5	1,719	60	10,220 (4測線) 近接	200	火山角礫岩、石英安山岩（一部に熱水変質作用を受けたゾーンが分布）	ルート選定に向けた断層破砕帯・変質帯の分布状況の把握、掘削ずり対策を目的に、比抵抗のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
6	1,970	170				
7	2,995	300	8,700 (5測線)	500	安山岩溶岩、自破砕溶岩	ルート選定に向けた断層破砕帯・変質帯の分布状況の把握、掘削ずり対策を目的に、低い比抵抗分布（200Ωm以下）のなかで、岩石の分布や変質帯の区分を行うための基礎資料として活用
8	2,900	180	1,700	200	火山角礫岩、溶岩、石英安山岩（一部に熱水変質作用を受けたゾーンが分布）	トンネル工事中における施工計画への活用、地質構造の把握、掘削ずり対策を目的に、浅部と深部に比抵抗のコントラストにより、岩石の分布（キャップロック構造）とトンネル計画位置付近における地層境界の存在を推定
9	1,485	190	3,780 (9測線)	150	流紋岩、玄武岩	ルート沿いの貫入岩とその周辺の変質帯の分布状況の把握、掘削ずり対策を目的に、低い比抵抗分布（100Ωm以下）のなかで、変質帯の区分を行うための基礎資料として活用
10	910	30	200	30	玄武岩、枕状溶岩、石灰岩、 チャート（付加体堆積物）	トンネル坑口部における斜面安定性の検討を目的に、開口亀裂を多く含む石灰岩やチャートの分布状況を推定
11	2,001	290	2,500	300	火山角礫岩、溶岩、石英安山岩（一部に熱水変質作用を受けたゾーンが分布）	ルート沿いの貫入岩とその周辺の変質帯の分布状況の把握、掘削ずり対策を目的に、比抵抗と充電率のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
12	1,299	160	1,100	200	凝灰岩、溶結凝灰岩、 砂岩泥岩	トンネル工事中における施工計画への活用、地質構造の把握、掘削ずり対策を目的に、沢部における低比抵抗の分布を地層の境界部、狭在する砂岩泥岩層の分布を推定
13	1,973	110	2,800 (5測線)	150	砂岩泥岩、蛇紋岩、 緑色片岩	不良岩盤や特殊区間を迂回するルートを選定に向けた地質構造の把握、また予想された速度逆転層（屈折法弾性波探査）の推定を目的に、比抵抗のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
14	1,515	150	3,100 (5測線)	200	蛇紋岩、黒色片岩、 緑色片岩	地質構造の把握、また予想された速度逆転層（屈折法弾性波探査）の推定を目的に、比抵抗のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
15	1,220	80	400	150	粘板岩、凝灰岩、石灰岩、 チャート（付加体堆積物、 貫入岩）	ルート沿いの断層破砕帯・変質帯の推定、また弾性波探査による低速層の確認を目的に、比抵抗のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
16	2,998	260	3,150	300	蛇紋岩、緑色片岩	地質構造・分布、水理状況の把握を目的に、比抵抗と充電率のコントラストによって、地質分布やその境界を推定
計	34,414		45,070			

タを同時に扱う3次元解析(正確には疑似3次元解析)を比較的経済的に行えるようになってきている^{4~5)}。このような手法を導入することで、より精度の良いトンネル地山評価を行うことができることから、現場の状況に応じて、これらを使い分けることが望ましい。

2. 3 トンネルの最大土被り厚さと探査深度

トンネルの最大土被り厚さと探査深度の関係には、以下の2つのケースがある。

(1) トンネルの最大土被り厚さ ≤ 探査深度

このケースは、全部で13事例(No. 2, 3, 9以外)である。トンネル掘削位置までの情報が得られており、地山評価に有効に活用できる。

(2) トンネルの最大土被り厚さ > 探査深度

このケースは、全部で3事例(No. 2, 3, 9)である。No. 2と3は、トンネル坑口周辺の浅層部のみを電気探査の対象としているため、評価深度を探査深度より浅く設定している。また、No. 9では、複数の測線を面的に設定しており、トンネルルートを対象として、十分な情報を得ている。なお、探査深度は、評価したいと考えるトンネルの最大土被り厚さを探査深度として設定するのが望ましいが、コストその他の理由で設定できない場合がある。この場合、探査深度より深部の測定の精度は低いことに十分留意する必要がある。

2. 4 トンネルの地質と適用目的

トンネルの地質と適用目的の関係には、以下の5つのケースがある。電気探査は、岩石に応じて比抵抗値が異なる性質を利用して、地山の地質状況を推定する方法である。図-1に岩種別の比抵抗値を示す。ここで、比抵抗値に大きな差のある岩石(例えば、チャ

ートと泥岩)の判別は容易だが、比抵抗値に差がない岩石(例えば、蛇紋岩と泥岩)の判別は難しい。

(1) 堆積岩類と火山岩類からなる地山

このケースは、全部で2事例(No. 1, 12)である。主な適用目的は、堆積岩類と火山岩類の分布やその境界の推定である。岩種別の比抵抗値は、堆積岩類 < 火山岩類であることが多く、この違いをもとに両者を評価している。また、火山岩類でも比抵抗値が低い場合は、熱水変質を受けている、軟弱な火砕岩類を挟在するなど、工学的な問題の多い場合があり、その判別にも利用される。

(2) 堆積岩類と蛇紋岩・緑色片岩類からなる地山

このケースは、全部で3事例(No. 2, 3, 13)である。主な適用目的は、地質分布やその境界の推定である。岩種別の比抵抗値は、堆積岩類 < 蛇紋岩・緑色片岩類であることから、この違いをもとに評価している。なお、堆積岩類(泥岩)と葉片状蛇紋岩は、ともに比抵抗値が低く判別が難しいため、強制分極法⁶⁾による充電率を計測し、両者を区分することも有効である⁷⁾。

(3) 火山岩・火砕岩類からなる地山

このケースは、全部で7事例(No. 4~9, 11)である。主な適用目的は、火山岩・火砕岩における熱水変質帯や断層破碎帯の存在の推定である。また、低い比抵抗分布から、さらに低い比抵抗の分布箇所を粘土化帯として抽出するための検討や充電率による評価(No.11)を行っている。

(4) 付加体堆積物からなる地山

このケースは、全部で2事例(No.10, 15)である。主な適用目的は、断層破碎帯や変質帯、特定岩種(石灰岩、チャート)の分布状況の推定である。また、屈折法弾性波探査による低速度層の確認を行っている。

(5) 蛇紋岩と片岩類からなる地山

このケースは、全部で2事例(No.14, 16)である。主な適用目的は、両者の地質分布やその境界の推定である。また、屈折法弾性波探査による低速度層の確認を行っている。なお、風化した緑色片岩と蛇紋岩は、ともに比抵抗値が低く判別が難しいため、充電率による評価(No.16)を行っている。

3. 測定・解析・評価における留意点

電気探査の測定、解析、評価にあたっての留意点について以下に述べる。

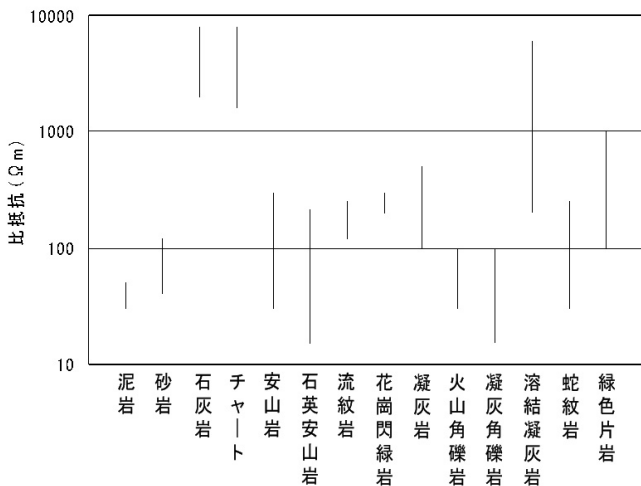


図-1 岩種別の比抵抗値²⁾

3. 1 地山に応じた電流強度の設定

地盤を均質な半無限媒質と仮定した場合、電極から距離 r における測定電位 ϕ は、次式⁸⁾のとおり、地盤の比抵抗 ρ と電流値 I に比例し、距離 r に反比例する。

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

上式から、電流値 I が大きいほど測定電位も大きくなり評価精度はあがる。同式はまた、地盤の比抵抗が小さい場合や距離が大きくなる場合にも、より大きな電流を流す必要があることを意味している。つまり、地山(岩石)の比抵抗値と探査深度に応じて、地中に流す電流を加減する必要がある(電流が小さいと測定値がノイズレベル以下となり評価が難しくなるが、電流を必要以上に大きくすればコスト上昇を招く)。

同一測線の測定データは、電流電極から距離が離れるほど電位が小さくなる(逆に電位電極に近い方が電位は大きい)。この特徴をよりわかりやすく表示する方法が電位減衰曲線である。図-2に2極法における電位減衰曲線の例を示す。電位減衰曲線は、横軸を距離(電極番号)、縦軸を電位として、測定データをプロットした図である。

電位は、地盤の比抵抗が均質であれば、距離の増加とともに一様に減衰する。しかし、地形の影響や特殊な地盤の比抵抗構造によって電位減衰曲線が一様に減少しない場合、または、原則的に電位減衰曲線は、一様かつ単調に減少して隣の電位減衰曲線と交差することはないが、曲線が交差してしまう場合は、周辺環境や外部のノイズの影響を受けている可能性があるため、その確認が必要である。以上のような電位減衰の性質をもとに、測定データの良否を確認することは簡

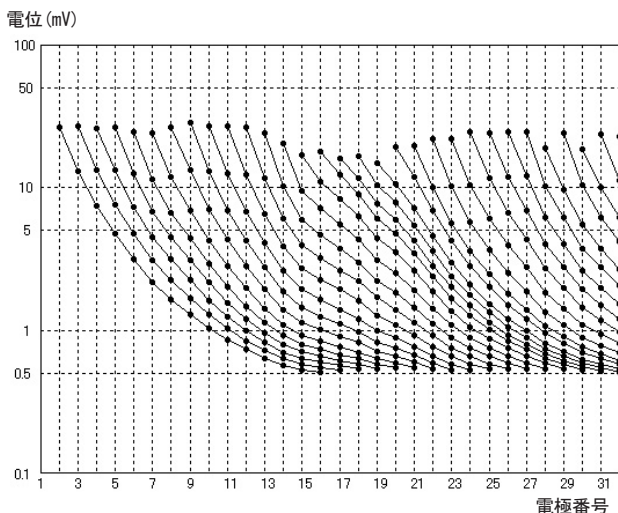


図-2 2極法における電位減衰曲線の例

易で有効といえる。

測定データの品質は、その探査結果の精度を左右することから、測定では、十分かつ適切な電流が流せるかどうか、または、ノイズレベルよりも大きな値が得られるかについて、事前に検討する必要がある。

3. 2 解析

電気探査の解析では、概ね、以下の①~④の流れによって、比抵抗分布が求められる(詳細は文献6、8~9などを参照)。

- ①初期モデルの作成
- ②順解析による理論モデル
- ③比抵抗モデルの作成
- ④比抵抗分布の決定

解析では、初期モデルと理論モデル(主に有限要素法によって作成)を比較し、その残差が小さくなるように反復的に修正することで比抵抗モデルを作成し、最終的な比抵抗分布を決定している。この比抵抗モデルを修正する過程を逆解析という。逆解析では、非線形最小二乗法という数値解析手法を適用することで、測定データを最も再現するモデルを構築することができ、その最終的な比抵抗分布を解析結果としている。

今回の収集事例では、解析での反復計算回数や残差の収束率に関する記載がない場合があったが、これらの情報も参考となることから記載は必要である。また、解析では、市販されているソフトウェアを使用する。逆解析のアルゴリズムは、ソフトウェア毎に若干の違いは存在するが、ほぼ同様な性能を有していると考えられる。そのため、解析自体よりも、むしろ前述のとおり、測定データの確認と解析結果である比抵抗分布に対する十分な検討や評価が必要である。

3. 3 評価

3. 3. 1 比抵抗と地質性状

電気探査では、地盤の比抵抗構造を得ることができ、その構造から、地質構造を一意的に決定することは困難である。ただし、調査箇所の地質が判明しており、その部分で比抵抗の違いがある場合、ある程度、地質性状の推測が可能となる。

トンネル地山での電気探査では、とくに低い比抵抗分布が、その施工時に問題となることが多い。そのため、同じ地質状況において、低い比抵抗分布を示す箇所は、その原因について詳しく検討する必要がある。

この場合、風化の程度や含水率(飽和度)、粘土鉱物の量比、間隙率、地下水の比抵抗の違いなどのうち、

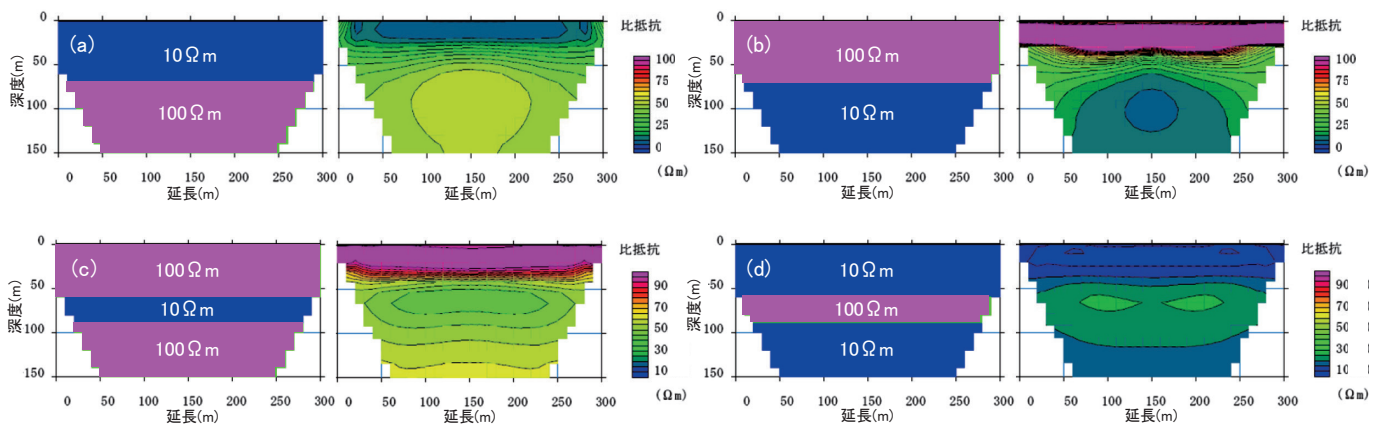


図-3 数値シミュレーションによる比抵抗の検出性(左：検討モデル、右：解析結果)

どの原因が低い比抵抗分布の要因となっているかの評価が重要である。

3. 3. 2 比抵抗分布とその検出

地盤内において比抵抗値が変化する場合、比抵抗値の違いや分布状況に応じて、その検出状況が異なる場合のあることが想定される。そこで、数値シミュレーションによって、その検出性の違いについて検討した。

図-3に比抵抗のコントラスト別、深度別に単純なモデルを用いて解析した結果を示す。

検討では、比抵抗のコントラストを10:100として、深度別(浅部、中間部、深部)かつ比抵抗の高低を逆転させた層状の4ケース(a, b, c, d)を設定して、延長300m、深度150mを対象範囲として解析した。解析では、応用地質(株)製の「ElecImager/2D」を用いた。以下に、層状の比抵抗体の検討結果について述べる。

検討ケース(a)では、深部の100Ω mの比抵抗体が、浅く検出され、約50Ω mとして評価される。

検討ケース(b)では、深部の10Ω mの比抵抗体が、浅く検出され、約10～30Ω mとして評価されるが、当初の10Ω mと同程度な値として、評価が可能といえる。

検討ケース(c)では、中間部の10Ω mの比抵抗体が、幅広く検出され、約50Ω mとして評価される。また、深部の100Ω mの比抵抗体は、薄く検出され、約50～60Ω mとして評価される。

検討ケース(d)では、中間部の100Ω mの比抵抗体が、厚く検出され、約30～50Ω mとして評価される。ただし、深部の10Ω mの比抵抗体は、薄く検出され、当初の10Ω mと同程度な値であることから、深部に相対的に低い比抵抗体が存在する場合、評価が可能といえる。

以上のことから、電気探査では、地質体の比抵抗値

のコントラストによって、検出精度が異なることが単純モデルを用いたシミュレーション結果からも判断される。これらの原因は、主に電気探査の特性(電気は流れやすい箇所を選択的に通過する)によるものであり、電気探査の測定データの扱いや解析、解釈の際に留意する必要がある。このため、実際に探査を実施する前に、地質踏査などの情報をもとに、数値シミュレーションによって概略的な検出性の適否について検討することで、電気探査による検出限界箇所の存在を想定することができ、より効率的な探査計画が立案できると考えられる。また、今回の数値シミュレーション結果のように、一般に深部で比抵抗が変化するような構造の場合(例えば、検討ケース(c))、その変化を求めることは難しい。このような状況が、地表踏査などの地質調査結果より想定される場合、探査深度を大きく設定するなど、探査計画の変更についても、数値シミュレーションを用いた検討が有効と考えられる。

4. まとめ

今回の事例分析によって、電気探査における留意点を以下のように整理した。

1) 電気探査の測線長と測線数

電気探査では、現在のところ2次元解析が一般的だが、現場状況によっては、複数の測線を設定し、比較的経済的に行える3次元解析(正確には疑似3次元解析)を適用するなど、より精度の良いトンネル地山の評価について検討することが望ましい。

2) 電気探査の探査深度

電気探査による探査深度は、トンネルの最大土被り厚さ以上に設定することが望ましいが、コストその他の理由で設定できない場合、探査深度よりも深

部の測定精度は低いことに留意する必要がある。

3) 比抵抗値以外の測定値による評価

堆積岩類と蛇紋岩、風化した緑色岩と蛇紋岩、熱水変質作用を受けた岩石の分布する箇所では、ともに比抵抗値が小さく判別が難しいため、強制分極法による充電率を計測し、その境界や分布を推定することも有効である。

4) 地山に応じた電流強度の設定

電流が大きいほど測定電位も大きくなり評価精度は向上するが、地盤の比抵抗が小さい場合や距離が大きくなる場合にも、より大きな電流を流す必要がある。つまり、地山(岩石)の比抵抗値と探査深度に応じて、地中に流す電流を加減する必要がある(電流が小さいと測定値がノイズレベル以下となり評価が難しくなるが、電流を必要以上に大きくすればコスト上昇を招く)。

5) 電気探査結果の解釈

電気探査では、とくに低い比抵抗分布を示す箇所が、施工で問題となることが多い。その原因として、風化の程度、含水率(飽和度)、粘土鉱物の量比、間隙率、地下水の比抵抗の違いがあるが、それらの評価が重要である。また、深部で比抵抗が変化するような構造の場合、検出精度が異なることが想定されることから、実際に探査を実施する前に、地質踏査などの情報をもとに、数値シミュレーションによって概略的な検出性の適否について検討することで、電気探査による検出限界箇所の存在を想定することができ、より効率的な探査計画が立案できる。

6) 電気探査結果の整理と保管

電気探査では、測定データの品質の良否が解析・解釈を左右するため、その良否が判断できる資料として、下記の情報や電子データの保管が必要である。あわせて、適用目的に対する解釈(例えば、比抵抗と地質の対応など)のコメントも不可欠である。

- ①電流・電位電極の座標値(とくに遠電極の位置)
- ②測定位置図(縮尺、方位、測線、測点の位置)
- ③測定方法(探査方式、測定手順、電極間隔、探査深度、測定機器(名称、性能、分解能))
- ④解析方法(実際に行った処理手順ならびに内容)
- ⑤解析結果(測定データ、初期モデル、理論モデルおよび比抵抗モデルの図面)

5. おわりに

本調査では、これまでに北海道の国道トンネルの地

質調査で実施された電気探査の事例を収集し、その特徴を整理するとともに、いくつかの留意点について、まとめた。これらの情報が、電気探査の計画の立案、測定データの確認などに役立つと幸いである。

今後は、事前に実施した探査の結果と実際の施工で判明した地質状況との検証を行い、より精度の良い地山の地質評価に向けた技術資料の作成を進めたい。また、新たな事例の分析によって、地質と比抵抗分布の対応を判断するための情報の蓄積やフィードバックの体系の構築に向けた取り組みについても進めたい。

最後に、本調査の実施にあたりトンネルの地質調査ならびに物理探査結果に関する資料の提供などで、ご協力いただいた国土交通省北海道開発局の担当者に、ここに記して、厚くお礼申しあげる。

(文責：岡崎 健治)

参考文献

- 1) 物理探査学会：最新の物理探査適用事例集、2008.
- 2) 地質調査における電気探査の活用、寒地土木研究所月報、No.651、pp51-54、2007.
- 3) トンネル建設における地質的課題(2)～計画・調査段階における物理探査法～、寒地土木研究所月報、No.673、pp36-40、2009.
- 4) 杉本芳博・中里裕臣・竹内陸雄・金 喜俊・井上敬資・山田直之・青野哲雄：2次元電気探査データを活用する実用的な3次元電気探査、物理探査学会第111回(平成16年度秋季)学術講演会論文集、pp165-168、平成16年9月.
- 5) 櫻井 健：実用的な3次元電気探査の測定方法の検討、物理探査学会第110回(平成16年度春季)学術講演会論文集、pp70-73、平成16年5月.
- 6) 物理探査学会、物理探査ハンドブック、第5章・電気探査1998.
- 7) 大塚智久・岡崎健治：蛇紋岩の地質特性を考慮したトンネル調査事例、日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会、平成23年度研究発表会講演予稿集、vol. 3、pp13-16、平成23年6月.
- 8) 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹：建設・防災・環境のための新しい電気探査法、比抵抗映像法、1995.
- 9) 災害科学研究所：地盤の可視化と探査技術、2001.