

VLF を利用した探査法による老朽化法面調査の適用性

Slope Aging/Deterioration Survey by VLF-EM Method

山本剛 Tsuyoshi YAMAMOTO (国土交通省近畿地方整備局)
 藤原康正 Yasumasa FUJIWARA ((株)エイト日本技術開発関西支社)
 楠見晴重 Harushige KUSUMI (関西大学)
 松岡俊文 Toshifumi MATSUOKA (京都大学大学院工学研究科)

道路法面は、定期的に道路防災点検や巡回等により目視や簡易な計測を主とする方法により、維持管理されている。しかしながら、施工後 30~40 年経過したものが多く、老朽化が問題となっており、道路法面内部の状況を調査した上で健全性評価を行うことが不可欠となりつつある。これまでの法面内部の調査方法としては、ボーリング調査や弾性波探査など比較的高額で時間を要する手法が主であり、多数の法面を安価に概査できる方法の開発が望まれている。このため、迅速かつ安価に法面内部の情報を得る方法として VLF (Very Low Frequency) という低周波電波を利用した電磁探査法の適用を試みた。この方法により、道路法面の内部状況を簡便かつ定性的に捉えることが可能であることを報告する。

キーワード: VLF-EM 探査, メンテナンス, 道路法面, 老朽化

(IGC : C-2, H-9)

1. はじめに

我が国では、戦後の高度成長期に数多くの道路が整備され、切土法面対策として吹付コンクリートなどによる法面保護工が多用されてきた。しかし、その多くは供用後 35 年以上が経過し、老朽化が進んできており、法面崩落などの災害が生じている。特に近年は、降雨強度の高い雨の発生頻度が上がってきており¹⁾、土砂災害も近年増加傾向にある²⁾。このため、災害対策を行っているが、自然災害等による通行止め回数は減少傾向とはなっていない³⁾。

全国で「要対策箇所」と判定されながらも未対策として残されている道路法面は約 65,000 箇所(2007 年 3 月現在)ある⁴⁾。道路管理者は、そのような老朽化法面に対し、定期的に道路防災総点検や巡回等により対応しているのが現状である。しかし、道路防災総点検等は、表面に現れる現象(亀裂や湧水など)を目視で確認し、簡易的な計測によりその進行状況を確認するのが主体で、法面内部の状況把握までには至っていない。これら目にみえない劣化状況を正確、客観的に確認することができれば、それに応じた対策工を実施し、未然の災害発生防止や、道路の延命化にもつながることが期待される。一方、法面内部の調査方法として、ボーリング調査や弾性波探査などが試みられているが、費用も高く、すべての道路法面に行うことは、経費的な制約から困難である。このため、法面内部の深部状況を簡易に概略調査できる探査法の開発が望まれる。

筆者らは、この簡易な概略探査法として、受信部のみで探査可能な VLF-EM (Very Low Frequency-Electromagnetic method) に

よる法面探査について試みたので、ここに報告する。

VLF は、潜水艦との通信のため発信されている電波であり、この電波を利用した VLF 探査は電磁探査法の一つである。

VLF 探査は 1964 年頃よりカナダで研究されはじめ、日本では 1970 年頃より鉱床探査の概査調査法の一つとして導入された方法である⁵⁾。

VLF 探査は、これまでは主に鉱床探査や断層探査、地下水探査の手法として利用、研究されてきた。一方、道路法面など土木構造物に対する利用は、極めて稀な状況にある。

2. VLF (Very Low Frequency) による探査の原理

2.1. VLF電波について

VLFは3kHz~30kHzの周波数範囲にあたり、潜水艦通信に利用されている超長波の電磁波である。

日本では図-1に示すように宮崎県えびの高原に発信があり、22.2kHzの周波数で発信されている。日本におけるVLF-EM探査では、このえびの局からの電磁波を利用することが一般的であるが、通信状況がよければハワイ局やオーストラリア局も受信可能である。なお、えびの局については、毎月第三火曜日、2・5・8・11月には第三火曜日から四日間、停波するため注意が必要である。

2.2. VLFによる探査の原理

VLF電波を利用して電磁探査の一種であるVLF-EM探査による

法面探査を試みた。電磁気探査には磁場の2成分（垂直成分と水平成分）を測定するEM探査と、電場、磁場を測定するMT探査の2種類があるが今回はEM探査を行った。

図-2はVLF発信局から遠方での電磁波の概念図である。VLF電波は、VLF発信局から十分に遠方では平面波とみなすことができるが⁶⁾、地下に異常部（低比抵抗物質）があった場合、2次電流が発生し二次磁場が形成される。

VLF-EM探査は、この水平磁場と同じ位相の鉛直磁場成分および90°位相のずれた成分をアンテナにより測定することにより、地下の異常部を検出する方法である。

水平成分と垂直成分は、同じ周期で変動しているが位相が異なっているため、その合成ベクトルは楕円を描く。この楕円の長軸と水平軸とのなす角 θ 、楕円直軸と短軸との比 ε を求める。鉛直二次磁場成分は水平成分に比較して小さいため、式(1)に示す近似式が成り立つ⁶⁾。式(1)の $\tan \theta$ を同相成分、 ε を離相成分とよびパーセントで示される。

$$\tan \theta = R \cos \Delta \quad (1)$$

$$\varepsilon = R \sin \Delta$$

ここに、

$$R = |H_z / H_y| \quad (2)$$

$$\Delta = \theta_z - \theta_y$$

R：垂直磁場と水平磁場の強度比の絶対値

Δ ：垂直磁場と水平磁場の位相差

なお、測定は、直線となる測線を設け、測線上に適当な等間隔に測定点を設けて行う。測定中は、各測定点において、常にアンテナの向きがVLF発信局に向ける必要がある⁷⁾。

2.3. VLFによる探査結果の解析方法と解釈

VLF-EM探査による探査結果および解釈について、物理探査学会は、図-3に示すような岩脈モデルを例に示している⁸⁾。

図-4に示すように周辺と異なる比抵抗部（以下、異常帯と記す）では二次磁場（ H_z ）が発生する。この二次磁場の鉛直成分の方向は図-5に示す方向を有する。VLF-EM探査でこの二次磁場を測定すると、図-6に示すような測定値が得られる。この測定値から式(3)⁹⁾に示す微分フィルタの一種であるフレイザーフィルタ処理を用いて等価電流密度（ F_0 ）を計算する。

フレイザーフィルタ処理は、1983年にKarous and Hjeltが提案した式⁹⁾で、電気探査結果とVLF-EM探査による探査結果との対比から得られたものである。フレイザーフィルタ処理により得られる値は、等価電流密度と呼ばれ、測定点間隔距離と同じ深度に電流が集中していると考えた場合の電流密度として定義されている。図-6に示すようにVLF-EM探査においては異常帯付近において測定値が急変する。この測定値急変部をフレイザー

フィルタ処理することにより、図-7に示すように異常帯直上にピークが生じるよう処理し、異常帯位置の特定を行いやすく

VLF stations

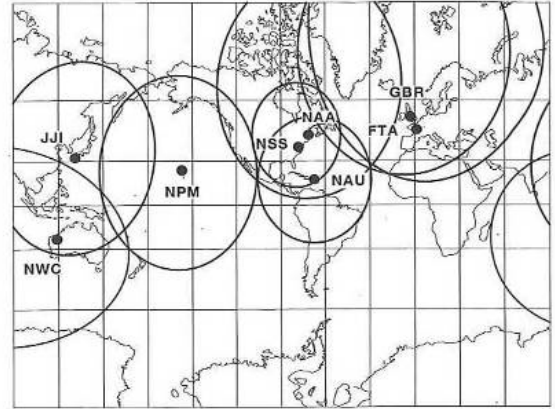


図-1 VLF発信局⁶⁾

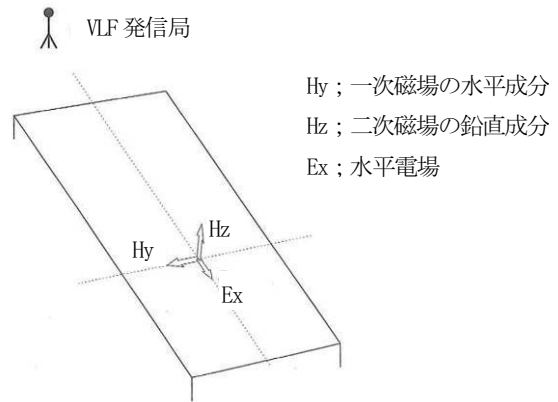


図-2 VLF発信局から遠方での電磁場⁶⁾

している。なお、図-6 および図-7 中の実線で示すグラフが同相成分（式(1)の $\tan \theta$ ）を示し、点線で示すグラフが離相成分（式(1)の ε ）を示す。VLF-EM探査結果の解釈としては、図-7に示すように式(3)により等価電流密度に変換した測定結果の高い値を示す箇所が低比抵抗部を示していることとなる。

$$F_0 = -0.102H_{-3} + 0.059H_{-2} - 0.561H_{-1} + 0.561H_1 - 0.059H_2 + 0.102H_3 \quad (3)$$

ここに、

- F_0 : 着目地点の着目深度の計算値
- H_3, H_2, H_1 : 着目深度×3の測定結果
- H_2, H_1, H_0 : 着目深度×2の測定結果
- H_1, H_0, H_{-1} : 着目深度×1の測定結果

また、式(3)によるフレイザーフィルタ処理後の測定値を用いて等価電流密度のコンタ図（断面図）を作成することができる。

表-1に本事例における測定結果の一部を示し、式(3)を用いて、深度方向の測定値を得るための具体的な計算方法を図-8に示す。深度方向の測定値を得るには、求めようとする深度と同じ距離だけ左右に離れた測定点の測定値を用いて式(3)により

VLFを利用した探査法による老朽化法面調査の適用性

計算する。求めようとする深度毎に、着目する測定点から左右に深度と同じ距離だけはなれた測定点の測定値を式(3)のHに代入していき、深度方向の等価電流密度を得ることとなる。

図-6に示すフレイザーフィルタ処理前の各々の測定点における測定値は、浅い深度から深い深度までの情報を含んだ値である。異常帯が浅い深度に分布している場合には、測定値に与え

る影響の範囲は狭く、深い深度に分布する異常帯は広範囲の測定値に影響をおよぼす。すなわち図-6に示す測定値から図-7に示すフレイザーフィルタ処理後の値を求める場合、求めたい深度と同じ測定点間隔距離の測定値を用いて計算することにより、深度方向の情報を得ることになる。

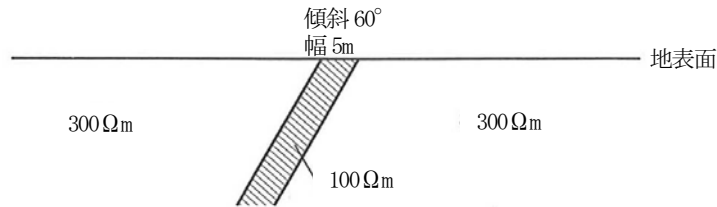


図-3 岩脈モデル⁶⁾ (一部加筆)

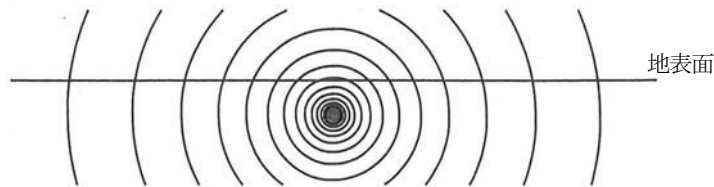


図-4 図-3のモデルによる二次磁場のイメージ⁹⁾

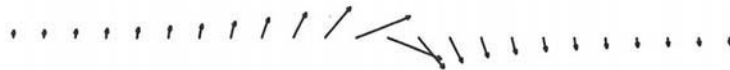
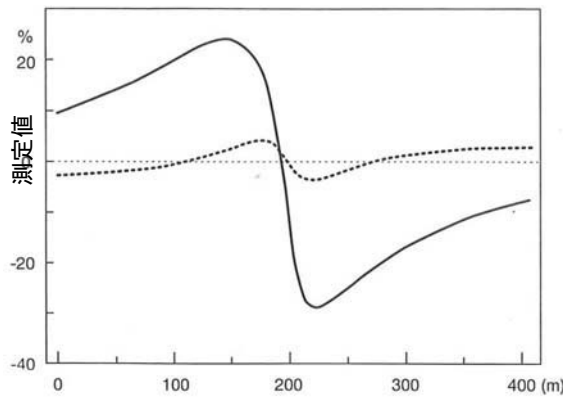


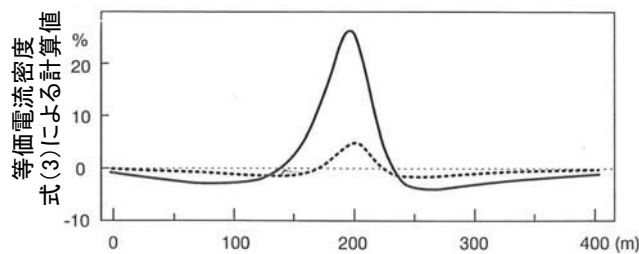
図-5 図-3による二次磁場の鉛直成分方向のイメージ

(文献9に示される図を図-3の岩脈モデル、図-6の測定値に整合するように左右を反転させている)



凡例
実線：同相成分
点線：離相成分

図-6 図-3のモデルにおけるVLF測定結果例⁶⁾ (一部加筆)



凡例
実線：同相成分
点線：離相成分

図-7 図-6のフレイザーフィルタによる処理結果⁶⁾ (一部加筆)

表-1 測定結果 (一部)

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
同相成分(tan θ)	-8.9	0.0	12.4	-20.6	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7
離相成分(ε)	-6.5	-7.0	-7.1	-8.2	-8.1	-9.4	-8.7	-8.8	-8.7	-9.9	-9.7	-12.0	-10.9

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
深度(m)	0.0	-8.9	0.0	12.4	-20.6	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
測定値(同相成分)	-8.9	0.0	12.4	-20.6	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7

深度1mの値を求める際のHn H₋₃ H₋₂ H₋₁ 着目点 H₁ H₂ H₃

↓ 式(3)により算出

深度1mの値				2.3	13.6	-26.2	3.6	5.9					
--------	--	--	--	-----	------	-------	-----	-----	--	--	--	--	--

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
測定値(同相成分)	-8.9	0.0	12.4	-20.6	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7

深度2mの値を求める際のHn H₋₃ H₋₂ H₋₁ 着目点 H₁ H₂ H₃

↓ 式(3)により算出

深度2mの値							-14.6						
--------	--	--	--	--	--	--	-------	--	--	--	--	--	--

↓ 測定値および算出した深度の値を整理

測点(距離 m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
深度(m)	0.0	-8.9	0.0	12.4	-20.6	18.6	-0.7	-20.9	4.5	-12.3	-31.9	11.2	18.0	17.7
				2.3	13.6	-26.2	3.6	5.9	-20.4	16.3				
							-14.6							

↓ 深度と算出値を用いて、コンター図に図化(図11)

図-8 式(3)による深度方向の等価電流密度の算出例

3. 探査結果と考察

3.1. 探査地点の概要

探査地点の平面図を図-9に示す。また探査測線の状況を写真-1および写真-2に示す。法面は上部2段が、モルタル吹付けが施工されており、最下段の法面では、コンクリート張り工が施工されている。法面内は亀裂が発生しており、一部植生が繁茂している。法面の傾斜は、最下段を除き約50度である。法面の下には国道があり、法面上には市道があり、市道のカーブに合わせて弧を描いてガードレールが設置されており、測定測線はそれを横断している。

地質的には砂岩と頁岩の互層からなり、緩い受け盤構造を示している。探査区間の岩種は、ほぼ頁岩で占められている。

ボーリングNo1-1のコアを写真-3に示す。ボーリング地点では、地表から深度9mまでは、標準貫入試験によるN値が50以下で、風化が進行し土砂化している。深度9m以下では、岩片ないしは柱状に採取される硬質な岩盤となっている。深度13~15m間は亀裂が発達しており、破碎質である。市道脇の切り取り面に露出する露頭を写真-4に示す。この露頭では数m程度と思われる風化帯とほぼ均質な頁岩が露出している。地下水位は、無降雨時には深度15m程度の位置に確認されている。

探査状況を写真-5に示す。探査は、最上部の法面および法面背後の市道上で測線長43m、測定間隔1mで実施した。測定可能な法面下端を測点42とし1m間隔で測定点を設けた。なお、法面上の測定に当っては、縄梯子を用いて実施した。

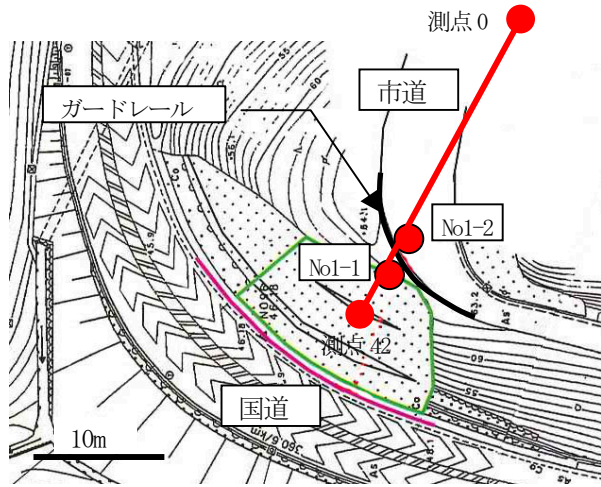


図-9 探査位置平面図



写真-3 ボーリングNo1-1コア状況



写真-1 探査測線 (測点0側)



写真-4 市道脇切り取り面の露頭



写真-2 探査測線 (測点42側)



写真-5 探査状況

3.2. 探査結果および考察

表-1に計測した測定値の一部を示す。図-10は今回の測定結果であり、横軸に測点、縦軸に同相成分の測定値および式(3)による深度1mにおけるフレイザーフィルタ処理後の値を示している。

各測点における深度方向への等価電流密度の算出方法を図-8に示す。深度1mの等価電流密度を求めるためには、その着目した測点(図-8では測点3)から前後1m, 2m, 3mの各測定値を式(3)に代入することにより求められる。深度2mの等価電流密度を求める場合(図-8では測点6)には、前後2m, 4m, 6mの測定値を用いて式(3)より算出する。このようにして順次深さ方向に1m毎に求めた等価電流密度値をコンタ図として示すと図-11が得られる。本事例では暖色系になるほど相対的に等価電流密度がプラス側の値を示すように表示している。等価電流密度がプラス側の値を示すためには、異常帯が浅い深度にある場合、もしくは周辺部より、より低比抵抗な場合である。なお、このプラス側の異常が生じている要因の区別はフレイザーフィルタ処理によるコンタ図の作成により判別する。

図-11にはボーリングにより確認された風化境界を実線で示している。図-11に示す探査結果では、等価電流密度のコントラストは全体的には弱く、測点30付近から右下に伸びる異常帯のほかには、顕著な異常帯は認められない。VLF-EM探査における等価電流密度のコントラストと異常帯の有無の関係や不均質性について、既往の文献などに統一的な基準値は示されていないが、竜神⁹⁾では±10%で中程度の異常としており、これに比較すると今回の探査結果は概ね均質な状態にあるものと考えられる。この傾向は、ボーリングコアで見られるほぼ均質な風化状況や市道脇の露頭の風化状況と一致している。

ボーリングNo1-1で確認されている深度13~15m付近の破砕部については、今回の探査結果では検出されていない。これはボーリングで確認されている破砕部が極局所的なものであるという地質条件の場合と、法面下端までの探査が実施できていないことや測線長が短く探査深度が不足しているなど探査自体の要因の双方が考えられる。本事例の場合では、ボーリングNo1-2ではボーリングNo1-1と連続するような破砕部が確認されていないことから、破砕部が局部的であったため検出されなかった可能性が高いと推察する。一方、測点番号5から20付近の深度6m付近までは、プラス側の等価電流密度範囲とマイナス値の範囲が複雑に分布している。この等価電流密度のプラス値の範囲が脈状に分布する深度までが、ボーリングNo1-2で確認されているN値50以下の風化帯と概ね一致し、風化境界が検出されていると考えられる。

法面部では、図-11に示す測点番号35付近の地表面付近に等価電流密度がプラス値を示す部分が認められ、異常帯を形成している。ボーリング結果からは法面部は全体に土砂化が進んだ箇所と想定されている。VLF-EM探査で法面部に検出されている異常帯箇所は、写真-6の丸印で囲む範囲にあたる。この近景を写真-7に示すが他の箇所よりモルタル吹付け面に亀裂が多



写真-6 法面内でプラス値を示す位置



写真-7 プラス値を示す付近の近景

く、植生が繁茂している。一般的に電磁探査の一種であるVLF-EM探査では周辺より低比抵抗を示す部分が異常帯として検出されることから、法面内のプラス側の値を示す部分は、土砂中でも特に土砂化が進行した部分もしくは含水比が高い部分と推察される。

なお、図-11の測点No30付近の法肩から右下りに見られる強いプラス側の異常帯は、図-10では測点番号30付近のピークに相当しており、良電導体である金属性のガードレールにより生じた異常帯と推定される。VLF-EM探査は電磁探査の一種であるため、地下のケーブル、金属パイプなどの影響を受け、本来の探査目標と異なる部分に影響が大きく出ることであるとされている⁹⁾。今回のデータ処理では、ガードレールの影響を考慮することなく、測定値をそのままフレイザーフィルタ処理を行って図示したため、ガードレールの影響が顕著に表現される結果となっていると考えられる。また、ガードレールが測点0側に大きく湾曲しているため、ガードレールとの離隔距離が確保できないことから、測点0側がガードレールの影響を大きく受け、深い深度まで異常値が現れ、結果として法肩から右下方向の異常帯として表現されていると考えられる。ガードレールなど金属物のような特異な電導体が測線上に部分的に存在する場合の測定値の処理や図示の方法については

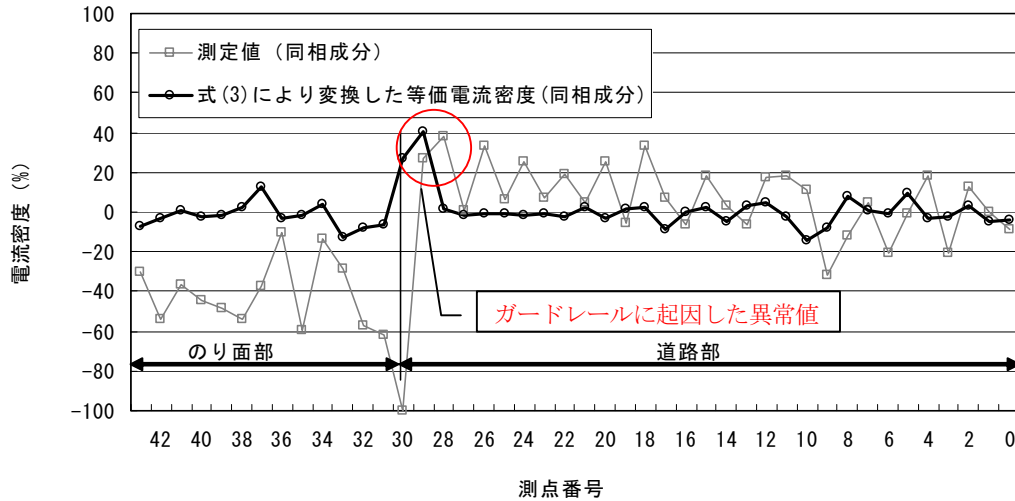


図-10 探査結果 (地表面の測定結果と等価電流密度)

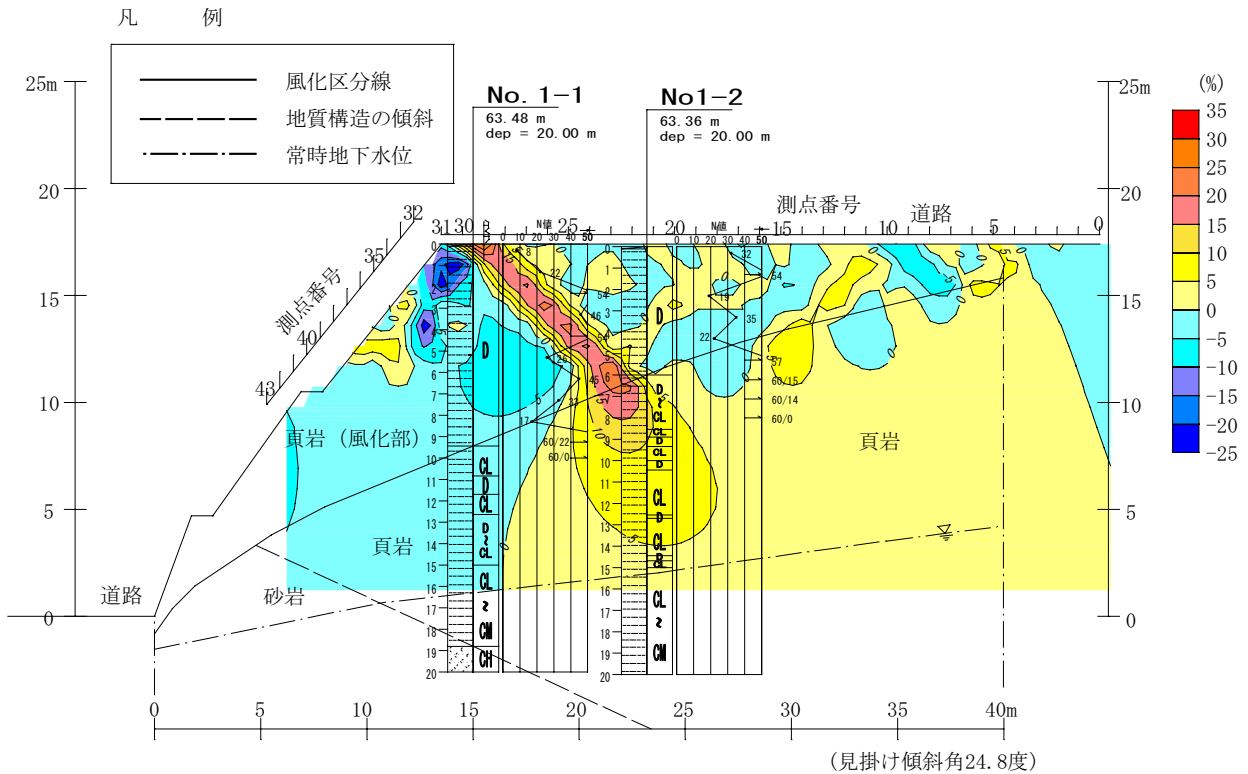


図-11 探査結果断面図 (等価電流密度コンタ図)

今後の検討が必要である。

一方、地下水位については、ボーリング調査により深度15m付近に確認されている。今回の探査結果では、地下水位を示すような異常帯は確認されていない。これは、今回の探査深度下限付近に地下水位が分布していたことが原因と考えられる。

4. まとめ

これまで、ほとんど道路法面では適用されなかったVLF-EM探査による法面深部の探査を行った。この結果、測線が短く探査深度が浅かったため、地下水位の分布やボーリングNo1-1で認められる亀裂発達部の検出はできなかったものの、ボーリング結果や近傍の露頭状況から、定性的ではあるが図-11に示すように、風化状況の推定が可能であり、かつ低比抵抗部を示す等価

電流密度のプラス値の分布深度とボーリングで確認された地山の風化帯の分布深度が概ね一致し、VLF-EM探査の法面探査への適用の可能性が見出せた。

法面の数は多く、広域的にかつ簡易に法面内部の情報を取得する探査法が求められている。その中で、非常に簡便な探査法であるVLF-EM探査による方法は、地表面における測定結果を表示させながら測定が可能であるため、異常帯をある程度、現地で即時に把握可能である。このことから、目視点検時にVLF-EM探査による探査で内部情報を捕らえながら点検評価を行うなど、法面の内部を調査し点検・診断のための情報収集方法の一つとして有効であると考ええる。

また、法面の安定性は降雨時やその後に低下することから、同一法面において無降雨時と降雨時のVLF-EM探査による探査結果を比較し、比抵抗値の変化を捉えることにより、法面の地下水の情報を得ることができると考えられる。さらには、他の調査手法との併用で精度を向上させる利用法も有効と考えられる。

なお、今回の探査対象のり面における、安全対策を除いた実質の探査時間はおよび30分間程度である。

今後は、測定事例を増やすとともに、ボーリング結果や他の物理探査結果との相関性を検証するとともに、相対的な評価と

なっているVLF-EM探査による探査結果を地山比抵抗値に変換する手法の開発を行うことにより、より精度の高い法面評価が可能になるものと考ええる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：災害時にも安定して機能する道路ネットワークのあり方，第22回基本政策部会資料-3，p2，2007.
- 2) 国土交通省：平成19年度国土交通白書，第1章 地球温暖化とわたしたちの暮らし，p8，2008.
- 3) 国土交通省道路局：災害時にも安定して機能する道路ネットワークのあり方，第22回基本政策部会資料-3，p5，2007.
- 4) 国土交通省道路局：道路防災点検の取りまとめ結果資料，2007.
- 5) 竜神正夫：VLF 電磁探査法と測定器について，物理探査，Vol. 23. No. 5，p40，1970.
- 6) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編，pp. 366-368，1998.
- 7) Thomas Enmark：WADI Instruction Manual，p5，1989.
- 8) 物理探査学会：図解物理探査，p72，1989.
- 9) Karous, M. and Hjelt, S.E.：Linear filtering of VLF dip-angle measurements，Geophys. Prosp., p31，1983.

(2009年6月29日 受付)