

複数の物理探査法を用いた切土斜面の工学的評価法に関する研究

増満 岳也^{1*}・楠見 晴重¹・大西 有三²・上出 定幸³

¹関西大学 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

²関西大学 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35)

³西日本高速道路エンジニアリング関西 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町5番26号)

*E-mail: k838738@kansai-u.ac.jp

我が国の道路は、高度経済成長期に急ピッチで整備されてきた。建設された膨大な数の法面は、現在、老朽化が進んでおり、これらの法面地盤の安定性、耐久性を、効率よく把握、評価する必要がある。法面の安定性に関わる問題は、背面地山の風化や変動が大きく影響するため、物理探査を用いる方法が取られはじめている。単独の物理探査による解釈には限界があり、複数の物理探査で評価することが望まれる。しかし現在、複数の物理探査によって得られたデータの総合的な評価手法は確立されていない。そこで、本研究では弾性波探査、表面波探査、電磁探査に着目し、原位置で得られた各々のデータに自己組織化マップ^{1),2)}とk-means法³⁾を適用することで、複数の物理探査結果の複合的評価を試みた。

Key Words : geophysical prospecting methods, numerical analysis

1. はじめに

老朽化法面の健全度の調査において、複数の物理探査法を用いて総合的に評価する方法が注目されている。しかしながら、現在のところ複数の物理探査を総合的に解釈する手法は確立されておらず、技術者の専門的な知識や経験に基づく高度な判断が要求され、物理探査の解釈にばらつきが生じる可能性があるのが現状である。そこで本研究では、情報処理工学分野で幅広く使われている自己組織化マップ(Self-Organizing Maps : SOM)を用いて、原位置において実施された複数の物理探査の結果をクラスタリングし、総合的に解釈する手法の提案を試みた。また、本報告では客観的なクラスター分類を行うために、k-means法の適用を行った。自己組織化マップとk-means法により表れた斜面分類図をボーリング調査結果・地下

水位と比較し、その精度を確かめた。

本研究の研究対象法面は、福井県小浜市の測線長約40 m、高さ約20m、種吹付工が施された北向き切土斜面である。図-1、図-2に示すように、対象法面は2つの小段で分けられており、下方から順に第1法面、第2法面、第3法面と区別している。また、物理探査測線上の第1法面と第2法面間の小段付近において、ボーリング調査が行われており、現在、そのボーリング孔において地下水位の観測を行っている。勾配はいずれも1 : 1.2である。地質は主に、二畳紀前期～中期の加斗層⁴⁾で、粘板岩、砂岩、緑色岩、チャート等からなっている。対象となっている法面には、亀裂やはらみ出しが見られ、法面の表面上の老朽化は進行しているものと思われる。

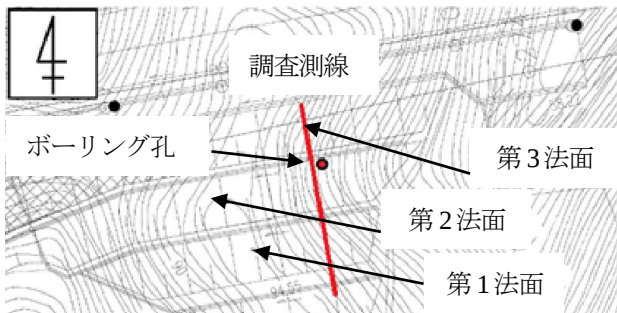


図-1 研究対象法面の平面図



図-2 研究対象法面の全体図

2. 用いた物理探査法とその探査結果

本研究で用いた物理探査法は、高密度弾性波探査(屈折法⁹⁾)、高密度表面波探査、電磁探査(FDEM探査⁹⁾)の3種類である。また、それぞれの物理探査法からP波速度、S波速度、比抵抗という3つの物性値とその地盤中の分布状況を得ることができる。これらの物性値からP波速度とS波速度からは岩盤の硬軟、比抵抗からは間隙や含水状態を推定できる。これらの物理探査法がお互いに、1つの探査のみでは推定できないことを補完することで、地盤解釈の信頼性が高まることになる。

測定は2011年から行っており、毎年6月上旬(渇水期)と11月中旬(豊水期)に測定を行っている。本論文では、2014年6月の測定結果を対象とした。図-3～図-5に各回の測定結果を示す。P波速度とS波速度については、深度が浅くなるに連れて伝播速度が遅くなっており、法面の表層には、風化した層が存在しているものと推定される。また比抵抗については、高比抵抗域が法面の表層と深さ4m付近に層状に存在している。このエリアは空隙が多いと推定され、これらの層は風化していると思われる。一方、深さ6m以下の部分には、低比抵抗域が層状に存在しており、このエリアは含水率が高く、地下水が存在している可能性が高いと思われる。

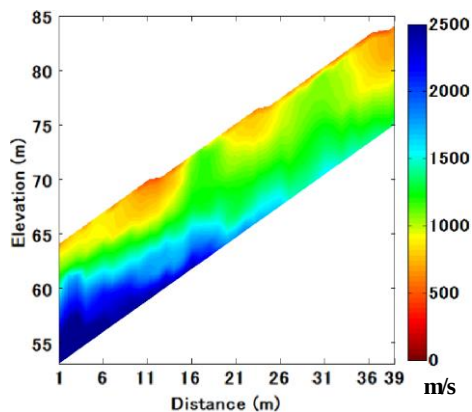


図-3 P波速度測定結果

3. 解析方法

(1) 自己組織化マップ(Self-organizing maps)

自己組織化マップは英語表記の頭文字を取ってSOMと呼ばれている(以下、自己組織化マップをSOMとする)。SOMは1979年にヘルシンキ工科大学のコホネン教授によって開発された教師なしニューラルネットワークの一種である。特徴は、類似した特徴を持つデータは近くに、異なった特徴を持つデータは離れた位置に、類似度を距離で示したマップを作成することである。また、高次元のデータを2次元平面に写像することが可能である。図-6に、解析フローチャートを示す。始めに、解析を行う前の準備として、入力ベクトルとは別に、入力ベクトルと同じ次元をもつ個々のノードに2次元平面でランダムに配置されたベクトルを与え、マップを初期化する(図-6(a))。マップの初期化後、マップに対して入力ベクト

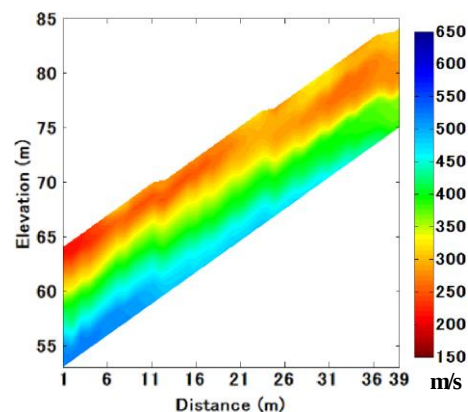


図-4 S波速度測定結果

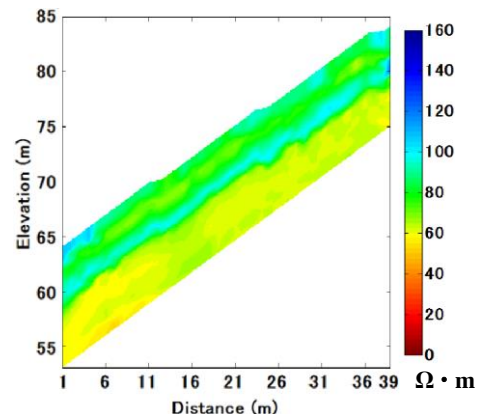


図-5 比抵抗測定結果

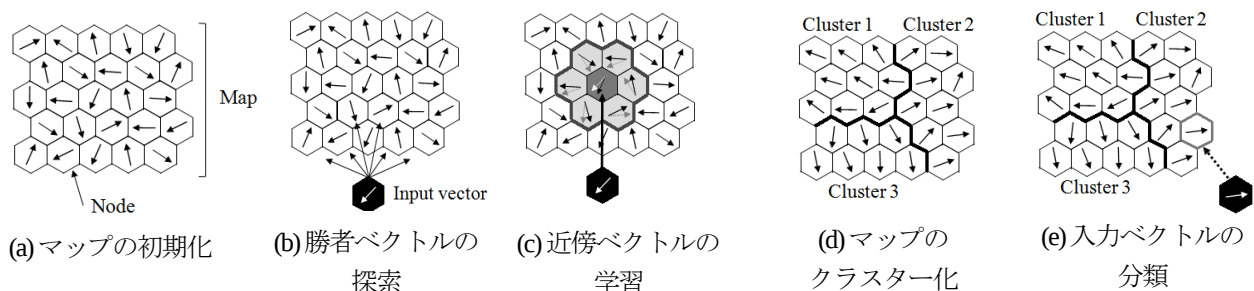


図-6 SOM解析フローチャート(2次元データの場合)

ルを学習させ、個々のマップ上でのノードと入力ベクトルを比較し、データ間の類似度を表すユークリッド距離が最小になる勝者ベクトルを探索する(図-6(b))。次に、勝者ベクトルおよびその周辺の近傍ベクトルは近傍関数に従って入力ベクトルを学習する。近傍サイズは学習とともに小さくしていく(図-6(c))。勝者ベクトルの探索と学習を複数回繰り返すと、マップ上では類似性の高いベクトルが隣接するように配置され、マップのクラスター化が可能となる(図-6(d))。最後にクラスター化されたマップに対して、入力ベクトルを当てはめることによって、各入力ベクトルがどのクラスに分類されるかが分かる(図-6(e))。

このSOMを3種類の物理探査結果に適用させた結果が図-7である。図-7のセル1つずつに、各P波速度・S波速度・比抵抗・位置データが組み込まれている。図-7のセルの色が赤いほど(凡例の数値が高いほど)、隣り合ったデータに関連性が無いことを表しており、図-6(d)、(e)におけるクラスターを分ける線と同じ意味合いがある。図-8は図-7を物性値ごとにばらしたものであるが、各物性値の高低(赤いほど値が高い)によって図-7が作られていることが分かる。

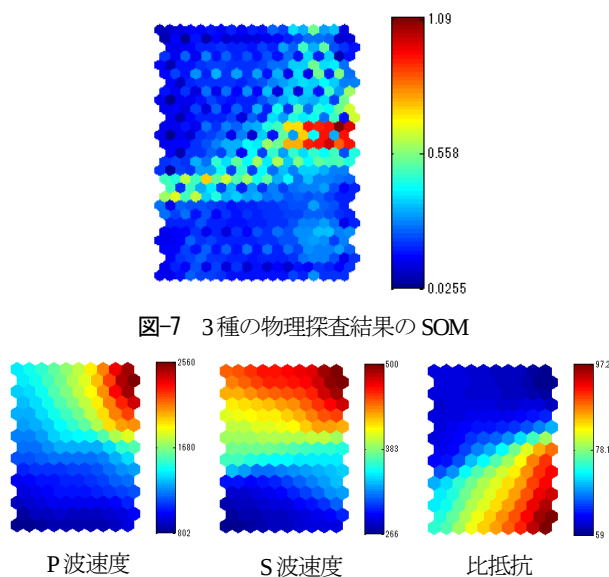


図-7 3種の物理探査結果のSOM

図-8 図-7を各物性値ごとにばらしたもの



図-9 SOMにk-means法を適用させた図

(2) k-means法

図-7を法面に適用させると、物理探査結果の総合的な評価を行うことができるが、マップが複雑なために、技術者によって地盤の解釈に差が生じてしまう可能性がある。そこで、SOMを各物理探査結果の特徴によって、明確なクラスターに分ける為に、k-means法と呼ばれる客観的クラスタリング手法を用いた。

k-means法は、マップ上に形成された各クラスター候補群の重心が最適値になるように、クラス进行分类することができる方法である。k-means法は非階層型クラスタリング手法、かつ要素を明確に分類するハードクラスタリングであるため、SOMから得られるマップを客観的にクラスタリングすることができる。図-7のSOMをk-means法によってクラスタリングした結果が図-9である。図-7の赤や黄色い部分と、図-9におけるクラスター分割部分は比較的整合性があり、図-7で明らかになった特徴毎に、クラスターの分類がなされていることが分かる。この図を法面に適用させ、法面の評価を行った。

4. 結果と評価

図-10は、図-9を基に法面进行分类した図である。また、表-1は、図-10における各クラスの平均物性値である。図-10と表-1をもとに、法面の評価を行った。

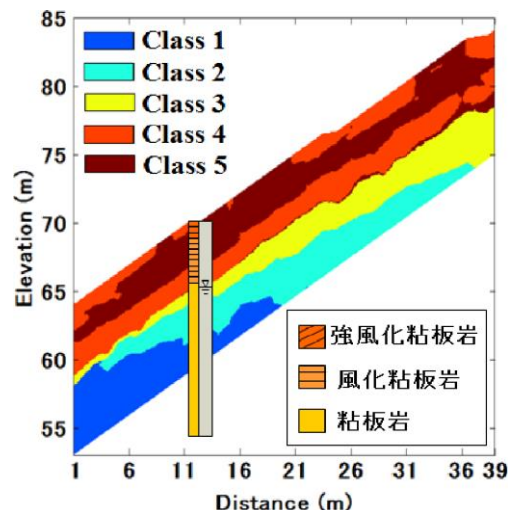


図-10 複数の探査結果による斜面分類図とボーリング結果・地下水位

表-1 各クラスにおける平均の物性値

	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	比抵抗($\Omega \cdot m$)
Class1	2300	480	61
Class2	1600	440	62
Class3	1300	380	65
Class4	1100	310	92
Class5	940	280	78

Class1で表される部分は、P波速度とS波速度が速いこと、比抵抗値が低いことから、地下水を含んだ硬い岩石が存在していると推定される。

Class2で表される部分は比抵抗値が低いため、水を含んでいると推定されるが、Class1よりP波速度とS波速度が遅いため、硬さはClass1よりも劣ると推定される。

Class4で表される部分は、P波速度とS波速度が遅く、比抵抗値が高いことから、空隙が多く、風化が進んでいる部分であると推定される。

Class3で表される部分については、比抵抗値が低いClass2と比抵抗値が高いClass4に挟まれており、地下水面が存在している可能性が高いと思われる。

Class5で表される部分は、P波速度とS波速度が遅いため、風化が進んでいる部分であると推定される。なお、比抵抗値がClass4より低い原因は、この部分が残留した雨水を含んでいるためと思われる。

これらの結果と評価について、ボーリング調査の結果・地下水位と比較すると、風化と評価したClass4とClass5で表される部分とボーリング調査の岩種区分における強風化粘板岩、風化粘板岩の部分、また、地下水面が存在すると評価したClass3で表される部分と実際の地下水位が比較的整合性があると思われる。

5. 結論

本研究の結論として、以下の3点を述べる。

- ・3つの物理探査から得られた3種の物理データを、SOMを用いることで、2次元のマップに写像でき、また、そのマップにk-means法を適用することで、法面を各物理探査結果の特徴が表れた5つのクラスに分類することができた。
- ・法面分類図とボーリング調査結果・地下水位との比較において、比較的整合性のある結果が得られ、複数の物理探査結果の評価手法としては有効であると考えられる。
- ・今後は、本研究における複数の物理探査とSOM、k-means法を組み合わせた評価手法を法面モニタリングに実用化できるかを検討する。

謝辞：本研究および論文作成にあたり、終始ご指導を頂いた関西大学学長・楠見晴重博士に対し、心より感謝の意を表し、深く御礼申し上げます。ならびに関西大学環境都市工学部特任教授・大西有三博士に対し、心より感謝の意を表し、深く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、本研究に関して貴重な資料を提供して頂いた西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社・上出定幸氏に対して深く感謝いたします。

本研究を行うにあたり、適切な助言およびご協力いただいた西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社・大藤貴也氏に深く感謝いたします。そして、関西大学環境都市工学部地盤環境工学研究室の大学院生、学部生、秘書・宇都紀子氏に対し、深く感謝いたします。

最後に、本論文を作成するにあたり、日頃から御支援と励ましを頂いた両親に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kohonen, T. : Simultaneous order in nervous nets from a functional standpoint, *Biological Cybernetics*, Vol. 50, pp.35-41, 1982.
- 2) Kohonen, T. : Self-Organization and Associative Memory, Springer-Verlag, 1984.
- 3) 宮本定明：クラスター分析入門 ファジィクラスタリングの理論と応用，森北出版株式会社，1999.
- 4) 猪木幸男：日本地質図大系・近畿地方・通商産業省・工業技術院・地質調査所，朝倉書店，pp.36-37，1996.
- 5) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編 第2章屈折法地震探査，pp.115-151，1998.
- 6) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編 第6章電磁探査，pp.301-398，1998.
- 7) 片山辰雄，小里隆孝，加藤裕将，楠見晴重・松岡俊文：周波数領域電磁探査法の開発と河川堤防調査への適用性，地盤工学ジャーナル，Vol.4, No.4, pp.331-340, 2010.

ENGINEERING EVALUATION METHOD OF CUT SLOPE BY USING MULTIPLE GEOPHYSICAL PROSPECTING METHODS

Takaya MASUMITSU, Harushige KUSUMI, Yuzo OHNISHI and Sadayuki KAMIDE

In Japan, in the high economic growth period in 1960's, a great number of slopes were formed to construct many roads. Now, the slopes have been aging, therefore it is important to estimate the soundness of the aging slopes and maintain slopes effectually. So, we usually carry out seismic wave method, surface wave method, and electromagnetic method as geophysical prospecting method in situ. However, we cannot comprehensively interpret the result of each geophysical prospecting in a numerical formula of the engineering now. Therefore, we tried to interpret multidimensional data by using Self-organizing maps and k-means method.