

SOM・変換解析を利用した併用物理探査による 道路斜面の評価手法に関する研究

増満 岳也^{1*}・楠見 晴重²・大西 有三²

¹関西大学大学院（〒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）

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

我が国の道路斜面は、現在、老朽化が進んでおり、これらの斜面地盤の安定性、耐久性を、効率良く把握、評価する必要がある。現在、地盤内の2次元情報を得ることができる物理探査法を用いる方法が取られはじめているが、単独の物理探査法による解釈には限界があり、複数の物理探査法で評価することが望まれる。しかし、複数の物理探査法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、電気探査に着目し、原位置で得られた各々のデータに情報処理手法であるSOM(自己組織化マップ)^{1) 2)}を適用することと、得られたデータを間隙率などの指標に変換する手法を適用することによって、複数の物理探査結果の複合的な評価を試みた。

Key Words : geophysical prospecting method, numerical analysis

1. はじめに

我が国の道路は、高度経済成長期から急ピッチで建設され、それに伴い、切土や盛土の斜面も数多く整備された。現在、それらの斜面の老朽化が進んでおり、斜面地盤の安定性、耐久性を把握、評価することが急務となっている。

近年の維持管理コスト縮減への対応策の一つとして、老朽化斜面の健全度調査において、容易に地盤内の2次元情報を得ることができる物理探査法が利用されはじめている。しかし、個々の物理探査には適用範囲や得られる探査精度の限界があり、単独の成果だけでは多様な複雑な地盤を正確に工学的評価することは困難である³⁾。そこで、本研究では3種類の物理探査(弾性波探査、表面波探査、電気探査)を実際の道路斜面にて実施し、複数の物理探査による斜面地盤評価の有用性や信頼性を調査している。その際、複数の物理探査結果の総合的な評価手法は確立されていないため、現状では定性的な地盤評価となっている。そこで本研究では、主に情報処理の分野で利用されるSOM(自己組織化マップ)や複数の物理探査結果から工学的指標である間隙率や飽和度に変換する手法(変換解析)を用いて、複数の物理探査結果の複合的な評価を試み、研究対象地区で得られたデータと比較することで、本手法の有用性や精度の検証を行った。

2. 研究対象地区と研究対象斜面

本研究の対象地区は福井県の嶺南地域に位置する小浜市西勢であり、地質は二畳紀前期～中期の加斗層⁴⁾で、粘板岩を主とし、砂岩・チャートおよびシャールスタインを伴う。降水量は夏季～冬季にかけて多いが、冬季の降水量は福井県嶺北地方と比較すると少ない。

図-1は研究対象斜面の全体図である。本研究の対象斜面は、種吹き付け工が施された北向き切土斜面である。対象斜面は4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5法面と区別している。物理探査の調査測線は斜面中央の法尻から第4法面に差し掛



図-1 研究対象斜面の全体図

かる部分までの約40mとしている。斜面掘削は2007年頃
から行われ、種吹き付け工の完成が2010年～2011年とな
っている。対象斜面には亀裂やはらみだしが見られ、斜
面の表面上の劣化は進行しているものと思われる。植生
についてはススキが多く生え、低木の松も存在している。

調査測線上においてボーリング調査が2回実施されて
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。図-2はボーリング調査の結果である。結
果からは斜面地盤の風化が進行していることが推定され、
また、斜面上部の方が下部より深く風化が進行している
ことがうかがえる。

3. 使用し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⁷⁾、高密度表面波探査⁸⁾、電気探査(比抵抗二次元探
査⁷⁾)の3種類である。高密度弾性波探査からはP波速度、
高密度表面波探査からはS波速度、電気探査からは比抵
抗値の地盤中の分布状況を得ることができる。P波速度
からは岩盤の硬軟、S波速度からは水の影響を除外した
岩盤の硬軟、比抵抗値からは間隙の有無や含水状態を推
定できる。1つの探査のみでは推定できない事象を、こ
れらの物理探査法がお互いに補完することで、地盤解釈
の信頼性が高まることになる。

測定は2011年11月から、毎年6月上旬(湧水期)と11月中
旬(豊水期)に実施している。図-3は2015年6月の測定結果
である。表層崩壊を想定しているため、測定対象深度は
5mとしている。X軸は法尻からの距離、Y軸は標高を表
している。P波速度分布の特徴は、斜面の表層部ほど伝
播速度が遅く、特に小段付近の伝播速度が他の部分と比
較してより遅いことである。この部分は地盤が軟弱で、

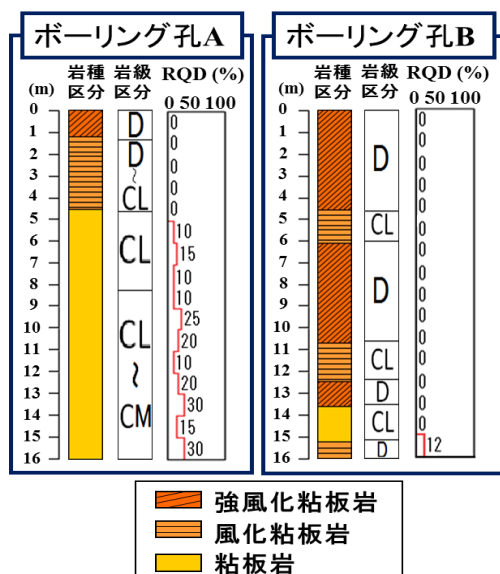


図-2 ボーリング調査結果

風化しているものと推定される。S波速度分布の特徴は、
P波速度と同じく斜面の表層部ほど伝播速度が遅いが、低
速度域の出現はP波速度と違い表層全体となっているこ
とである。P波速度分布の評価と同じく、低速度域は風
化部分と推定される。比抵抗分布の特徴は、高比抵抗域
と低比抵抗域が斜面内部に塊状に分布していることであ
る。高比抵抗域には空隙が多いと思われ、この部分は風
化しているものと推定される。低比抵抗域には地下水や
導電性物質が存在していると推定される。

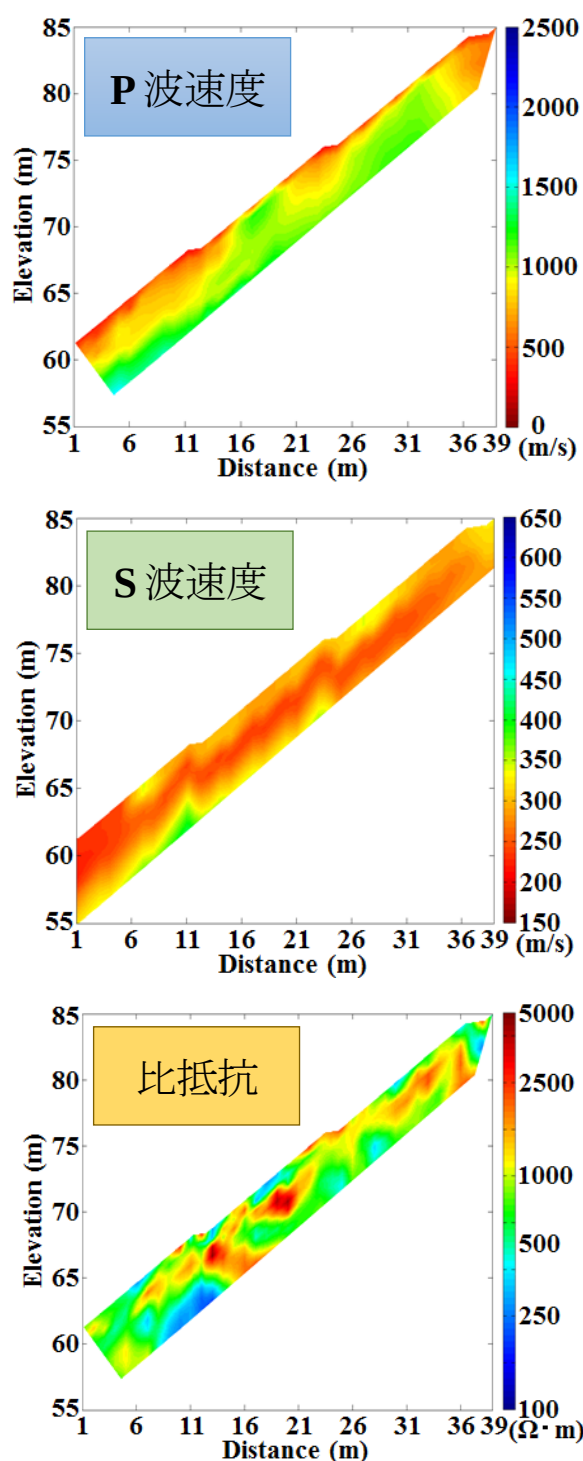


図-3 各物理探査測定結果

4. 解析手法

(1) SOM(自己組織化マップ)

SOM(自己組織化マップ:Self-Organizing Maps)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。SOMの特徴は、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配置し、類似度を距離で示したマップを作成することである。これにより高次元のデータを客観的に2次元平面に写像することが可能となり、データ間の関係性を視覚的に認識できる。図-4はSOMの解析フローチャートを示している。

このSOMを複数の物理探査結果(表面波探査・電気探査)に適用させた結果が図-5である。図-5のセル1つずつに、S波速度・比抵抗・位置データが組み込まれている。図-5の凡例の数値が低いほど(セルの色が青いほど)、隣り合ったデータと関連性があることを表しており、凡

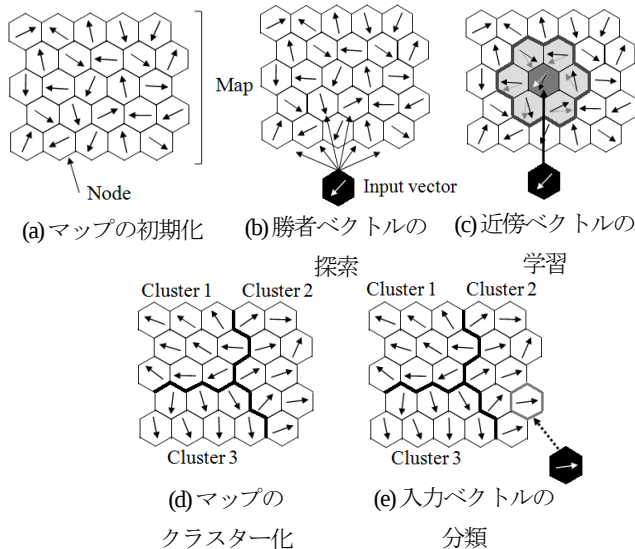


図-4 SOM解析フローチャート(2次元データの場合)

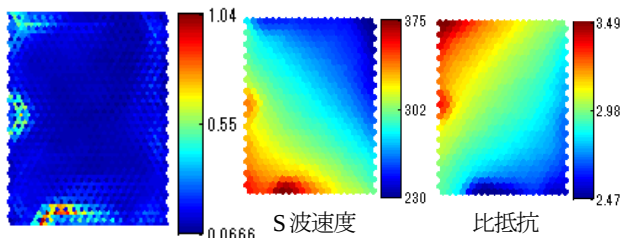


図-6 図-5を各物性値ごとにばらしたものの



例の数値が高い部分を境界として、ある特徴を持ったクラスターとなっている。図-6は図-5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-5が作られていることがわかる。

図-5の位置データによりSOMを斜面図に適用し総合的な評価を行うことができるが、SOMにより作成したマップが複雑なために、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類するために、k-means法⁹⁾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、データを分類することができる手法である。k-means法は非階層型クラスタリング手法であるため、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は図-5のSOMをk-means法によってクラスタリングした結果である。この図を斜面に適用させ、物理探査結果の特徴毎に分類された斜面分類図を表し、斜面の評価を行った。

(2) 変換解析

過去の研究により、各物理探査によって得られる物性値と工学的指標の関係性を式で表すことができるようになったものがある。中でも、Wyllieの式(1)が弾性波速度(P波速度)と間隙率・水の飽和度との関係式を表し、Archieらの式(2)が比抵抗値と間隙率・水の飽和度との関係式を表していることは一般に知られている。原位置におけるP波速度と比抵抗値は異なる物理量であるが、中村⁹⁾は室内試験を実施することと式(1)および式(2)を連立して解くことにより、間隙率や飽和度に変換する変換解析を考案した。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-\phi)}{V_m} + \frac{\phi \cdot S_r}{V_f} + \frac{\phi \cdot (1-S_r)}{V_a} \quad (1)$$

$$\rho = m' \cdot \rho_w \cdot \phi^{-n} \cdot S_r^{-B} \quad (2)$$

ただし、

V_p : 原位置におけるP波速度(m/s)

V_m : 岩石テストピースのP波速度(m/s)

V_f : 間隙水のP波速度(m/s)

V_a : 空隙のP波速度(m/s)

ρ : 原位置の比抵抗($\Omega \cdot m$)

ρ_w : 間隙水の比抵抗($\Omega \cdot m$)

ϕ : 間隙率 S_r : 飽和度

m' , n , B : 地質の違いによるパラメータ

Archieらの式については、過去の研究^{10) 11)}によれば、式(2)は砂層ではよく適合するが、岩盤ではあまり適合しないとされているので、本変換解析では式(3)の並列回路モデルを用いている。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F \cdot \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_0} \quad (3)$$

ただし、

F : 地層比抵抗係数($\text{m}^n \cdot \phi^n \cdot \text{Sr}^B$)

ρ_c : 粘土等による間隙中の導電性粒子の比抵抗($\Omega \cdot \text{m}$)

ρ_0 : 岩石テストピースの比抵抗($\Omega \cdot \text{m}$)

図-8は変換解析の概念図である。斜面を要素に分割し、斜面を表現している。式(1)および式(3)は、間隙率 ϕ と飽和度 Sr を変換して、一つの斜面地盤要素についてそれぞれ次の連立方程式として表される。

$$\rho = g(\phi, \text{Sr}) \quad (4)$$

$$V_p = f(\phi, \text{Sr}) \quad (5)$$

したがって、各斜面地盤要素においてP波速度と比抵抗が求まれば、式(4)、式(5)から逆解析(最適化手法)により、未知の間隙率と飽和度を求めることができる。

本変換解析を実行するにあたって、上述のパラメータが必要となる。パラメータの設定は、物理探査測定地点の岩石コアから求めるのが望ましいが、本研究における測定地点のコアからは求めることが困難であったため、「変換パラメータデータベース」と呼ぶ様々な岩種を用いて行った既存の室内試験結果に基づくデータベースに

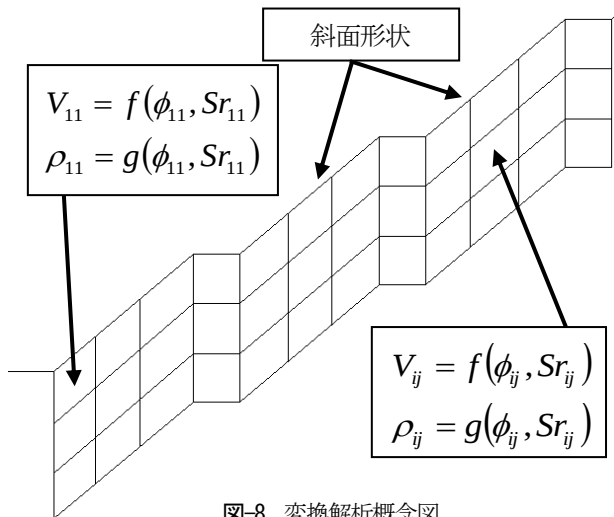


図-8 変換解析概念図

表-1 解析パラメータ

変換パラメータ	m	0.085
	n	1.3
	B	0.7
P波速度	$V_m(\text{m/s})$	4755
	$V_f(\text{m/s})$	1500
	$V_a(\text{m/s})$	330
比抵抗	$\rho_w(\Omega \cdot \text{m})$	50
	$\rho_c(\Omega \cdot \text{m})$	900
	$\rho_0(\Omega \cdot \text{m})$	3622

より、対応する岩種のパラメータを用いた²⁾。本研究においては、測定地点・地質的に最も類似度が高いと思われる「宮津粘板岩」のデータを用いた。宮津粘板岩は舞鶴層群に分布する夜久野第三岩群に属するものである。

表-1は本研究にて使用する宮津粘板岩の解析パラメータである。

5. 解析結果と斜面の評価

本章では、複数の物理探査結果をSOMまたは変換解析によって解析した結果とその結果の評価について述べている。用いる解析手法については、2つの物性値間に関係式が存在するP波速度および比抵抗については変換解析を用い、関係式が存在しない組み合わせについてはSOMを用いることとした。なお、結果にはボーリング調査結果の岩種区分と計測時の地下水位を併載している。

(1) SOMによる複合評価

既往の研究により、3種類以上の物理探査結果をSOMに変換すると、分類されるクラス数が多くなり、客観的な評価が困難になってしまうことが判明した。そこで本研究では、2種類の物理探査結果の評価を行った。またクラス数に関しては、正しく分類される、かつ複雑にならないものとして4つのクラスで評価を行った。

a) P波速度・S波速度の複合評価

図-9は2015年6月のP波速度・S波速度測定結果をSOMにより分類した結果である。また、表-2は図-9における各クラスの平均物性値である。結果には弾性波探査結果・表面波探査結果の特徴が1枚の図に表されている。クラス3が表面波探査結果にて、クラス4が弾性波探査結果にてそれぞれ風化と判断された部分であり、ボーリング調査結果における強風化粘板岩・風化粘板岩の部分と比較的一致している結果が得られた。また、図-9の第2小段表面には、単一の結果だけでは明らかにならなかった比較的伝播速度が速く硬質と推定されるクラス2が明確に表れており、地表面における地質の違いをSOMによって明らかにすることができた。これらの結果より、P波速度・S波速度のSOMによる複合解釈は、地盤の硬軟の評価に有効であると考えられる。

b) S波速度・比抵抗の複合評価

図-10は2015年6月のS波速度・比抵抗測定結果をSOMにより分類した結果である。また、表-3は図-10における各クラスの平均物性値である。結果には表面波探査結果・電気探査結果の特徴が1枚の図に表されている。クラス3が表面波探査結果にて、クラス4が電気探査結果にてそれぞれ風化と判断された部分である。また、クラス2は低比抵抗部分がクラスター化された部分であり、地

下水や導電性物質の存在を推定することができた。ボーリング調査結果との比較では、下部のボーリング結果における強風化粘板岩・風化粘板岩の部分と比較的一致している結果が得られたものの、上部の結果とは誤差が生じた。これは測定日前日の降雨によって、空隙が存在し

ている部分に雨水が入り低比抵抗化し、当該部分のクラスが4から2へと変化したためと思われる。これらの結果より、S波速度・比抵抗のSOMによる複合解釈は、純粋な地盤の硬さと水や導電性物質の有無の総合評価に有効であると考えられる。

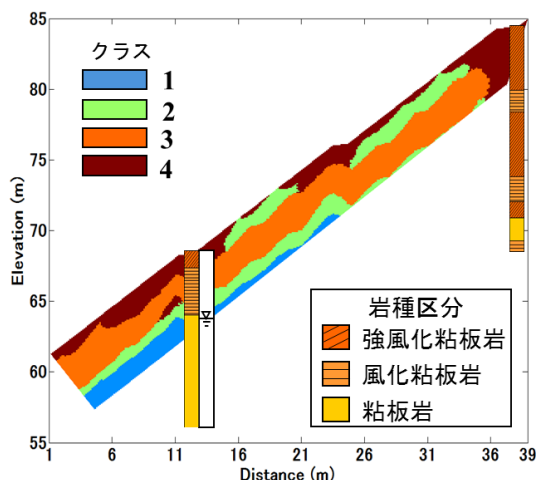


図-9 P波速度・S波速度測定結果分類図

表-2 図-9における各クラス平均物性値

クラス	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)
1	1300	330
2	1000	300
3	950	250
4	670	290

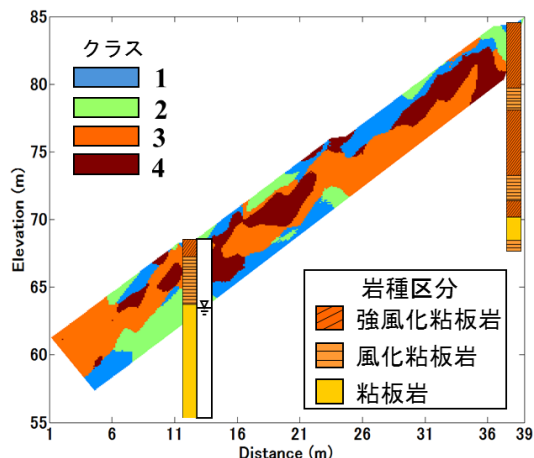


図-10 S波速度・比抵抗測定結果分類図

表-3 図-10における各クラス平均物性値

クラス	S波速度(m/s)	比抵抗($\Omega \cdot m$)
1	320	990
2	320	450
3	260	780
4	270	1600

(2) 変換解析によるP波速度・比抵抗の複合評価

本論文では、斜面老朽化に重きを置くため、間隙率の解析結果に注目して評価を行った。図-11は2015年6月のP波速度・比抵抗測定結果を変換解析により変換したうち、間隙率の解析結果を表したものである。結果からは、地表面に間隙率40%を上回る高間隙率部分が多く見受けられる。特に小段付近において、高間隙率部分が広く分布していることがわかる。小段付近で実施されたボーリング調査結果と解析結果を比較すると、間隙率40%以上の部分とボーリング調査結果における強風化粘板岩部分が比較的一致していることがうかがえる。これは、小段付近が集水型構造であるため、地盤の乾湿繰り返しにより、風化が進行したためであると考えられる。これらの結果より、P波速度・比抵抗の変換解析による総合解釈では、実際の工学的指標により斜面地盤の風化の度合いや傾向を把握・評価するのに有効であると考えられる。

(3) 各結果を用いた経時変化把握

本章(1)・(2)で用いた評価手法を他の計測回データにも適用させ、解析結果を用いて経時変化のモニタリングを行えるかについて検討した。図-12、図-13、図-14はそれぞれSOMによるP波速度・S波速度およびS波速度・比抵抗の経時変化把握、変換解析による間隙率(P波速度・比抵抗)の経時変化把握を表したグラフである。SOMによる経時変化把握ではクラス3とクラス4に、変換解析による経時変化把握では小段周辺2mの平均値に注目した。SOMによる結果では、顕著な数値の変化は表れなかった。今後の継続的な計測により、数値など

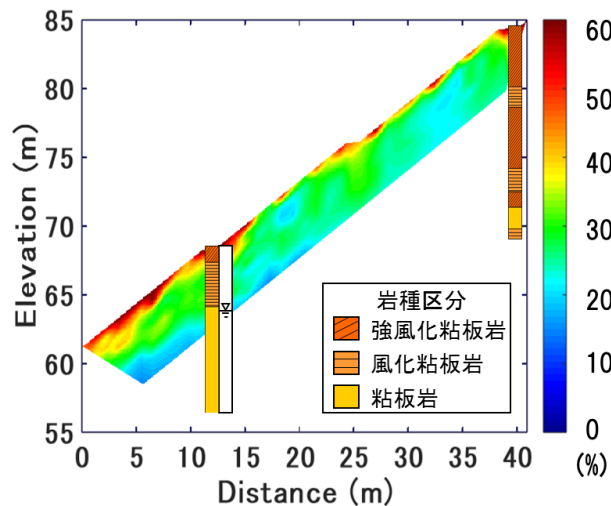


図-11 変換解析結果(間隙率)

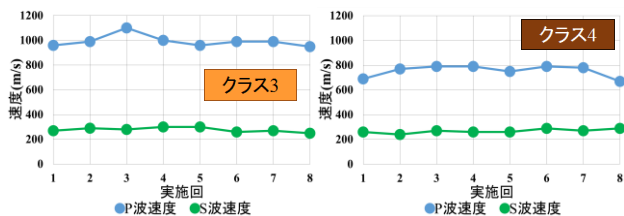


図-12 P波速度・S波速度変化

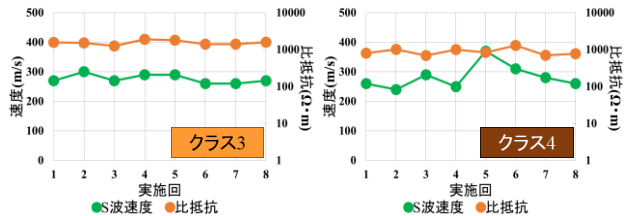
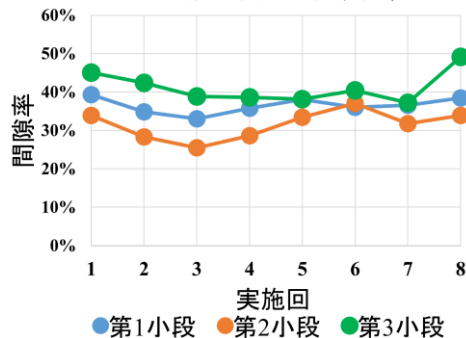


図-13 S波速度・比抵抗変化



の確認を行っていくことが必要であると思われる。変換解析による経時変化把握では、各小段において、第4回計測(2013年6月)から間隙率が上昇傾向にあることが確認された。今後の継続的な計測により、間隙率の動向を把握する必要がある。

6. 結論

本研究では、複数の物理探査結果の総合的な評価手法としてSOMと変換解析を用い、その発展として、それらを用いた経時変化把握の検討を行った。本研究により得られた知見は、以下のように要約される。

- 1) SOMや変換解析を2種類の物理探査結果に適用することにより、それらの複合解釈が可能であることが確認され、また、各々の物理探査法の組み合わせによって得られる情報を区別することができた。
- 2) SOMや変換解析によって経時変化の把握を試みたところ、変換解析で得られた小段付近の間隙率について、数値の上昇が見られた。

ただし、これらの結論は、数年間の計測データを数値解析し得られたものであり、実用化に向けて、更なる計測とその計測精度向上、解析結果と原位置データとの比較検証が必要であると考えられる。

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) 災害科学研究所トンネル調査研究会編：地盤の可視化技術と評価法, pp.22-32, 鹿島出版社, 2009.
- 4) 通商産業省工業技術院地質調査所：日本地質図大系 近畿地方, 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4章微動・振動, pp.203-211, 1998.
- 7) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編 第5章電気探査, pp.239-295, 1998.
- 8) 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.
- 9) 中村 真：併用探査による地盤の工学的評価法に関する研究, 関西大学審査学位論文, pp.99-115, 2003.
- 10) 千葉昭彦, 熊田政弘：花崗岩及び凝灰岩試料の比抵抗測定, *物理探査*, vol.47/No.3, pp.161-172, 1994.
- 11) 岩本宏, 熊田政弘, 飯博行：花崗岩の比抵抗と間隙率及び間隙水との関係, *土木学会第50回年次学術講演会委員会論文集*, pp.64-65, 1995.
- 12) 中村 真, 楠見晴重, 奥田善之：岩石供試体のP, S波速度および比抵抗同時測定装置の開発とその適用性, *土木学会論文集*, No.722/III-61, pp.381-386, 2002.

COMPREHENSIVE EVALUATION METHOD OF ROAD SLOPES BY SELF-ORGANIZING MAPS AND CONVERSION ANALYSIS USING MULTIPLE GEOPHYSICAL PROSPECTING METHODS

Takaya MASUMITSU, Harushige KUSUMI and Yuzo OHNISHI

In the Japanese high economic growth period in 1960's, a great number of slopes were formed to construct many roads. Now, the slopes are aging, therefore it is important to develop a method for understanding the stability and the durability of these slopes effectually. Therefore, we carry out three types of geophysical prospecting methods in situ. However, we cannot comprehensively interpret the result of each geophysical prospecting method now. In this paper, we propose to use Self-organizing maps and Conversion analysis that converts to porosity or water saturation.