自己組織化マップを用いた物理探査の複合評価 手法による法面の経時変化モニタリングの試み

大藤 貴也1*・楠見 晴重2・中村 真3・辻健4・中村香澄5

 ¹関西大学大学院 理工学研究科ソーシャルデザイン専攻(〒564-8680大阪府吹田市山手町三丁目3-35)
²関西大学 学長(〒564-8680大阪府吹田市山手町三丁目3-35)
³関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科(〒564-8680大阪府吹田市山手町三丁目3-35)
⁴京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 地殻工学講座地質工学分野 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂C1-1-110)
⁵国土交通省近畿地方整備局福知山国道河川事務所 (〒620-0875 京都府福知山市字堀小字今岡2459-14)
*E-mail: k316715@kansai-u.ac.jp

近年では、老朽化法面の健全度を評価するために、様々な物理探査が着目されている。単独の物理探査 による物理的情報では地山状態を解釈するのに限界があり、複数の物理探査を用いて評価をすることが望 ましい.そこで本研究では、自己組織化マップ(Self-Organizing Maps: SOM)とk-means法を用いること で複数の物理探査データ(P波速度、S波速度、比抵抗)を分類し、地盤内の性状を推定した.また、定期 的に計測されるデータから経時変化のモニタリングを試みた。分類結果は、ボーリング調査による地盤情 報と整合性が高いことから、本手法は老朽化法面の岩盤性状を把握するための複合的な評価が可能である ことが示された.

Key Words : geophysical exploration, self-organizing maps, k-means method, rock properties

1. はじめに

我が国では、1960年代の高度経済成長期以降、膨大な 数の道路法面が建設され、現在では劣化や老朽化が著し い法面も少なくない.そのため、老朽化法面の健全性を 把握し、効率的に維持管理していくことが重要である. そこで、近年では、様々な物理現象を利用して非破壊で 地下を可視化する技術である物理探査の適用が注目され ている.また、単独の物理探査による地山の物理的情報 では地山状態を解釈するのに限界があり、解釈限度を補 間するために複数の物理探査が用いられることが多い. 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、情報処理工学の分野で幅広く使われている自己組織化マップ(Self-Organizing Maps: SOM)^{1)~3)}を用いた. SOMは、次元の異なる複数のデータを2次元のマップに写像し、視覚的に認識できるといった特徴を持っているため、原位置において定期的に実施された複数の物理探査(弾性波トモグラフィ探査、表面波探査、

比抵抗トモグラフィ探査)の結果をSOMによってクラ スタリングし、総合的に解釈する手法を試みた. SOM による地盤評価事例は、岩盤斜面の危険度評価⁴⁰や、南 海トラフ沈み込み帯における断層面の物性評価⁵⁰や、堤 防内土質性状の分類⁹⁰の幾つかあるのみで、ここでは老 朽化法面の地盤性状評価の適応性と経時変化のモニタリ ングについて検討した.また、本報告ではk-means法⁷⁰を 適用し、客観的にクラスター分類を行った.分類結果は、 ボーリング調査で明らかとなった岩盤の割れ目による品 質評価(Rock Quality Designation : RQD)や岩級区分等と関連 付けて、各クラスターの地盤評価を試みた.

2. 研究対象法面

本研究対象地点は図-1 に示すように、京都府福知山 市三和町大身地区における国道9号に隣接した切土法面 である.法面は、長さ200数十m、高さ約50mと比較的 規模が大きく、吹付け法面(A地区、図-2)と無支保法 面(B地区、図-3)の2地点に区分される.現地状況は、 A地区ではモルタル吹付けの亀裂、せり出し、法尻の一



図-1 研究対象法面



図-2 吹付け法面 (A地区)



図-3 無支保法面(B地区)

部ではらみ出しなどが確認されており, B 地区では法面 での開口亀裂およびせり出しなどが確認されている.当 該地点の地質状況は、中生代三畳紀からジュラ紀の丹波 層群にあり、主に砂岩層、砂岩頁岩互層、緑色岩層(玄 武岩質溶岩)より構成される.

実施された物理探査

本研究で用いる物理探査は、弾性波トモグラフィ探査、 表面波探査、比抵抗トモグラフィ探査であり、それぞれ の探査からP波速度、S波速度、比抵抗が求められる. A 地区およびB地区ともにこれらの物理探査が実施されて いるが、A地区においては、弾性波トモグラフィ探査実 施の際、厚いモルタルの影響で地表部の伝播速度が正確 に測定できなかった.また、比抵抗トモグラフィ探査実 施の際には、吹付けモルタル背面のラス網の影響により 地表部の比抵抗は広範囲で小さい値を示し、良好なデー タが得られなかったと思われる.そのため、地表部の地 山状態を反映していない可能性があり、物理探査の適用 性に課題が残るものとなった.そこで本研究では、比較 的良好なデータが取得できたと思われるB地区における 物理探査の結果を用いた.

各物理探査の測定条件としては、法面の縦断方向に測線を取り、測線上の法肩部と法尻部の2箇所でボーリン グ調査が行われている.ボーリング調査の総掘進長は、 法肩部(B-3孔)が17m,法尻部(B-4孔)が15m,ボー リング孔間の測線長は16.1mである.本研究では、ボー リング孔間の測線断面における物理探査データを複合評 価の対象とした.図-4~図-6に2008年から2010年の12月 に計測された結果を示す.また、P波速度と比抵抗に関 しては、含水状態に依存するため、探査実施日前1週間 の降水量の合計を表-1に示し、測定時の孔内水位をP波 速度分布図と比抵抗分布図に赤い点で示す.P波速度は、 深度が深くなるにしたがって地盤を伝播する速度が





表-1 探査実施日前1週間の降水量の合計

(ヨ白は古まない、 拍弧内は, ヨ白の禅水重. 甲位:mm/			
	2008年	2009年	2010年
弹性波探查	10.0(0.5)	3.5 (0.0)	25.5 (2.0)
比抵抗探查	27.0(0.0)	12.5 (0.0)	2.0 (0.0)

速くなる傾向を示す結果となった.また,降雨による影響はほとんどないようにみえる.S波速度においては, 法尻部で低速度となっており,強風化域と推定される. 比抵抗においては,地表部およびB4孔の深度4m以深で 低比抵抗であり,風化や地下水による影響と推定される. また,降雨の影響はほとんどないと考えられる.また, 本研究で用いる物理探査データは取得方法が異なるため, 取得された探査深度および解析のセルサイズが異なる. そこで各探査データの解析セルサイズを統一する必要が あり,内挿法(線形補間)によってセルサイズを0.5mに 統一した.実施した探査中,最も細かい解析セルサイズ を基準とし,他の探査データのセルデータ数を,内挿法 を用いて増やす方法を採用し,局所的な異常分が内挿法 により平均化されてしまうということがないように努め た.

4. 自己組織化マップ

(1) 自己組織化マップ(SOM)の概要

SOM は、ヘルシンキ大学のコホネンによって 1979 年 に発表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 の大きな特徴は、物理量の異なる高次元デ ータ間の非線形な統計学的関係を、簡単な幾何学的関係 に変換することができることである.具体的には、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 ータは遠くに配置されたマップを作成し、高次元のデー タを二次元平面に写像することができる. 作成したマッ プ上の初期クラスター候補群に対してクラスター分類を 行い、各クラスターの特徴を定性的に読み取ることで複 合的な評価を行う. 図-7 に SOM の計算過程を示す. 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を2次 元平面に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-7(a)).マップの初期化後、マップ に対して入力ベクトルを学習させ、個々のマップ上での ノードと入力ベクトルを比較し、式(1)に示されるデー 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-7(b)).

$$d = \|x_i - m_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n [x_{ik} - m_{jk}]^2}$$
(1)

ここに、*d*はユークリッド距離、*x_i*は入力ベクトル、*m_j*はマップ上の参照ベクトルである.次に、勝者ベクトルおよびその周辺の近傍ベクトルは式(2)に従って入力ベ



図-7 SOMの計算過程

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-7(c)).

$$w_i(t+1) = w_i(t) + h_{ci}(t) [x_i(t) - w_i(t)]$$
(2)

ここに、w(t)は学習能力、h_a(t)は近傍ベクトルのサイズ を決定する近傍関数、t は学習での時刻である.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-7(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ター に分類されるかが分かる(図-7(e)).

(2) k-means法

本研究では、客観的にクラスター分類を行うため、kmeans 法を用いた.k-means 法では、あらかじめクラスタ ーの数を k と設定し、各データに対してランダムにクラ スターを割り振る.割り振ったデータをもとに各クラス ターの中心を計算する.計算は通常割り当てられたデー タの各要素の平均が使用される.各データとクラスター の中心間との距離を求め、各データを最も近い中心のク ラスターに割り当て直す.これらの処理で全データのク ラスターの割り当てが変化しなかった場合は処理を終了 する.それ以外の場合は新しく割り振られたクラスター から中心を再計算し、一連の処理を繰り返す.この計算 の特性上,初期クラスターの中心位置をランダムに決定 して計算を進めていくため,初期値によって最終的な分 類結果に多少の差異が生じる.そこで,最終的な分類結 果を評価するための評価関数として,式(3)で示される Davies-Bouldin Index(DB Index)⁸⁰を用いた.

$$DBindex = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} \max_{i \neq j} \left\{ \frac{\Delta(X_i) + \Delta(X_j)}{\delta(X_i, X_j)} \right\}$$
(3)

ここに、 $k: クラスターの数、 \delta(X_i, X_j)はクラスターX_i と X_jにおけるクラスター中心間のユークリッド距離、 <math>\Delta(X_i)$ はクラスターX_iの中心と各クラスターとのユークリッド 距離の平均値を表す. k-means 法による分類を複数パターン実施し、DB Index を最小にとる結果を適切な分類結 果として決定した.

5. 法面の地盤物性評価

各物理探査データのマップ図および k-means 法による クラスター分布を図-8 に示す.マップ図は、2 次元平面 において類似するベクトルを近傍に配置するので、縦・ 横方向は直交座標系を意味するものではなく、各物理探 査データがマップ上でどのように分布するかを読み取る のに用いる.マップ上での各物理探査データを分類する 際には、k-means 法 によるクラスター分布の結果を用い た.クラスターの数は多すぎると解釈が複雑となり、分 類の意味を成さないため、4 と設定した.表-2 は、マッ プ図から推定される各クラスターの岩盤性状である.



図-8 k-means法によるクラスター分類を行った 各物理探査データのマップ図

また、マップ図から法面内を各クラスターに分類した結 果とボーリング調査の結果を比較したものを図-9~図-11に示す.

まず、図-8のマップ図より推定できる各クラスター の岩盤性状について述べる.マップ上において、クラス ター1はP波速度が高く、比抵抗が低いエリアを示して いる. P 波速度は、岩盤の硬さに依存する以外にも、岩 盤中に水が存在すると速くなるという傾向があるため、 クラスター1 は比較的硬質で高含水な状態であると推定

表─2 谷クラスターの岩盤性状		
クラスター1	比較的硬質で高含水率	
クラスター2	比較的硬質で低含水率	
クラスター3	クラスター1,2に比べ軟弱で,高含水率	
クラスター4	強風化域で脆弱部	

タカニッカ の田市はいい





できる. クラスター2 に関しては, S 波速度が高く, 比 抵抗が高いエリアを示している.S波速度は主に岩盤の 硬さに依存し、その傾向は P波に比べると顕著な性質を 持っているが、今回の結果ではS波速度の最小値と最大 値の差がそれほど大きくなく、P 波速度との相関性もあ まり見られない. その原因として、今回使用したデータ が地表面から 7m 程度と浅かったためであることが考え られる. そのため、本報告ではS波速度の結果は参考程 度とする.よって、クラスター2は、比較的硬質で低含 水な状態であると考えられる. クラスター3 は, P 波速 度、比抵抗ともにやや低いため、軟弱な岩盤で、やや高 含水な状態であると考えられる. クラスター4 は, P 波 速度や比抵抗が最も低く、全ての分類結果において地表 部に分布しているため、風化の影響を大きく受けており、 脆弱部であると推定できる.

次に、分類結果とボーリング調査結果との比較、およ び各年の分類結果の比較について述べる. ここで、各年 のクラスターの変化は、岩盤の脆弱化も示すと思われる が、本報告では 1~2 年の期間で検討しており、この短 期間で岩盤の脆弱化が大きく進行するとは考えにくい. よって、クラスターの変化は、含水状態の変化と捉える こととする. 各分類結果を比較して見てみると, B-3 孔 (法肩部)において、クラスターが大きく変化している. この部分においては, RQD が 0%の区間と概ね一致して いるため、脆弱化しており、含水状態が非常に変化しや すい箇所であると考えられる. また, 2008 年の分類結 果では、図の深部にクラスター1 が広く分布しているが、 2009年, 2010年と経時的にクラスター1 がクラスター2 へと変化している. つまり、ここでは含水率が小さくな ったと推定される.ただし、法面中央部に分布している クラスター2 については、変化が見られないため透水性



の低い良好な岩盤性状であると考えられる.

6. 結論

本研究では、複数の物理探査の結果を総合的に解釈す るため、情報処理工学の分野で幅広く使われている自己 組織化マップに着目し、物理探査で得られた物理量のデ ータを4つのクラスターに特徴付けて分類を行った.以 下に本研究で得られた所見を示す.

- 弾性波トモグラフィ探査,表面波探査,比抵抗トモ グラフィ探査の3種の物理探査から得られた次元の 異なる物理量(P波速度,S波速度,比抵抗)を SOMとk-means法を用いることで,法面を特徴ごと に4つのクラスターに分類することができた.
- 2) 分類結果は、ボーリング調査で得られた RQD や岩 級区分,推定される地層構造とも概ね整合的な結果 が得られた.
- 3) 今後も定期的な計測を行っていくことで、風化や帯 水状態といった地盤内部の状況の変化を捉えること が可能であると考えられる.また、分類後の各クラ スターの評価において、現段階では定性的な評価で あるため、今後定量的な評価手法が求められる.

謝辞:本研究を進めるにあたり,現地計測データを提供 して下さった,新都市社会技術創造融合研究会「物理探 査の連続計測による斜面地盤の工学的評価手法に関する 研究」プロジェクトの皆様に謝意を表します.

参考文献

- Kohonen, T.: Simultaneous order in nervous nets from a functional standpoint, *Biological Cybernetics*, Vol. 50, pp. 35-41, 1982.
- Kohonen, T.: Self-Organization and Associative Memory, Heidelberg: Springer, 1984.
- 3) 徳高平蔵,藤村喜久郎,山川烈:自己組織化マップ応用事 例集 SOM による可視化情報処理,海文堂,2002.
- 4) 日外勝仁,斎藤敏明,伊東佳彦,橋本祥司:数量化理論Ⅱ 類および自己組織化マップによる岩盤斜面危険度評価法に 関する研究,土木学会論文集, No.771, pp.51-60, 2004.
- 5) 辻健, 松岡俊文, 中村恭之, 徳山英一, 倉本真一, Bang, N.:自己組織化マップを用いたアトリビュート解析による 南海トラフ沈み込み帯におけるプレート境界面の物性評価, 物理探査, Vol.57, pp.121-134, 2004.
- 6) 宮川歩夢, 辻健, 松岡俊文, 山本剛:自己組織化マップを 用いた複合物理探査による堤防内土質性状の分類, 土木学 会論文集 C, Vol.66 No.1, pp.88-99, 2010.
- 7) 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.
- Davies, D. L. and Bouldin, D. W.: A cluster separation measure, *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Integrence*, Vol.1, No.2, pp.224-227, 1979

COMPOUND EVALUATIONS METHOD OF SOME GEOPHYSICAL EXPLORATIONS BY SELF-ORGANIZING MAPS

Takaya OFUJI, Harushige KUSUMI, Makoto NAKAMURA and Tsuyoshi YAMAMOTO

In recent years, geophysical exploration is the remarkable method to evaluate the soundness of the aging slope. However, there is a limit of the interpretation by a geophysical exploration, so two or more geophysical explorations are used. In this study, we tried to cluster two or more geophysical exploration data (P wave velocity, S wave velocity and resistivity) by using self-organizing maps (SOM) and evaluate characteristics in the ground. Moreover, an objective classification was enabled by using the k-means method. The classification result was relatively conformal with boring data. Therefore, it was shown that compound evaluation of the geophysical explorations is possible.