

採石場での3次元地質モデルの利活用事例の紹介

国際委員
安田智広

1. はじめに

昨今、日本でも BIM/CIM を推進する中で 3 次元データの利活用が話題に上ることが多い。欧州ではフィンランドやイギリスなどが以前から BIM を進めており、アジアではシンガポールの BIM の取り組みが抜きん出ている。筆者もシンガポールで 3 次元地質モデル作成に携わり、3 次元データを地下開発の候補地選定に利用した¹⁾。国内では地下水流動解析のために水理地質構造モデルを 3 次元で構築した事例等があり²⁾、3 次元地質解析技術の標準化も検討されている³⁾。上記のように単なるモデリングに終わらず、構築した 3 次元地質モデルを利活用している事例を IAEG ブリテンから探してみた。海外では鉱山資源分野で 3 次元地質モデリングに関する技術が進歩した経緯もあり、採石場での活用事例が見つかったので、今回紹介する。

2. 紹介論文の概要

紹介する論文は Bulletin の第 76 巻第 2 号 477-496 ページに掲載されている「Tectonic structures and commercial compartments in active quarrying: a case history from northern Italy」⁴⁾である。本論文の執筆者である Gianluca Vignaroli (筆頭者) と G. Belardi は、イタリア、Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria に所属、G. Urru は、イタリア、ESRI ITALIA に所属、F. Rossetti は、ローマ・トレ大学に所属、L. Piaggi は、イタリア、Studio Tecnico Geologico Piaggi に所属する。

Introduction

- 地質学的情報は採掘基準を検討するために重要であり⁵⁾、近年の公表論文ではテクトニックな構造(主に断層)が採石場における岩質、岩塊の粒径分布、山体の変形、崩壊、そして稼働中の危険要素にいかの影響しているかが強調されている⁶⁾、⁷⁾など。

一方で、テクトニックな構造が採石場を区画化する地形学的境界として扱われることはほとんど無い。

- 本研究は、Ligurian アルプス(イタリア北部)に位置する Tana dei Banditi 採石場において、変斑レイ岩体の採石を目的とした鉱山開発に 3 次元地質モデルを活用し、テクトニックな構造が採石場の区画化や掘削する岩石の力学的特性へどのように影響しているかを述べている。

Methodology

3 次元地質モデルは、地理情報システムに集約されたデータ(現地の地質構造調査結果、原位置強度測定結果、岩石学的分析結果)に基づいて構築されている(図-1)。

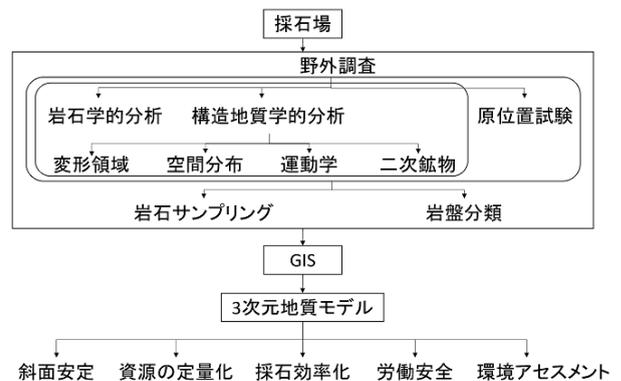


図-1 ワークフロー 原著論文をもとに作成

Geological Setting

Tana dei Banditi 採石場は、超マフィック岩類(蛇紋岩・かんらん岩)・マフィック岩類(斑レイ岩・玄武岩)・堆積岩類から構成される Voltri Massif オフィオライトコンプレックスの東側に位置しており、新生代に起こったアルプス造山運動の影響を受け複数回の構造変形と変成作用を被った地域である⁸⁾。対象の採石場は蛇紋岩体に挟まれる数キロメートル規模の変斑レイ岩体の一部で、岩体は N-S 方向のトレンドを示している。

Field Data

● 岩相

採石場で確認された岩石タイプは①変斑レイ岩、②緑泥石/滑石片岩、③蛇紋岩の3つである。変斑レイ岩および緑泥石/滑石片岩に緑色片岩相の変成作用を被ったときに形成された片状構造が認められる。

● 地質構造

緑色片岩相の変成作用時に形成された片状構造（延性変形）の走向は主に N-S で 50°以上の東傾斜を示す。変斑レイ岩に確認された引張とせん断による割れ目（S1 系構造）は ESE-WNW, 68°S に集中する方向性をもつ。また、破碎帯または破碎部（S2 系構造）は E-W と N-S の走向を有する 50°以上の傾斜を主とする断層系から成る。

● シュミットハンマーによる岩石強度測定

原位置で行われたシュミットハンマーによる岩石強度の測定は、①非変形の変斑レイ岩、②割れ目（S1 系構造）を伴う変斑レイ岩、③破碎された（S2 系構造）変斑レイ岩、④破碎された（S2 系構造）緑泥石/滑石片岩の4種を対象に実施し、測定値は一軸圧縮強度に換算した。測定された各岩石強度には、岩質と不連続面の間隔に応じて次のような傾向が認められる。割れ目（S1 系構造）がある変斑レイ岩の不連続面間隔は 1 m から数十 cm であり、間隔が広いほど高い強度を保持する（不連続面間隔 > 50 cm: 200 MPa 以上、不連続面間隔 10-50 cm: 70-140 MPa、不連続面間隔 < 10 cm: 50 MPa 程度）。一方、破碎帯または破碎部（S2 系構造）を伴う変斑レイ岩と緑泥石/滑石片岩では、不連続面間隔が数 cm から数 mm と狭く、岩石強度も低い値を示す（変斑レイ岩: 測定値はばらつくが 140 MPa 未満、緑泥石/滑石片岩: 30 MPa 程度）。非変形の変斑レイ岩の強度は 200 MPa 以上である。

The GIS Modelling

- ESRI 社の「ArcGIS 10.1」ソフトウェアによって構築された 3 次元地質モデルから、採石場に分布する変斑レイ岩体の表面積 (39,000 m²) および体積 (2,500,000 m³) を算出した。
- Circle-inventory 手法⁹⁾を用いて採石場のテクトニックな構造の密度を計算し、採石場上部 (> 海拔 350m) はその下部に

比べてテクトニックな構造が 2 倍ほど多いことが明らかになった。

- Natural Neighbor 内挿法¹⁰⁾を用いて、測定された一軸圧縮強度を南側の 3 次元地質モデル上に反映させた。テクトニックな構造の幅が広いほど岩盤が被る破碎や風化といった物理化学的性質変化が大きくなることが明らかになった。

Discussion and Conclusion

- テクトニックな構造の空間分布と岩石学的特徴から採石場を 4 つの区域 (Sector) に分類した (図-2)。採石場中央部の海拔 350m より下位に位置する区域 I は変斑レイ岩の占める割合が高く、テクトニックな構造が少ないためメートルサイズの採石に適した区域である。一方、区域 I の上位に位置する区域 II も主に変斑レイ岩から構成されるが、2 方向の S2 系断層の交差によりテクトニックな構造が区域 I よりも多く、採石可能な岩塊が小さくなるため適切な採石法を検討したほうがよい。採石場の西側と東側にそれぞれ位置する区域 III と IV では、変斑レイ岩の中に緑泥石/滑石片岩がレンズ状に分布し、前述のようにそこでは強度の低下が認められる。

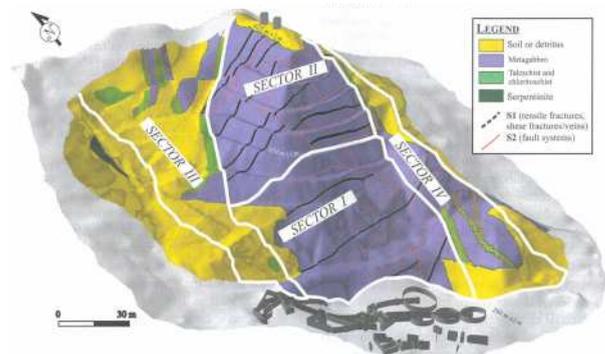


図-2 採石場の 3 次元地質モデル (Vignaroli et al.⁴⁾, Fig.18)

Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4507871146708

- 区域 I と II の変斑レイ岩体の両端は S2 系の断層によって周辺の緑泥石/滑石片岩から縁切りされている。非変形の変斑レイ岩体と破碎作用を受けた部分の強度差が明瞭のように、岩の破碎・風化の程度・膠結作用などの物理化学的性質の変化はテクトニックな構造の空間分布と関連する。そのようなテクトニックな構造を把

握することは、採石場の区画化や区画の評価に最も重要である。

- 一軸圧縮強度のような岩盤の力学的特性を地理情報システムに組み込み、局所的なデータを採石場全体に広げたモデルを作成することで、直接的な調査がまだ行われていない場所の予測が可能となる。
- テクトニックな構造を評価することは、3次元での採石場構造を検討するための最初のステップであり、採石場において適切なエンジニアリングを進めるための基準や指針を見出すためのステップでもある。

3. 終わりに

本論文で示されている 3次元地質モデルは、3次元地形表面に地質平面図を貼り付けただけの準 3次元モデルのように見える。ボーリング調査は実施されておらず、地表地質踏査結果から地表面下の地質は想定されている。本論文で使用されている ArcGIS 以外にも様々な 3次元地質モデリングソフトウェアが開発されており、もっともらしいモデルが出来てしまうのも事実である。3次元で地層分布や地質構造を表現できると、地質リスクなどを専門家以外へ説明しやすくなるだけではなく、地質技術者が考察を行う際の一助ともなる。反面、元の入力データの品質に問題があると構築されたモデルは信頼性に欠けたものになるし、入力データの分布・密度により従来の 2次元地質平面・断面図以上に不確実性を内包したモデルとなり得ることに留意する必要がある。解決すべき課題は多いが、問題のある 3次元地質モデルが出回らないように、その品質を確保するのが我々地質技術者の務めであろう。

4. 参考文献

- 1) Yasuda, T., Lu, K. T., Leh, L. C., Chiam, K., Ghiong, L. S. (2018): Development of 3D geological model of Singapore, Proceedings of International Conference on GIS and Geoinformation Zoning for Disaster Mitigation, pp.175-180.
- 2) 尾上博則・前村庸之・木村仁・菱谷智幸・水野崇・竹内竜史・岩月輝希 (2014): 超深地層研究所計画 (岩盤の水理に関する調査研究) 研究坑道掘削に伴う地下水流動場及び地下水水質の変化を考慮した地下水流動のモデル化・解析, JAEA-Research, 2014-010.
- 3) 3次元地質解析技術コンソーシアム (2018): 3次元地質解析マニュアル Ver1.0.1, <https://www.3dgeoteccon.com/cont5/main.html> (2018年12月時点).
- 4) Vignaroli, G., Urru, G., Rossetti, F., Belardi, G., Piaggi, L. (2017): Tectonic structures and commercial compartments in active quarrying: a case history from northern Italy, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76(2), pp.477-496.
- 5) Marjoribanks, R. (2010): Geological methods in mineral exploration and mining, Springer, New York, p. 248.
- 6) Taboada, J., Vaamonde, A., Saavedra, A., Alejano, L. (1997): Application of geostatistical techniques to exploitation planning in slate quarries, Engineering Geology, 47(3), pp.269-277.
- 7) Zajc, M., Pogačnik, Ž., Gosar, A. (2014): Ground penetrating radar and structural geological mapping investigation of karst and tectonic features in flyschoid rocks as geological hazard for exploitation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 67, pp.78-87.
- 8) Vignaroli, G., Rossetti, F., Rubatto, D., Theye, T., Lisker, F., Phillips, D. (2010): Pressure - temperature - deformation - time (P - T - d - t) exhumation history of the Voltri Massif HP complex, Ligurian Alps, Italy, Tectonics, 29(6).
- 9) Billi, A., Valle, A., Brilli, M., Faccenna, C., Funicello, R. (2007): Fracture-controlled fluid circulation and dissolutional weathering in sinkhole-prone carbonate rocks from central Italy, Journal of Structural Geology, 29(3), pp.385-395.
- 10) Sibson, R. (1981): A brief description of natural neighbour interpolation, In: Barnett, V. (ed) Interpreting multivariate data, Wiley, Chichester, pp.21-36.