

地球統計学を用いた山岳トンネル切羽前方におけるヒ素濃度分布予測

久保大樹*・奥澤康一**・柏谷公希*・小池克明*

Geostatistical Forward Prediction of Leaching Amount of Arsenic in Mountain Tunneling

Taiki Kubo*, Koichi Okuzawa**, Koki Kashiwaya* and Katsuaki Koike*

*京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp (Kubo)

**大林組 技術研究所 Technical Research Institute, Obayashi Corporation,
640 Shimokiyoto 4-chome, Kiyose City, Tokyo 204-8558, Japan.

キーワード：前方予測，クリギング，ヒ素溶出量，空間モデリング，トンネル掘削

Key words：Forward prediction, Kriging, Leaching amount of arsenic, Spatial modeling, Tunnel excavation

1. はじめに

平成 22 年 4 月に改正土壌汚染対策法が施行され、自然由来の重金属等を含有する土壌についても規制の対象となった。山岳トンネルの掘削工事において重金属などのリスクがある場合、必要な掘削ブリの仮置き場を確保できなければ、切羽からオールコアボーリングを行い、掘削前に重金属等の評価を行うことが一般的である。しかしながら、オールコアボーリングは高コストであり、施工サイクルへの影響も大きいことから、通常は 1 断面につき 1 本のボーリングで重金属の濃度が評価される。また、重金属の分析や対策が必要と判定された掘削ブリの処分に多額の費用がかかることもあり、重金属分析の頻度を抑えつつ、より詳細に重金属量を評価し、要対策土の量をできるだけ減らす手法の開発が現在求められている。

山岳トンネルの掘削ブりに含まれる重金属量といった空間的に分布するデータの間の値を予測する手法の一つとして、地球統計学的手法 (Goovaerts, 1997) がある。これを用いた場合、重金属データのみならず、様々な地質情報を解析に加えることで、少数のデータからでも切羽前方の重金属分布を予測できる可能性がある。しかしながら、こうした前方予測手法は確立されておらず、どの程度のデータがあれば十分な精度の予測が可能であるかは不明である。また、地球統計学では、特に鉱床学の分野で重金属含有量が解析の対象になるが、土木工事において問題となりやすいのはその溶出量であり、重金属溶出量の空間的相関構造や地質との関連性についての検討は不十分である (丸茂, 2007)。

そこで本研究では、山岳トンネルの掘削ブりに含まれる自然由来重金属量の予測を行うことを目的として、自然由来重金属の一つであるヒ素溶出量データを対象に、その空間的な相関性や地質的関連因子の有無についての検討を行った。検討の初期段階として、トンネル掘削時に取得されているヒ素溶出量と、ノンコア削孔切羽前方探査の地山評価パラメータである正規化削孔速度比や地質分布を用い、ケーススタディによって重金属濃度予測の実現可能性を評価した。

2. ヒ素溶出量の空間分布推定

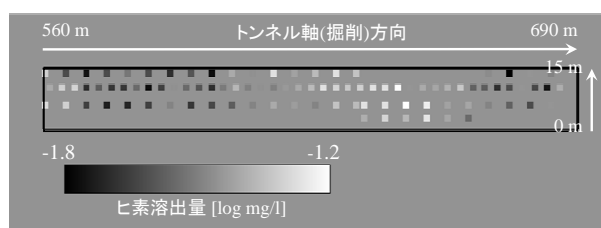
2.1 対象地域とヒ素溶出量データ

当該地山は四万十帯の日南層群の砂岩と頁岩から構成され、同一の切羽からそれぞれ複数のオールコアボーリングとノンコア削孔による前方探査が行われている。本研究の解析では、ボーリングコアのヒ素溶出量データを用いた。データ取得区間は頁岩主体の掘削深度 560 m から 685 m の範囲である。掘削ブリの重金属判定のための分析とは別に、1 断面につき 3 本のボーリングコアを対象として、1 本は 3 m ごと、残りは 5 m ごとに区分した。各区分から等間隔で 5 試料採取し、風乾、粉碎後に均等に混ぜ合わせて 1 つの試料とし、環告 18 号法によりヒ素溶出量を分析した。ヒ素溶出量の分布を第 1 図に示す。

2.2 ordinary kriging によるヒ素溶出量の空間分布推定

全体のヒ素濃度の特徴を把握するため、全取得データを用いて ordinary kriging (OK) を適用した。各ボーリングは、ほぼ同一水平面で軸方向へ掘削されているため、OK の計算グリッドは 1 m × 1 m の 2 次元モデルとして設定した。

データのバリオグラムは球モデルで妥当に近似でき、レンジは約 40 m である。OK による分布モデルから、低濃度領域と高濃度領域が明瞭に区分されていることがわかる (第 2 図)。ただし、検討区間の地質はほぼ均一であり、ヒ素溶出量濃度と地質に明確な関連は見られない。次に、前方予測問題として、全ボーリングから掘削深度 560 m から 620 m までのデータのみを用い、データ未取得区間を含む全区間の推定を OK により行った。このデータのバリオグラムも球モデルに当てはまり、レンジも 40 m と変わらない。



第 1 図 トンネル内のヒ素溶出量分布

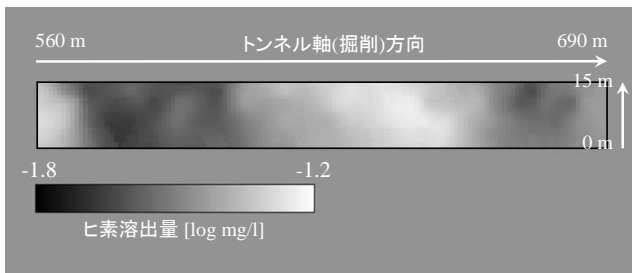
しかし、OK の特性上、データ未取得区間の推定濃度分布がほぼ一様に平滑化され、実データで確認される 670 m 付近の低濃度領域を予測できていない (第 3 図)。

2.2 シミュレーション法の適用

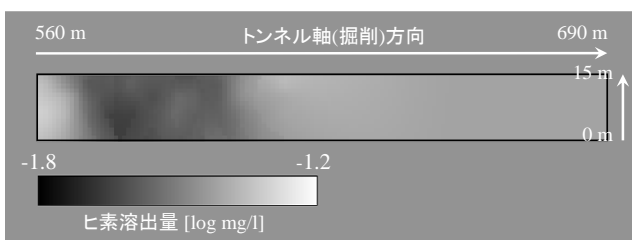
データ未取得区間における濃度変化を再現するために、OK と同じセルを用いて Sequential Gaussian Simulation (以下、SGS) による分布推定を行った。第 4 図に示すように、データ取得区間の異なる 3 パターン (Type1:600 m まで、Type2:640 m まで、Type3:660 m まで) のモデルを作成した。その結果、第 3 図の OK による推定分布と異なり、データ未取得区間でも濃度の大きな変化が生じている。しかし、この変化は確率シミュレーション上で生じるものであり、推定値と実測データを比較すると相関係数は小さく、逆相関を示す部分があるなど、予測精度は低かった。

2.3 補助変数の利用による空間分布推定

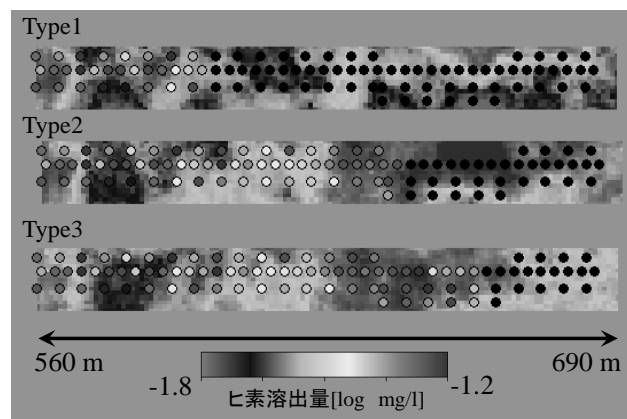
以上の 2 つの結果から、前方予測を行うためにはヒ素溶出量 (主変数) と対応する別種のデータを補助変数として推定に用いることが不可欠と考えられる。そこで、本サイトでヒ素溶出試験に先行して取得されている正規化削孔速度比を補助変数とし、co-kriging (以下、CK) を適用した。削孔速度比の取得位置はボーリング No.3 と同座標とみなし、1 m 間隔の平均値を用いた。データの取得区間は 630 m までと設定し、前方のデータ未取得区間の分布推定を行った。



第 2 図 全データを用いた OK によるヒ素溶出量の空間分布



第 3 図 掘削深度 560 m から 620 m までのデータを用いた OK によるヒ素溶出量の全区間分布



第 4 図 3 つのデータ取得区間に対しての SGS によるヒ素溶出量の全区間分布

正規化削孔速度比データのバリオグラムはヒ素溶出量と同様に球モデルで近似でき、レンジが約 40 m であるが、これらの相関性を表すクロスバリオグラムはばらつきが大きい。よって、本サイトでは co-kriging による推定精度の向上は期待できないが、他サイトでは相関性の存在を示すクロスバリオグラムが得られる場合も確認されている。このことから、岩石中におけるヒ素の存在形態など、地質学的特徴を考慮しながら地球統計学の適用可能な条件を判断する必要があると考えられる。第 5 図は、クロスバリオグラムを球モデルで近似できたとみなした場合の CK による前方予測結果である。第 3 図の OK 結果と比較するとデータ未取得区間で濃度の変化が現れているが、実際の分布よりも変化は小さい。

3. まとめと今後の展望

山岳トンネルの切羽前方における重金属量の予測システム開発を目的として、ヒ素溶出量に注目し、地球統計学的手法による空間分布推定を行った。対象サイトにおいて取得されている全データを用いた場合の空間分布推定は比較的容易であるが、限定されたデータ量から前方のデータ未取得区間を予測したケースでは、適切な推定結果は得られなかった。したがって、現時点で取得されている情報を用いて、従来の地球統計的手法を単純に適用するのみでは予測システムの構築は困難であるといえる。

これを可能にするための今後の展望として、以下があげられる。

- 1: ヒ素が高濃度で含有されている地質の種類やその形態の把握、これと多変量解析のための補助変数の設定など、地質学的観点からの情報の追加
- 2: 不確実性を考慮し、前方に対策を必要とする基準値以上のヒ素が含まれる岩盤が出現する確率を予測するなど、予測システムに適した解析手法の開発

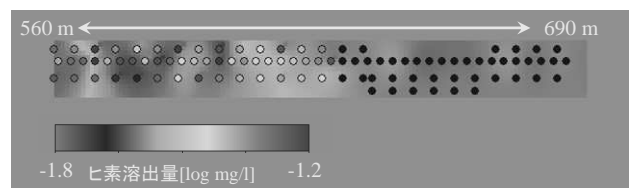
また、これらに併せて、

- ・適切な前方予測のために必要な情報の種類や溶出量試験の頻度の検討
- ・地質情報取得や分析追加による費用増加と、前方予測精度向上による対策費用の軽減のつりあいの検討

も行う必要がある。

文献

- Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, New York, Oxford University Press. 483p.
- 丸茂 克美 (2007) 自然由来の重金属に起因する土壤汚染問題への地球科学的アプローチ. 地学雑誌, vol. 116, no. 6, pp. 877-911.



第 5 図 掘削深度 560 m から 630 m までのデータを用いた CK によるヒ素溶出量の前方向予測