

一般大規模データベースと階層ベイズモデルを用いた 海上空港基礎地盤の多変量物性値の推定 (シンポジウム講演概要)

Reliability Assessment of Multivariate soil Properties under Offshore Airport Using Large-Scale Generic Database and Hierarchical Bayesian Model (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

斉藤 大雅 (東北大・工) 大竹 雄 (東北大・工) ウ ステファン (統計数理研究所)

高野 大樹 (港湾空港技術研究所) 吉田 郁政 (東京都市大・工)

Taiga SAITO, Tohoku University

Yu OTAKE, Tohoku University

Stephen WU, The Institute of Statistical Mathematics

Daiki TAKANO, Port and Airport Research Institute

Ikumasa YOSHIDA, Tokyo City University

E-mail: taiga.saito.r3@dc.tohoku.ac.jp

In geotechnical engineering, it is challenging to construct a site-specific multivariate probability distribution model for soil/rock properties because the site-specific data are usually sparse and incomplete. A hybridization method has been proposed to combine these two sources of soil/rock data (site-specific data and a generic database) to produce a quasi-site-specific model. However, this method does not consider the possible intersite correlation, such as similar geological origins of intersite correlation due to geological similarity. The Hierarchical Bayesian model (HBM), which considers inter-site and intra-site correlations, is proposed later. In this study, we consider the applicability of HBM to Haneda Airport, an ocean airport in Japan, by conducting spatial completion of geotechnical properties by using HBM and comparing the results with the actual data. After that, we discuss the possibility of explaining the geotechnical completion by supplementing the unobserved data.

1. はじめに

海上空港等の大規模地盤構造物の設計,建設,維持管理では,事前の地盤調査に基づいて将来予測が実施される. この将来予測は,空港滑走路の長期的平坦性の確保等,施設の機能性を管理し,対策などの戦略決定において重要な情報となる.しかしながら,地盤調査は限定された地盤指標を離散的に取得するものである. 将来予測には,多変量地盤指標の2次元もしくは3次元の空間分布を把握する必要がある. 伝統的には,この調査間の補間,欠損部の補完作業は,技術者の経験に委ねられてきた. ただし,この作業は,IoTやDX等の情報技術との連携を想定した,施設のライフサイクルマネジメント実施上のボトルネックになると考えられる.

この課題に対して,近年のデータ駆動科学の発展や技術発展により,世界中から集められたジェネリックデータ(BID)の利活用に関する優れた研究が報告されている. 例えば,Phoon and Kulhawy¹⁾は,BIDを用いてローカルサイトにおけるデータを補完するためのデータベース,変換式を体系的に整理した.¹⁾ 近年では,拡張されたBIDとローカルサイトのデータ両方のHybridにより精度を向上したモデルが開発されている²⁾.しかし,これらのモデルはサイトごとに異なるサイト内相関を持つにも関わらず,BIDにおけるサイト間相関の可能性を全く考慮していない. 一方,BIDにおけるサイト内相関とサイト間相関の両方を考慮し,さらにローカルサイトデータを用いてベイズ理論的に補完を行う階層ベイズモデル(HBM)が提案されている³⁾.

本研究では,我が国のある大規模海上空港における地盤物性値のサイト固有変量確率モデルを構築し,効果的な空間補完法を検討する. 具体的には,Jianye et al.³⁾において提案されたHBMを用いて,BIDとサイト固有データの両方を考慮した空間補完法の有効性を検証する.またHBMの結果

を用いて,対象空港データとBIDの類似性を定量化し,工学的知見の獲得へ寄与するか考察を行う.

2. 研究に用いる手法

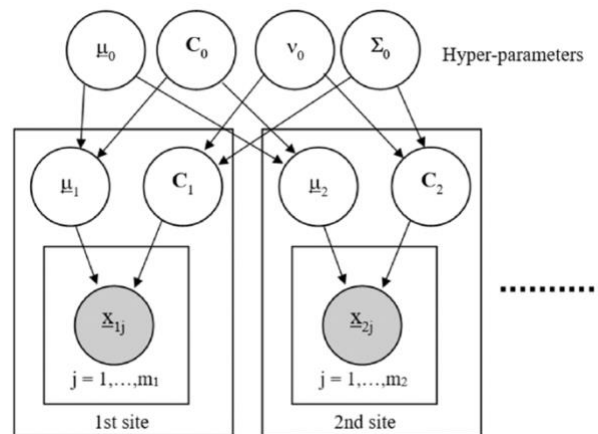


Fig 1. Framework of HBM

階層ベイズモデルでは,BIDにおけるあるサイト i のデータ $x_{i,j}(j=1, \dots, m_i; m_i$ はサイト i のデータ数)は $(\underline{\mu}_i, \underline{C}_i)$ で表されるサイト内特徴量に従い(Fig 1. 下段),また異なるサイトでは異なる平均ベクトルと共分散行列を持つ(i.e. $(\underline{\mu}_i, \underline{C}_i) \neq (\underline{\mu}_j, \underline{C}_j)$)と仮定している (Fig. 1 中段). さらにこれらのサイト内特徴量はあるハイパーパラメータセット $\Theta = (\underline{\mu}_0, \underline{C}_0, \nu_0, \Sigma_0)$ に従うと仮定している(Fig. 1 上段). ターゲットサイトのデータにおいても同様に,サイト内特徴量 $\Theta_s = (\underline{\mu}_s, \underline{C}_s)$ に従い,さらに Θ_s は Θ に従うと仮定する.

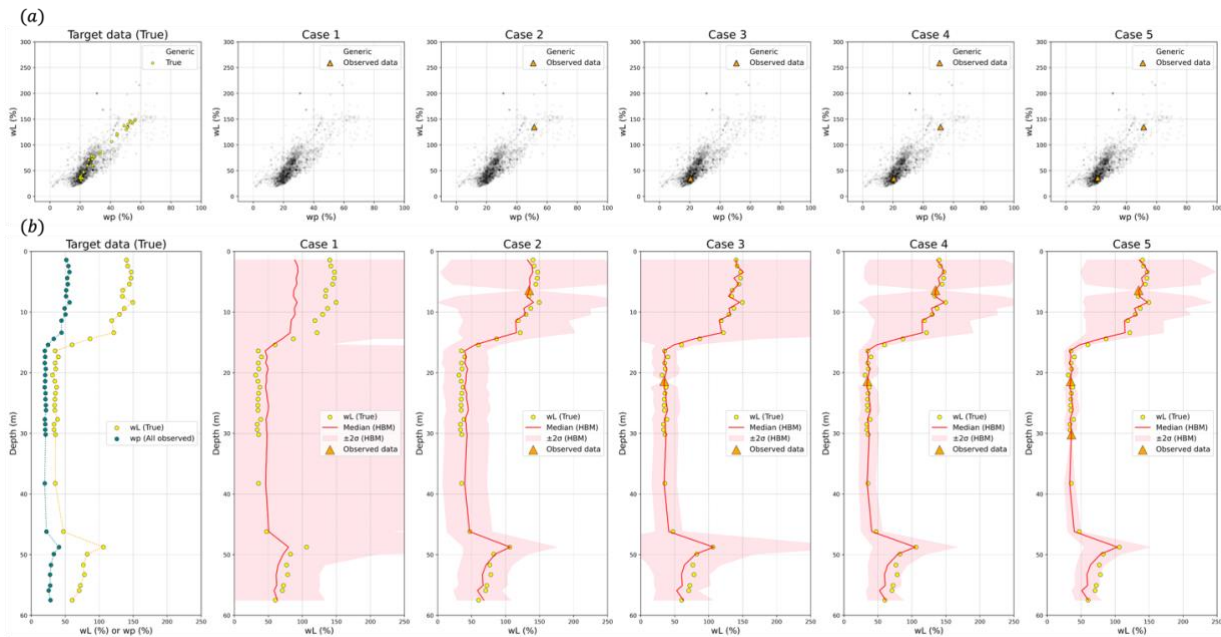


Fig. 2 (a) Generic and Target data; and (b) Inference results for 5 cases

本研究では、HBM モデルの基本的な性質を把握することを目的として、対象サイトのある 1 地点の深度分布推定に着目する。また、BID として CLAY/10/7490(Ching et al.⁴⁾;30 の国で採取された 10 個の粘土パラメータに関するデータベース)を採用した。なお、ここでは簡便のため、塑性限界(wp)と液性限界(wL)の 2 つのパラメータのみに着目し、全ての深度で wp が観測されている条件に基づいて、wL の深度分布の信頼性を推定する。

上記の条件において、wL の観測値の違いにより 5 ケースの予測を行う。具体的には、全ての深度で未観測 (Case1)、6.4m 地点で観測 (Case2)、21.4m 地点で観測 (Case3)、6.4m と 21.4m の地点で観測(Case4)、6.4m と 21.4m と 30.2m の地点で観測(Case5)である。

まず BID から θ を算出した後、対象サイトの既知量(観測データ)を用いて、式(1)で表すように対象サイト未観測データの推定を行う。

$$p(\mathbf{X}_s^u | \mathbf{X}_s^o, \mathbf{X}_g) = \int p(\mathbf{X}_s^u | \mathbf{X}_s^o, \theta_s) p(\theta_s | \mathbf{X}_g) d\theta_s, \\ = \iint p(\mathbf{X}_s^u | \mathbf{X}_s^o, \theta_s) p(\theta_s | \theta) p(\theta | \mathbf{X}_g) d\theta d\theta_s, \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{X}_s^u$ はターゲットサイトにおける未知量、 $\mathbf{X}_s^o$ は対象サイトにおける観測値、 $\mathbf{X}_g \in \mathbb{R}^{2737 \times 2}$ は BID を示す。つまり、(Case1)において、 $\mathbf{X}_s^u \in \mathbb{R}^{38}$, $\mathbf{X}_s^o \in \mathbb{R}^0$, (Case2, Case3)において、 $\mathbf{X}_s^u \in \mathbb{R}^{37}$, $\mathbf{X}_s^o \in \mathbb{R}^1$, (Case4)において、 $\mathbf{X}_s^u \in \mathbb{R}^{36}$, $\mathbf{X}_s^o \in \mathbb{R}^2$, (Case5)において、 $\mathbf{X}_s^u \in \mathbb{R}^{35}$, $\mathbf{X}_s^o \in \mathbb{R}^3$ となる。

3. 研究結果

Fig 2. の上段は wp と wL の散布図であり、黒プロットは BID データ、黄色またはオレンジプロットは対象サイトデータを意味する。下段は wL の深度分布であり、赤実線は各深度における HBM 結果の中央値、桃色範囲は HBM 結果の $\pm 2\sigma$ 区間を示す。Case1 では wL は未観測であるが、wL の正解値と推定値の中央値には大きなバイアスが生じ、推定分散は極めて大きいことが分かる。Case2 と Case3 では観測点が 1 つ加わることで、未観測であった Case1 と比べて信頼区間が劇的に小さくなり、また中央値もより正解データに近づくことが確認できた。この時、観測された wL の値が

大きい場合と小さい場合で推定分散の挙動に違いがある点に興味深い。さらに観測点を増やした Case4 と Case5 ではより信頼区間が減少し、正解データに近づくことが確認できた。概要では 2 つ変数を用いて HBM を適用したが、シンポジウムでは多変数に拡張した推定結果を提示する予定である。これらの推定結果を踏まえて、対象サイトの地盤特性の把握可能性、3 次元土層構成の自動生成の可能性について考察する。

4. 結論と今後の展望

本研究では、実データに基づき、階層ベイズモデリングを適用することで、BID を用いてある大規模海上空港における地盤物性値の効果的な補完を行った。さらに HBM の結果を用いて、対象空港データと BID の類似性の定量化を行った。今後は、BID に対する合理的なクラスタリングの導入可能性について研究する。この作業は、推定精度を向上させるとともに、伝統的な地盤工学的知見の反映のために役立つ可能性がある。

参考文献

- 1) Kok-Kwang Phoon and Fred H Kulhawy. Evaluation of geotechnical property variability. Can. Geotech. J. 36 (4): 625–639, 1999
- 2) Ching, J., and K.-K. Phoon. Constructing site-specific multivariate probability distribution model using Bayesian machine learning. Journal of Engineering Mechanics 145(1):04018126, 2019
- 3) Jianye Ching, Stephen Wu, Kok-Kwang Phoon. Constructing quasi-site-specific multivariate probability distribution using hierarchical Bayesian model. J Eng Mech 2021;147(10):04021069, 2021.
- 4) Jianye Ching and Kok-Kwang Phoon. Transformations and correlations among some clay parameters — the global database. Can. Geotech. J. 51 (6): 663–685, 2014.
- 5) Stephen Wu, Jianye Ching, Kok-Kwang Phoon. Quasi-site-specific soil property prediction using a cluster-based hierarchical Bayesian model. Structural Safety 99 (2022) 102253