

ガウス過程回帰による地表面標高を活用した基盤面推定の基礎的研究

東京都市大学	学生会員	○津田 悠人	建設技術研究所	非会員	富澤 幸久
基礎地盤コンサルタンツ	非会員	和田 昌大	東京都市大学	正会員	吉田 郁政
東京都市大学	正会員	末政 直晃	東北大学	正会員	大竹 雄

1. はじめに

構造物の設計計画は予備設計、詳細設計と段階的に進められる。予備設計では広域を対象に概括的な基盤面を把握し、詳細設計では狭域を対象に追加の地盤調査を行い、より詳細な地盤の空間分布を把握する¹⁾。地盤構造の把握は構造物全体の性能に大きく影響を与えるため非常に重要であるが、設計初期段階では地盤調査情報は乏しく、詳細な地盤構造を推定することは困難である。

一般的に基盤面標高と地表面標高は相関性が高いことが知られている。地表面標高データは国土地理院が無償で提供しており、設計初期段階から入手可能であるため有益な情報である。本研究では、地表面標高を活用したガウス過程回帰（Gaussian Process Regression, GPR）による基盤面推定手法を提案し、実地形データに対する試算例を示す。

2. 基盤面推定のための GPR の定式化

標高の推定値ベクトル $\hat{x}_u$ を式 (1) に示す²⁾。

$$\hat{x}_u = \bar{x}_u + [M_{oo} + \sigma_n^2 I]^{-1} (z - \bar{x}_o) \tag{1}$$

ここで、添え字の o ：観測地点、 u ：推定地点を表す。
 $\bar{x}_u$ ：平均値ベクトル、 M_{ij} ：共分散行列、 z ：観測量ベクトル、 σ_n ：観測量誤差の標準偏差、 I ：対角行列である。共分散行列の各要素は式 (2) から求める。

$$\text{cov}(s, s') = \sigma^2 \times \rho(d | \delta) \tag{2}$$

ここで、 σ ：確率場の標準偏差 (SD)、 $\rho(d | \delta)$ ：自己相関関数、 d ：2 点間距離、 δ ：scale of fluctuation (SoF) である。自己相関関数は Second-order Markov (SoM) を用いる。

観測量ベクトル z は式 (3) に示すように 2 種類の観測量を定義する。

$$z^T = (z_{o,a}^T, z_{o,b}^T) \tag{3}$$

ここで、添え字の a はボーリングから得られる基盤面標高、 b は斜面勾配が大きい箇所の地表面標高である。ボーリング $z_{o,a}$ に関する観測方程式を式 (4) に示す。

す。

$$z_{o,a} = x_{o,a} + v_{o,a} \tag{4}$$

$x_{o,a}$ ：真の基盤面標高、 $v_{o,a}$ ：観測量誤差の標準偏差である。 $z_{o,a}$ はボーリングから得られる直接的情報であるため、 $v_{o,a} = 0.01$ と小さい値とした。地表面標高 $z_{o,b}$ に関する観測方程式を式 (5) に示す。

$$z_{o,b} = x_{o,b} + d(\theta) + v_{o,b}(\theta) \tag{5}$$

$x_{o,b}$ ：真の基盤面標高、 $d(\theta)$ ：地表面から基盤面までの平均的深さ、 $v_{o,b}(\theta)$ ：観測量誤差の標準偏差である。斜面勾配が大きい地点は観測量誤差の標準偏差を小さくして地表面標高を活用し、斜面勾配が小さい地点は観測量誤差を大きくして推定に寄与しないようにする。

図-1 に川崎市のある地域の 75 地点のボーリングデータを対象に調査した斜面勾配と地表面から基盤面までの平均的深さの関係を示す。斜面勾配が 5 度未満の場合は地表面から基盤面までの平均深さの相関性が低くなることから、5 度未満の標高データは観測量から除外する。5 度以上の位置に関しては図中に示す双曲線から斜面勾配に応じた平均的深さ $d(\theta)$ を仮定した。データ数が不十分であり、 $d(\theta)$ は不確定性が大きい。観測量誤差の標準偏差 $v_{o,b}(\theta)$ は変動係数=1 の斜面勾配依存の確率モデルとした。緩い制約であるため、近くにボーリングデータが存在する場合、標高データを無視し、主にボーリングデータを用いて推定することとなる。

3. 実地形データの概要

図-2 に対象領域の地表面標高のコンター、ボーリング位置を示す。対象領域は 1,500 m × 400 m であり、24 地点のボーリングデータが得られている。周辺の地表面標高データは国土地理院より 5m メッシュのデータを取得した。また、ボーリングデータは神奈川県川崎市が Web 上で公開している「ガイドマップかわさき³⁾」から取得した。ボーリング地点の基盤面標高

キーワード 基盤面、地表面標高、ガウス過程回帰、ブラインドテスト

連絡先 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 総合理工学研究科 TEL 03-5707-0104

はボーリング柱状図から判読した。基盤面標高は地質図に岩盤層が現れた場合は地表面から岩盤層までの深度とし、現れない場合は地質とN値の関係から判断した。

4. 実地形データを対象とした基盤面推定

自己相関関数を SoM, SoF=130, SD=8 とし基盤面を推定した。各ボーリング地点に対してブラインドテストにより精度を検証した。例えば、ボーリング A 地点のブラインドテストの場合、A 地点のデータを観測量から除き、A 地点以外のデータから A 地点を推定することで、真値を推定値の精度を検証した。また、地表面標高を考慮する手法（提案手法, GPR-ID）と考慮しない手法（GPR）による比較を行った。図-3 に各ボーリング地点のブラインドテストによる推定結果を示す。図中のエリア 1（紫）は標高が高く斜面勾配が大きな位置、エリア 2（オレンジ）は斜面勾配は小さいが斜面近傍の位置、エリア 3（青）は斜面勾配が小さく、斜面から離れた平野部である。GPR の推定精度は、斜面勾配が大きな位置（エリア 1）では十分なボーリングデータが得られていないため低い。一方、GPR-ID の推定値が真値とよく一致している。エリア 3 では、ボーリングデータは多く得られており、平野部であるため地形の影響が少ないため 2 つの手法で同様の推定結果が得られている。また、当然ことながら GPR-ID では多くのデータを用いるため、推定値の不確実性は GPR と比べて小さくなっていることが確認できる。

5. おわりに

本研究では地表面標高を活用した GPR による基盤面推定手法を提案し、実地形データに対して試算例を示した。地表面標高を考慮した場合としない場合で推定値の精度を比較した。斜面勾配が大きい位置や斜面近傍のような地形的影響が大きな位置では、地表面標高を考慮することで推定精度が向上し、推定値と真値と良く一致する結果が得られた。しかし、斜面から離れた平野部では、地形的な影響をあまり受けないため推定精度は向上しなかった。地表面標高データは基盤面標高の推定に役立つ場合があり、提案手法は位置に応じて有効であることを示した。

参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局：設計要領（共通編），
<https://www.hrr.mlit.go.jp/gijyutu/kaitei/sekkei/R031>

0_ikkatu_sekkeiouryou.pdf, 閲覧日 2023.1.30.

- 2) Yoshida et al. : Estimation of trend and random components of conditional random field using Gaussian process regression, Computers and Geotechnics, Vol.136, 2021.
- 3) 川崎市：ガイドマップかわさき，
<https://kawasaki.geocloud.jp/webgis/?p=1&bt=-1&>，
閲覧日 2023.1.30.

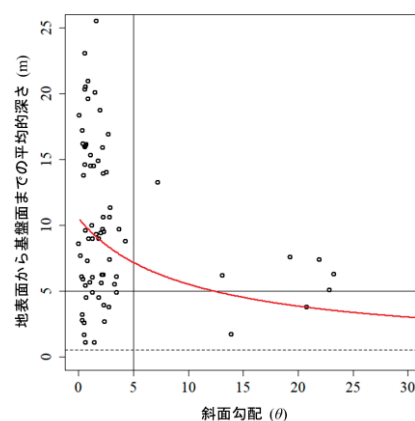


図-1 斜面勾配と基盤面までの平均的深さ

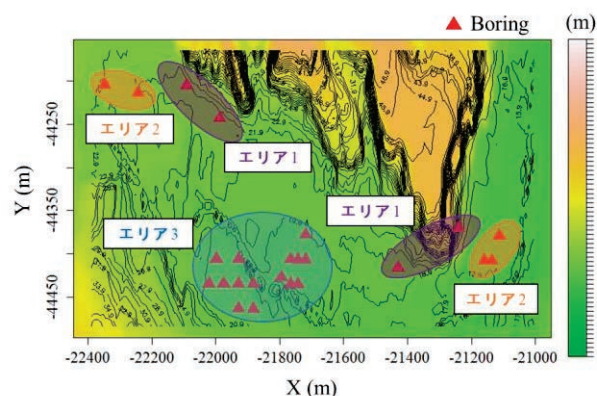


図-2 対象領域の地表面標高のコンター

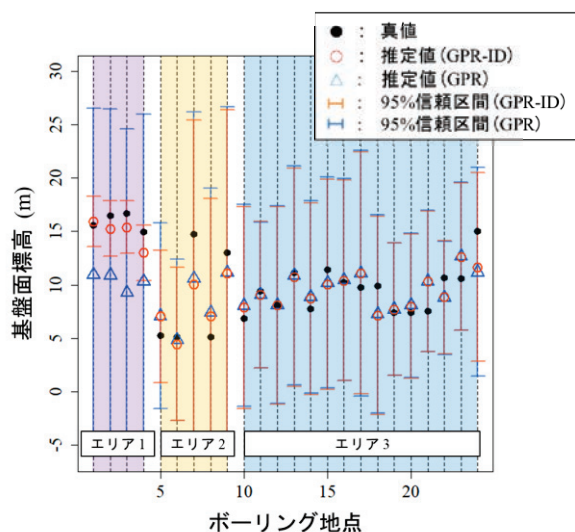


図-3 ブラインドテストによる推定