

石灰改良した地盤を対象とした極限支持力のベイズ推定に関する一検討

鉄道総合技術研究所 正会員 ○笠原 康平 中島 進 藤本 達貴
ジェイアール総研エンジニアリング 中川 洋二

1. はじめに

土構造物や基礎構造物の設計は、原位置試験等の地盤調査を行い、その結果に基づいて実施されるのが一般的である。そのため、構造物を合理的に設計する上では、原位置試験等の地盤調査で地盤の強度・剛性等を適切に評価することが重要となる。平板載荷試験は、原位置試験の代表的なものの1つであり、鉄道では盛土の施工管理や直接基礎の支持層確認等に用いられている。しかしながら、平板載荷試験は極限支持力に至るまで載荷するために大規模な反力装置が必要であることや、1箇所当たりの試験が長時間に及ぶという課題がある。これらの課題に対して、筆者らはベイズ推定により平板載荷試験の荷重と沈下量の観測情報を外挿して地盤の極限支持力を推定する手法を提案している¹⁾。しかしながら、本提案手法を実際の平板載荷試験結果と比較検討した例はまだ少ない。そこで本稿では、石灰改良した地盤を対象に実施した平板載荷試験結果²⁾と提案手法による推定値を比較し、提案手法の適用性について検討する。

2. 荷重沈下量関係のモデル化

筆者らの提案手法は、平板載荷試験で得られた観測情報（荷重と沈下量）を外挿することで極限支持力の推定を行うものである。これにより、小さい変位レベルでの平板載荷試験結果から地盤の強度を評価することが可能となる。観測情報を外挿するための荷重沈下量関係のモデル化は、初期・降伏・極限の3点をフィッティングできる Weibull 曲線を用いた。式(1)に Weibull 曲線の荷重 P と変位 S の関係を示す。

$$P = P_u \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{S/D}{S_s/D} \right)^m \right] \right\} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 m ：変位指数、 S_s ：基準変位、 P_u ：最大荷重、 D ：載荷板の直径である。

3. ベイズ推定の考え方

ベイズ推定とは、観測情報を用いて推定したい事柄の確率分布を推論する技術である。提案手法では、Weibull 曲線の各パラメータ（変位指数 m 、基準変位 S_s 、最大荷重 P_u ）に対して事前確率分布を仮定した上で、平板載荷試験の観測情報が得られる確率（尤度関数）を乗じること（ベイズ更新）で、極限支持力の事後確率分布を推定する。なお、ベイズ推定の計算に関して、本研究では確率分布を多数の粒子で表現する手法である粒子フィルタ³⁾を用いている。

極限支持力の推定は、Weibull 曲線の各パラメータの事前確率分布を表1のように仮定して行った。また尤度関数は、観測荷重を確定値とした上で、観測変位に対して観測誤差等の不確実性を加算した確率分布として設定した（表2）。極限支持力の推定値については、確率分布のばらつきを考慮するため、事後確率分布の平均値 μ から標準偏差 σ を減じた $\mu - \sigma$ を用いた。

4. 石灰改良した地盤に提案手法を適用した例

小型の土槽内に構築した盛土（縦 4.5m×横 4.0m×高さ 1.2m）で実施した平板載荷試験結果²⁾に対して本提案手法を適用した例を示す。本稿では、石灰改良した稲城砂（S-FG：細粒分礫まじり砂、石灰添加

表 1 各パラメータの事前確率分布の設定

パラメータ	事前確率分布
変位指数 m	0.0～2.0 までの一様分布
基準変位 S_s	0～20 % D までの一様分布
最大荷重 P_u	1～5000 kN/m ² までの一様分布

表 2 尤度関数の観測値に加算する不確実性の設定

項目	確率分布
尤度関数の観測値に加算する不確実性	0～0.3 % D の一様分布

キーワード ベイズ推定、極限支持力、平板載荷試験

連絡先 〒185-8540 東京都分寺市光町 2-8-38 （公財）鉄道総合技術研究所 基礎・土構造 TEL 042-573-7261

表 3 検討ケース

Case 名	ベイズ更新を行う点		
	ステップ 番号	最終ステップの 沈下量(%D)	最終ステップの 荷重(kN/m ²)
Case1	1	0.5	875
Case2	1～2	1.0	1575
Case3	1～3	1.5	2030

率 15%) を締固め度 $D_c=95\%$ (B 法) で構築した盛土の平板
載荷試験結果 (図 1) を対象に検討を行った. なお平板載荷
試験は, 直径 300mm の載荷板を用いて道路の平板載荷試験
方法⁴⁾に準じて実施した.

提案手法の検討は, 表 3 のようにステップ番号 1～3 の範
囲でベイズ更新を複数回行った場合を対象に実施した. な
お今回の検討では, 実際の平板載荷試験における最大荷重
(=2835kN/m²) を極限支持力として推定値と比較した.

図 2 に, ベイズ更新前後での荷重沈下量関係の例 (Case1,
Case3) を示す. 図 2 から, Case1 と Case3 を比較すると,
ベイズ更新回数の大きい Case3 の方が, 荷重沈下量関係を
より狭い範囲に絞り込めていることが確認できる.

また, 図 3 は各検討ケースの推定値と実測値の比較を示
したものである. 図 3 より, ベイズ更新を 1 回のみ行った
Case1 は極限支持力の推定値と実測値の乖離が大きい一方
で, ベイズ更新を複数回行った Case2 と Case3 では, 極限
支持力の推定値と実測値がほぼ同等の値となった. また,
表 4 は石灰改良後の稲城砂 (Case3) と未改良の稲城砂 (締
固め度 $D_c=90\%$: B 法, 荷重沈下量関係の実測値は文献 5 を
参照されたい) の推定結果を比較したものである. 表 4 よ
り, 未改良の稲城砂の場合の推定精度は若干下がるものの,
石灰改良の有無に関わらず, 本提案手法を用いることで極
限支持力を概ね評価可能であることが確認された. 以上の
結果から, 石灰改良地盤のような特殊な条件に対しても提
案手法を適用できる可能性があると考えられる.

5. おわりに

限定的なケースではあるものの, 今回の解析条件では石
灰改良地盤でも提案手法を用いることで極限支持力を評価
できる可能性が示された. 今後は粘性土地盤等でさらなる
検証を行う. なお, 本研究の一部は国土交通省の鉄道技術
開発費補助金を受けて実施した.

参考文献

1) 笠原康平, 中島進, 藤本達貴, 中川洋二: ベイズ推定による地盤の極限支持力推定法の
提案, 第 75 回土木学会年次学術講演会, 2020.
2) 笠原康平, 藤本達貴, 中島進, 中川洋二: 石灰改良した鉄道盛土の締固め度と剛性およ
び強度に関する実験的検討, 第 56 回地盤工学研究発表会, 2021 (投稿中).
3) 土木学会構造工学委員会: 既設構造物を対象とした安全性評価小委員会報告書, 2017.
4) JIS A 1215: 道路の平板載荷試験方法, 2013.
5) 笠原康平, 藤本達貴, 中島進, 中川洋二: 小型施工試験による鉄道盛土の締固め度と剛
性および強度に関する検討, 第 55 回地盤工学研究発表会, 2020.

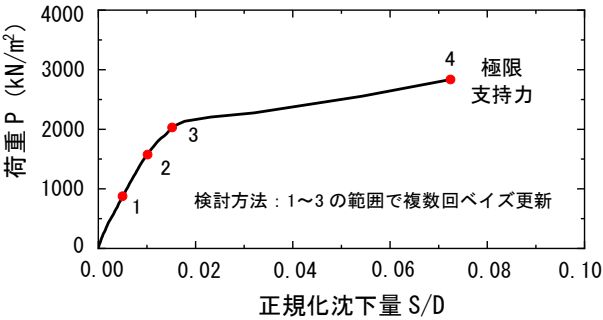
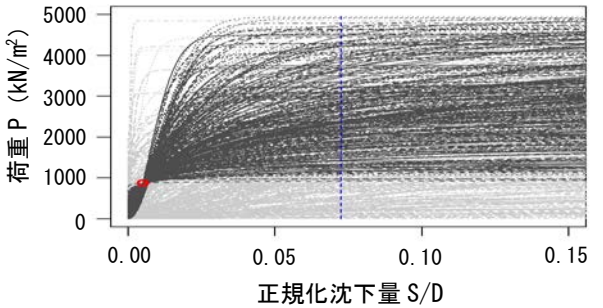
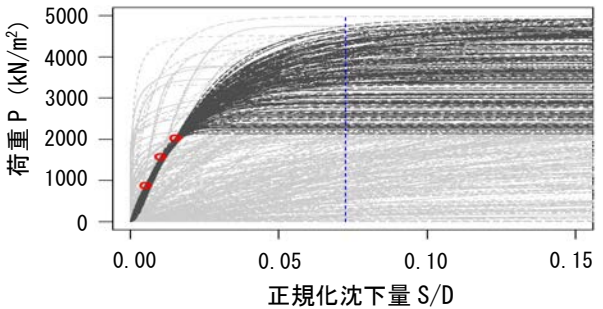


図 1 実際の平板載荷試験結果²⁾



(a) 1 回ベイズ更新 (検討 Case1)



(b) 3 回ベイズ更新 (検討 Case3)

図 2 ベイズ更新前後の荷重沈下量関係の例
(灰色: ベイズ更新前, 黒: ベイズ更新後,
青: 極限支持力を推定する変位)

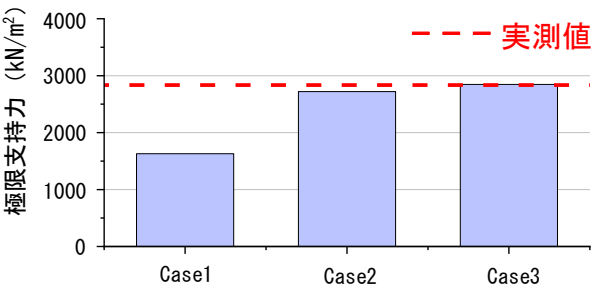


図 3 検討結果

表 4 石灰改良前後の推定結果の比較
(3 回ベイズ更新の場合)

極限支持力	石灰改良した 稲城砂 (Case3)	未改良の 稲城砂 ⁵⁾
推定値 $\mu - \sigma$ (kN/m ²)	2846.4	441.0
実測値 (kN/m ²)	2835.0	525.0
推定値 / 実測値	1.00	0.84