

ベイズ推定による地盤の極限支持力推定法の提案

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

現在、鉄道や道路等の各種技術基準は性能照査型設計法が導入されており、地盤調査で地盤の剛性・強度を適切に評価することで、より合理的な設計を行うことが可能である。そのため、原位置試験等による地盤調査の重要性がますます高まっている。原位置試験の代表的なものには平板載荷試験があり、鉄道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、平板載荷試験で極限支持力に至るまで載荷するには大きな反力装置が必要であるため、施工ヤードや機材等の関係で大きな反力装置を設置できない場合は極限支持力が確認できないという課題がある。さらに、1箇所当たりの試験が長時間に及ぶため、時間的制約の厳しい場合には多箇所試験を行うことが困難である。

そこで、本研究で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た。さらに、別途実施した平板載荷試験結果¹⁾と提案手法による推定値を比較した。

2. 荷重沈下量関係のモデル化

本提案手法は、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。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

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をベイズ推定と言う。具体的には、事前確率分布を仮定し、これに対して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）で事後確率分布の推定を行う。本提案手法では、Weibull 曲線のパラメータである変位指数 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（荷重および沈下量）の尤度関数を乗じる。その結果、各パラメータおよびそれらから求められる極限支持力の事後確率分布を推定できる。なお本研究では、ベイズ推定の計算に関して、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²⁾を用いた。

極限支持力の推定に当たり、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やクリープ変形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の大きさを考慮するため、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。

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	0～0.2 % D の一様分布

4. 小型施工試験結果への適用

小型の土槽内に構築した盛土（縦 4.5m×横 4.0m×高

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①（1 回ベイズ更新）

Case 名	ベイズ更新を行う点		
	ステップ 番号	沈下量(%D)	荷重(kN/m ²)
CaseA1	1	1.0	1050
CaseA2	2	2.0	1610
CaseA3	3	3.1	1960
CaseA4	4	4.0	2205
CaseA5	5	5.1	2415
CaseA6	6	6.0	2555
CaseA7	7	7.0	2695

表 4 検討ケース②（複数回ベイズ更新）

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)
CaseB1	1	1.0%D	1050
CaseB2	1～2	2.0%D	1610
CaseB3	1～3	3.1%D	1960
CaseB4	1～4	4.0%D	2205
CaseB5	1～5	5.1%D	2415

さ 1.2m) で実施した平板載荷試験結果¹⁾に対して本提案手法を適用した例を示す. 本稿では, クラッシャーラン (C40, GS-F: 細粒分まじり砂質礫) を締固め度 $D_c=95\%$ (E 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³⁾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 1～7 の範囲でベイズ更新を 1 回のみ行った場合 (検討①) と, 表 4 のようにステップ番号 1～5 の範囲でベイズ更新を複数回行った場合 (検討②) 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

(CaseB3) を示す. 図 2 から, ベイズ更新を行うことで荷重沈下量関係の取りうる範囲が絞り込まれる様子が確認できる. また, 図 3, 図 4 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, 図 4 より, ベイズ更新を 1 回のみ行った場合は CaseA5 (5.1%D) 以降のケースで, ベイズ更新を複数回行った場合は CaseB3 (1.0～3.1%D) 以降のケースで, 推定値と実測値がほぼ同等の値 (相対誤差 5%程度) となった. また, ベイズ更新を複数回行うことで, より小さい変位レベルの観測情報から極限支持力を推定できることが分かった.

5. おわりに

本稿では, ベイズ推定により地盤の極限支持力を推定する手法を提案し, 実際の平板載荷試験の結果に適用した例を示した. その結果, 提案手法を用いることで, 極限支持力を高い精度で推定できる可能性が示された. ただし, 本稿は限られた土質材料のみの結果であるため, 今後は様々な土質材料を対象に検証を行いたい.

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, 藤本達貴, 中島進: 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 (投稿中).
2) 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.
3) JIS A 1215: 道路の平板載荷試験方法, 2013.

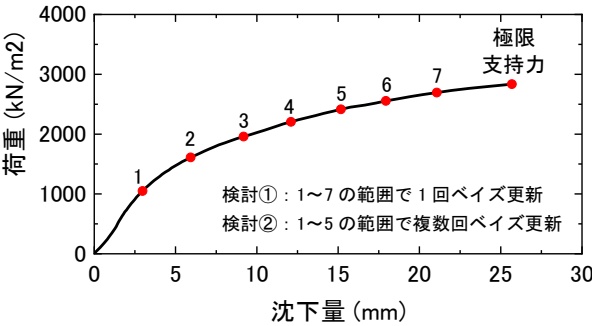


図 1 実際の平板載荷試験結果¹⁾

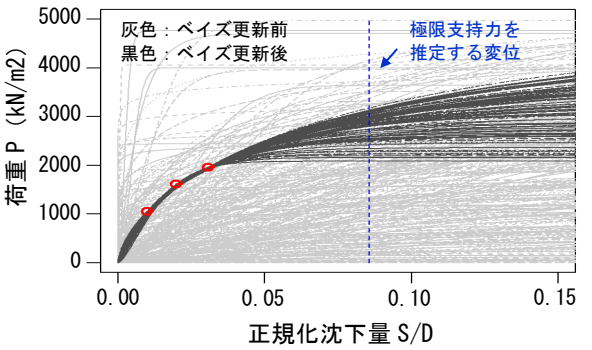


図 2 ベイズ更新前後の荷重沈下量関係の例

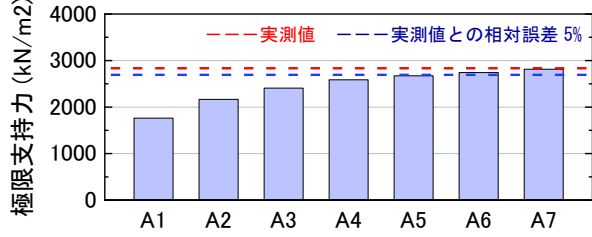


図 3 検討ケース①の結果

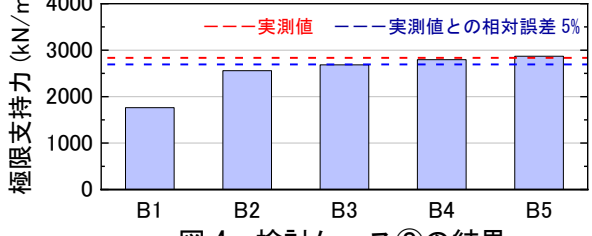


図 4 検討ケース②の結果