

連続載荷した平板載荷試験のベイズ推定に関する検討

鉄道総合技術研究所 正会員 ○笠原 康平 中島 進
複合技術研究所 森腰 慎一

1. はじめに

平板載荷試験は代表的な原位置試験であり、微小変位から大変位に至るまでの地盤の変形強度特性を評価することが可能である。しかしながら、大規模な反力装置が必要であることや、各載荷ステップで沈下が収束するまで荷重保持する必要があるために試験が長時間に及ぶという課題がある。

反力装置の合理化に関して、筆者らは、小規模な荷重レベルの平板載荷試験結果（荷重－沈下量関係）をベイズ推定（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）で外挿して極限支持力を推定する手法を提案している^{1),2)}。一方、荷重保持時間に関しては、荷重保持によるクリープが地盤の変形強度特性の評価に影響することが指摘されており^{3),4)}、荷重保持時間の合理化に当たってはクリープの影響を考慮することが重要だと考えられる。そこで本稿では、反力装置と荷重保持時間の合理化を目的として、荷重保持時間を省略して連続的に載荷（以下、連続載荷）した平板載荷試験を行うとともに、その観測値に対してクリープの影響を考慮した極限支持力のベイズ推定を行った。

2. 小型土槽を用いた平板載荷試験

平板載荷試験は、図1に示す小型土槽（幅2.0m×奥行0.6m）内に高さ0.4m（1層の仕上がり厚さ5cm×8層）の地盤を構築して行った。試験に用いた材料は稲城砂（S-F：細粒分まじり砂）であり（図2）、締固め度90%（B法： $1.0E_c$ ）、含水比16.2%（最適含水比）で地盤を構築した。試験は、直径10cmの円形載荷板を用いて、各載荷ステップで沈下収束まで荷重保持する平板載荷試験（道路の平板載荷試験：JISA1215）【Case1】と、連続載荷する平板載荷試験【Case2, Case3】を行った（表1）。

図3および図4に試験結果を示す。図3より、本実験では0.1%D程度以下の微小変位レベルの荷重－沈下量関係は載荷方法に依らずほぼ同じになった。一方、大変位レベルの荷重－沈下量関係は、連続載荷したCase2, Case3の方が各載荷ステップで10～20分程度の荷重保持を行ったCase1よりも大きい荷重を示した。これは、Case1の載荷において、荷重レベ

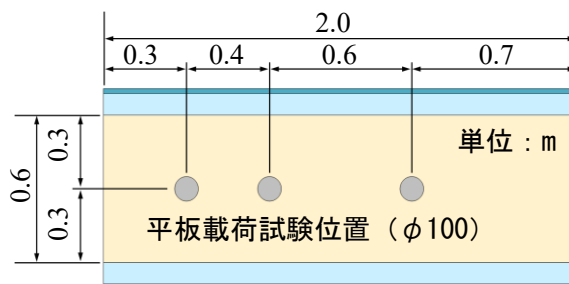
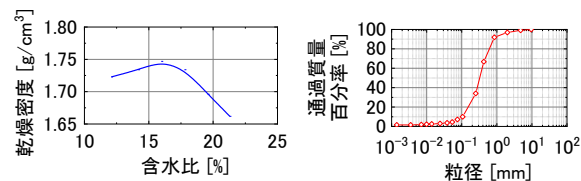


図1 試験概要平面図（高さ：0.4m）



(a) 締固め曲線 (b) 粒度分布

図2 使用材料（稲城砂）

表1 試験ケース

	載荷方法	試験時間
Case1	道路の平板載荷試験【荷重保持あり】	約3.5時間
Case2	1mm/分で載荷【連続載荷】	約20分
Case3	5mm/分で載荷【連続載荷】	約5分

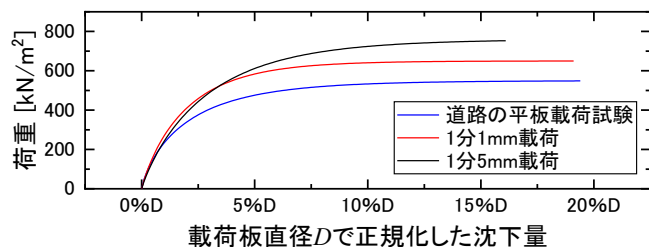


図3 荷重－沈下量関係

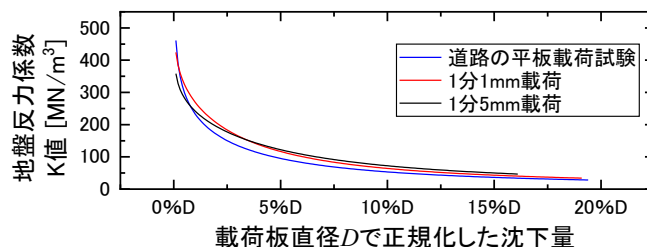


図4 各変位レベルにおける地盤反力係数

キーワード ベイズ推定、極限支持力、平板載荷試験、連続載荷、クリープ変位

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

ルの大きい領域でクリープ変位が大きく発生したためと考えられる。一方、図4より、各変位レベルにおける地盤反力係数については、荷重方法に依らずほぼ同等の結果を示した。このことから、地盤剛性については、連続荷重した場合でも道路の平板荷重試験と同様に評価できる可能性がある一方で、地盤強度については、連続荷重した平板荷重試験では道路の平板荷重試験の極限支持力を過大評価する可能性があると考えられる。

3. 連続荷重した平板荷重試験のベイズ推定

前章の実験では、連続荷重した平板荷重試験は道路の平板荷重試験の極限支持力を過大評価する結果となった。そこで、連続荷重を行った場合の荷重-沈下量関係に対して、クリープの影響を考慮した極限支持力のベイズ推定を行うことで、各荷重ステップで沈下が収束するまで荷重保持した場合と同等の極限支持力を推定可能か検討した。検討では、式(1)に示す Weibull 曲線を用いて荷重 P と沈下量 S の関係をモデル化した。

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

ここで、 m : 変位指数, S_s : 基準変位, P_u : 最大荷重, D : 荷重板の直径である。提案手法では、各パラメータ (m, S_s, P_u) に対して事前確率分布を仮定した上で、平板荷重試験の観測情報が得られる確率 (尤度関数) を乗じて、極限支持力 (沈下量が 10% D の時の荷重) の事後確率分布を推定した。事前確率分布に関して、本検討では平板荷重試験⁵⁾とのフィッティング結果を踏まえて、変位指数 m : 平均値 0.9 で変動係数 20% の正規分布, 基準変位 S_s : 0~3% の一様分布, 最大荷重 P_u : 1~3000kN/m² の一様分布に設定した。また、今回の実験で 200kN/m² 荷重時 (沈下量が 1% D 付近) における Case1 と Case2 の沈下量差分が約 0.001% D であったことを踏まえ、観測変位に対して平均値 0.001% D , 変動係数 80% の対数正規分布を加算することでクリープの影響を模擬した。

また、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 $\mu - \sigma$ で評価した。

検討は、図5に示す連続荷重した Case2 の荷重-沈下量関係 (沈下量 0.1, 0.5, 1.0% D 時の荷重) を観測値として極限支持力を推定し、道路の平板荷重試験である Case1 の極限支持力の実測値と比較を行った。図6は荷重-沈下量関係の推定結果である。図6より、ベイズ推定で荷重-沈下量関係の絞り込みができていることが確認できる。また、表2は極限支持力の推定値と実測値の比較結果である。表2より、連続荷重した場合でもクリープの影響を考慮したベイズ推定結果を $\mu - \sigma$ で評価することで、実験値とほぼ同等の極限支持力となった。

4. おわりに

限定的な条件ではあるが、今回の実験・解析により、連続荷重した平板荷重試験でも、クリープの影響を考慮したベイズ推定を行う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、異なる土質材料への適用性を検討予定である。

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, 中島進, 藤本達貴, 中川洋二: 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, 第76回土木学会年次学術講演会, 2021.
- 3) 田村幸彦, 米澤豊司, 水嶋浩治, 秋田勝次, 小島謙一, 富永真生: 異なる繰返し荷重試験による盛土の沈下特性の検討, 第59回土木学会年次学術講演会, 2004.
- 4) 龍岡文夫, 西恭彦, Di Benedetto, H.: 年代効果を受けて粘性がある地盤材料の変形強度特性のモデル化, 第37回地盤工学研究発表会, 2002.
- 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.

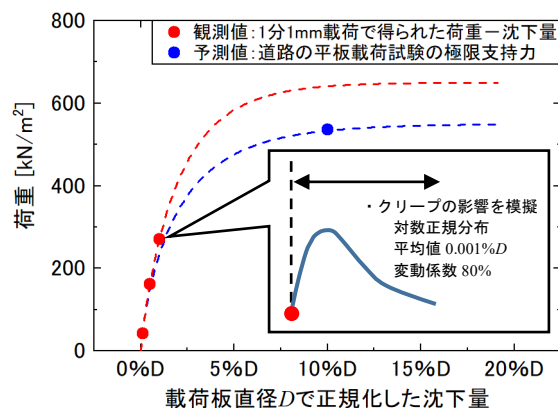


図5 ベイズ推定の観測値と予測値

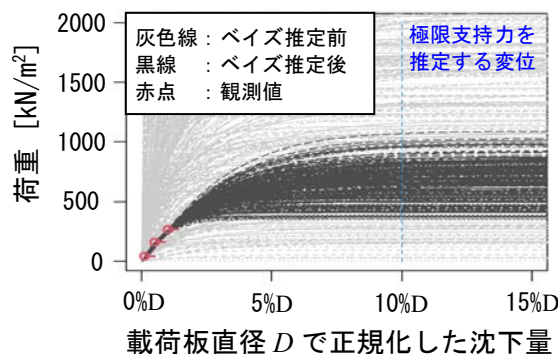


図6 ベイズ推定結果

表2 極限支持力の推定値と実測値

推定値 $\mu - \sigma$ (kN/m ²)	531.8
Case1 の実測値 (kN/m ²)	536.3
推定値と実測値の比	0.99