

洗掘被害を受けた直接基礎の残存支持力のベイズ推定法の提案

鉄道総合技術研究所 正○西岡 英俊, 正 佐名川 太亮, 正 黒木 悠輔
新潟大学 正 大竹 雄

1. はじめに

鉄道分野では戦前に建設された旧式河川橋梁が現在でも数多く供用されている。それらの基礎は比較的根入れが浅い直接基礎が多く、洗掘被害を受けて大きな残留変位（沈下・傾斜）が生じる場合があるが、残留変位を生じた直接基礎であっても必要な支持力が残っていれば、これを再供用して早期に応急復旧（運行再開）することが可能となる。そこで本稿では、被災後の観測情報を用いてベイズ更新の考え方により残存支持力（被災後の変位増分が基礎幅の 10% 変位に至る時の極限支持力）を推定する手法を提案し、別途実施された縮尺約 1/30（換算基礎幅 $B=100\text{mm}$ ）の模型実験結果（図 1）¹⁾ に対して提案手法を適用した結果を示す。なお、当該模型実験は模型基礎に実際に流水により洗掘を生じさせて残留変位を発生させた後に鉛直載荷実験を行ったものであり、実験の詳細は文献 1) を参照されたい。

2. 被災後の直接基礎の荷重変位関係のモデル化

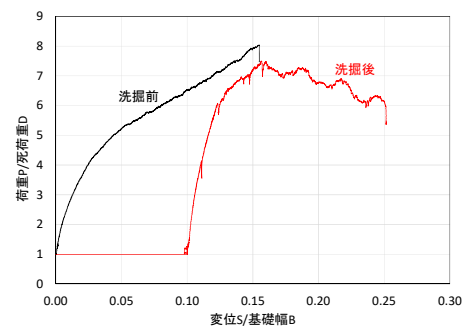
被災後に得られる観測情報は、まずは死荷重の大きさとそれに対する残留変位であり、その後列車走行試験等を行うことで、荷重増分とそれに対する変位増分の観測情報が追加される。これらの弾性域の観測情報から残存支持力を推定（外挿）するためには、何らかの連続関数で荷重変位関係全体をモデル化する必要がある。本稿ではパラメータの工学的な意味が明確なワイブル曲線を用いることとし、荷重 P （死荷重 D で正規化）と変位 S （基礎幅 B で正規化）の関係を式 (1) によりモデル化した。

$$P/D = P_u/D \left\{ 1 - \exp \left(- \left(\frac{S/B - S_0/B}{S_s/B} \right)^m \right) \right\} \quad \dots \dots \dots (1)$$

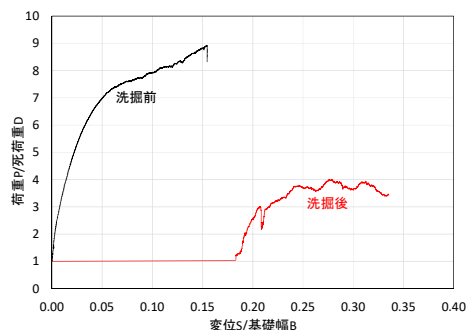
ここで、 P_u ：最大荷重、 S_s ：基準変位、 m ：変位指数、 S_0 ：初期変位（洗掘による吸出し分）である。なお、直接基礎らしい荷重変位関係となる条件として、平板載荷試験や実物大基礎の沈下計測事例に対するフィッティング結果から、変位指数 m を 0.75 ～ 1.25 程度、基準変位 S_s を基礎幅 B の 2 ～ 10% 程度 ($m=1.0$ の場合) の範囲に限定した。

3. ベイズ推定の基本的な考え方

ベイズ推定は、事前確率分布に対して観測情報が得られる確率（＝尤度関数）を乗じるベイズ更新により、観測情報が得られた後の事後確率分布を推定するものであり、不確実性が高かった状態から観測情報が得られることによって確実性が高まった状態になることを確率論的に表現することができる。本提案手法では、荷重変位関係自体の不確実性をワイブル曲線の各パラメータ (P_u , S_s , m , S_0) にそれぞれ確率分布を与えることで表現する。これに対し



(a) 残存支持力が大きい場合



(b) 残存支持力が小さい場合

図 1 模型基礎の鉛直載荷実験の結果
(洗掘発生前後での荷重変位関係)

表 1 被災直後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	平均 1.0, 変動係数 25% の正規分布
基準変位 S_s	$S_s/B = \alpha \times B \times m^{-4}$ α : 0.02 ～ 0.10 の一様分布
初期変位 S_0	0 から残留変位量の観測値までの一様分布
最大荷重 P_u	平均値＝被災前分布の平均値×被災による低減率, 変動係数＝被災前分布の変動係数×被災による増加率の対数正規分布

キーワード 直接基礎, 支持力, ベイズ推定, 洗掘

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 TEL042-573-7261

表2 模型実験に対するベイズ更新(粒子フィルタ)の計算条件

項目	残存支持力が大きい場合(図1(a))	残存支持力が小さい場合(図1(b))
最大荷重 P_0 の事前確率分布	平均値: 死荷重 D の 4.0 倍, 変動係数: 50% の対数正規分布	
死荷重に対する残留変位の観測値 ⇒ 初期変位 S_0 の事前確率分布の上限値 ⇒ 1 回目の尤度関数の観測値分	10mm=0.1B (実物換算で 300mm)	18mm=0.18B (実物換算で 540mm)
活荷重 (=1.5D) 時の残留変位の観測値 ⇒ 2 回目の尤度関数の観測値分	0.5mm=0.005B (実物換算で 15mm)	2.0mm=0.020B (実物換算で 60mm)
尤度関数の観測値に加算する不確実性	平均値: 0.5mm=0.005B (実物換算で 15mm), 変動係数: 50% の対数正規分布	

て被災後の観測情報(荷重と変位の組合せ)に定めた尤度関数を設定し, ベイズ更新により各パラメータおよびそれから求まる残存支持力の事後確率分布を推定する。なお, ベイズ更新の具体的な計算としては粒子フィルタを用いた²⁾。

具体的には, 被災直後の事前確率分布を表1のように仮定した上で, 被災後の死荷重に対する残留変位の観測値を観測情報とした1回目のベイズ更新を行い, その後に列車走行試験等の追加観測情報(荷重増分および変位増分)を反映した2回目のベイズ更新を行う。その際の尤度関数は, 荷重増分を確定値とした上でそれに対する変位増分を観測値(確定値)に観測誤差や再供用後の累積変形等の不確実性を加算した確率分布として設定する。

4. 模型実験結果への適用

洗掘状況が異なる2ケースの模型実験結果(図1)に対して本提案手法を適用し, 死荷重作用時

(被災直後を想定)と活荷重作用時(試験列車走行時を想定)の各観測情報を用いた2回のベイズ更新を行い, 残存支持力の事後確率分布を求めた。なお, 模型実験であることを踏まえて表2の条件を仮定した。

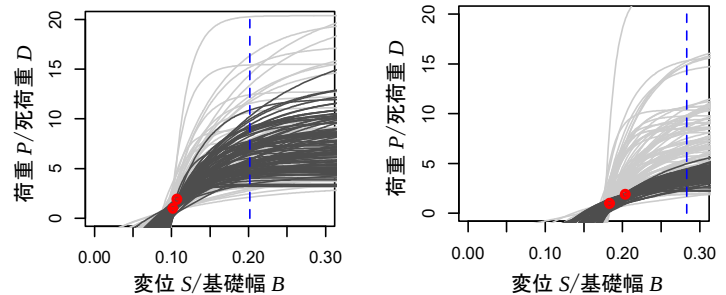
活荷重作用時を観測情報とする2回目のベイズ更新前後での荷重変位関係群の推移を図2に示す。観測情報が追加されることで, 荷重変位関係が絞り込まれる様子がわかる。また, 2回のベイズ更新による残存支持力の確率密度分布の推移を図3に示す。2回目の観測情報(活荷重に対する残留変位の観測値)を反映したベイズ更新を行うことで, 実験結果を概ね安全側に評価できる推定結果が得られていることがわかる。

5. おわりに

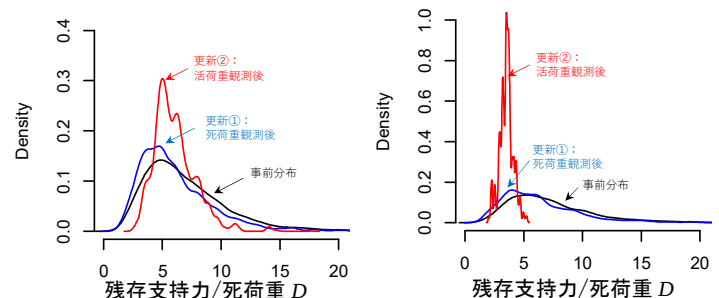
本稿では, 洗掘で被災した直接基礎の荷重変位関係をワイブル曲線で近似し, そのパラメータに確率分布を与えた上で観測情報を用いたベイズ更新を行うことで, 残存支持力を確率分布として推定する手法を提案した。これにより従来の弾性域での剛性と塑性域の残存支持力との定性的な関係を, 確率分布という定量的な指標として表現できることが確認できた。ただし, 被災後の事前確率分布の設定が最終的に得られる事後確率分布の絶対的な値に影響を及ぼすと考えられるため, 今後はより実務的な各種パラメータの設定方法のほか, 残存支持力の確率分布に対して実際に再供用可否を判断する方法の開発を進めていく予定である。なお, 本稿の図1の模型実験結果¹⁾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。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 黒木悠輔, 佐藤武斗, 西岡英俊, 佐名川太亮: 洗掘を模擬した直接基礎橋脚模型の載荷試験, 土木学会年次学術講演会, 2018(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, 2017.11



(a) 残存支持力が大きい場合 (b) 残存支持力が小さい場合
図2 活荷重作用時沈下増分によるベイズ更新(2回目)の結果
(灰色: ベイズ更新前, 黒: ベイズ更新後)



(a) 残存支持力が大きい場合 (b) 残存支持力が小さい場合
図3 ベイズ更新による残存支持力の推定結果(確率密度分布)