

洗掘被害を受けた直接基礎の活荷重作用時支持力破壊確率のベイズ推定 Reliability Assessment for Bearing Capacity of Shallow Foundation after Scouring under Live Load by Bayesian Inference

佐々木 優奈 (中央大・理工) 西岡 英俊 (中央大・理工)
笠原 康平 (鉄道総合技術研究所) 大竹 雄 (東北大・工)
Yuna SASAKI, Chuo University
Hidetoshi NISHIOKA, Chuo University
Kohei KASAHARA, Railway Technical Research Institute
Yu OTAKE, Tohoku University
E-mail: a17.g7kf@g.chuo-u.ac.jp

In recent years, along with heavy rainfall, damage to bridge foundations caused by scouring has increased. Even if residual displacement happens in the foundation, early emergency restoration is possible if residual bearing capacity can be secured. A previous study has proposed a Bayesian estimation method for the residual bearing capacity of spread foundations after scouring. This method enables us to predict load-settlement curves with small load levels. In this paper, we used the method to estimate the probability of failure during applied live load and investigate the difference in the probability of failure due to the size of the observation error.

1. はじめに

近年の豪雨災害の増加に伴い、特に戦前に建設された旧式河川橋脚の直接基礎の洗掘被害が増加している。洗掘被害が生じた場合には、一般には架替え等で復旧までに数ヵ月から年単位の長期間を要することが多いが、被災基礎を再供用することで最小限の補修により早期に応急復旧（運転開始）した事例（例えば、平成24年九州北部豪雨における久大本線隅上川橋梁¹⁾）もある。レジリエンス向上の観点からは、このような早期応急復旧技術の一般化は重要な取り組みであり、特にソフトな観点では、被災後に残存支持力の大きさを迅速かつ必要十分な信頼性で評価して再供用の可否を判断する技術が必要とされる。

残存支持力の評価の基本的な考え方は、再供用時の活荷重相当の荷重を実際に載荷して不具合が無いことを確認するという考え方であり、上述の隅上川橋梁の事例でも載荷試験が実施された。また、西岡・大竹²⁾は、隅上川橋梁の事例を対象に、実際に経験した荷重までは確実に抵抗力を有するという情報をベイズ更新によって信頼性評価に反映するSurvival Analysisという手法により被災後の残存支持力の信頼性を定量的に評価した。ただし、これらの方法では載荷した荷重レベルを大きく上回る範囲まで精度よく外挿することは困難であり、早期復旧の観点からはより小規模な載荷試験によって活荷重作用時（あるいはそれ以上の荷重レベル）での信頼性を外挿して評価する技術が求められる。

このような背景から、西岡ら³⁾は被災後の直接基礎の残存支持力を評価するため、徐々に非線形化する滑らかな荷重変位関係をワイブル曲線によりモデル化した上で、単なる荷重ではなく荷重変位関係そのものをベイズ推定する手法を提案している。この手法は、荷重レベルが小さい範囲での荷重変位関係の観測情報から、未経験の荷重レベルまでの挙動を予測するとともに、その予測精度を確率分布として定量的に示す方法を提案するものである。本研究では、この手法のモデル化の精度向上を図ると共に、より具体的に活荷重未満の観測情報から活荷重作用時の支持力の破壊確率を算出した。また、観測誤差の違いが破壊確率の算出結果に及ぼす影響について検討した。

2. 荷重—変位曲線のモデル化とベイズ推定の考え方

被災した直接基礎の荷重 P （死荷重 D で正規化）と変位 S （基礎幅 B で正規化）の関係は、通常のワイブル曲線の原点をシフトした式(1)でモデル化する。

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

ここで、 P_u ：最大荷重、 S_s ：基準変位（降伏荷重 $P_y=0.63P_u$ での変位）、 m ：変位指数、 S_0 ：洗掘によって生じる初期変位である。

荷重変位関係自体の不確実性は、ワイブル曲線の各パラメータ(P_u , S_s , m , S_0)にそれぞれ事前確率分布を与えることで表現する。なお、各パラメータのうち変位指数 m は荷重変位関係の形状を決定するパラメータであり、本研究では実際の直接基礎橋脚の沈下計測事例や平板載荷試験結果に対するフィッティング結果から直接基礎らしい荷重変位関係がモデル化できる範囲として平均0.8、変動係数50%の対数正規分布とした。また、基準変位 S_s は、実際の直接基礎橋脚の沈下計測事例に対して変位指数を固定してフィッティングした結果から、 $S_s = a \times m^4 \times B$ の関係式で変位指数 m との相関を考慮するものとし、この係数 a に平均0.01、変動係数100%の対数正規分布の確率分布を与えることとした。初期変位は0から被災直後の観測変位（観測誤差含む）までの一様分布とし、正規化最大荷重 P_u/D は被災によって支持力が大幅に低下した可能性も考慮するため、平均1.5（概ね死荷重 D だけで降伏荷重 P_y に達する状態に相当）、変動係数100%の対数正規分布とした。

このように設定した事前確率分布に対して、被災直後の死荷重作用時($P/D=1.0$)および載荷試験時の変位の観測情報（観測値および観測誤差）を考慮した尤度関数を設定し、各パラメータおよびそれから求める荷重変位関係の事後確率分布を粒子フィルタによるベイズ更新により段階的に推定する。なお、既報³⁾では、観測値・観測誤差をそれぞれ絶対変位として与えていたが、本研究では各測定段階（ステップ）での変位増分として個別に与えるように改良した。

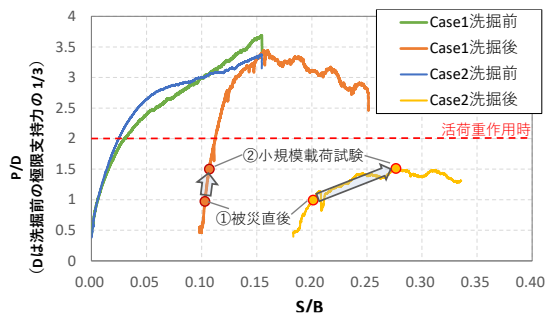


Fig. 1 Load-Settlement curves (model experiment results)

Table 1 Observed displacement in tests

	測定段階(ステップ)	載荷荷重	観測変位
Case1	ステップ①:被災直後	1.0D	0.103B
	ステップ②:小規模載荷試験	1.0D+0.5L=1.5D	0.107B
Case2	ステップ①:被災直後	1.0D	0.202B
	ステップ②:小規模載荷試験	1.0D+0.5L=1.5D	0.275B

D: 死荷重, L: 活荷重 (本研究では $L=D$ とする), B: 基礎幅

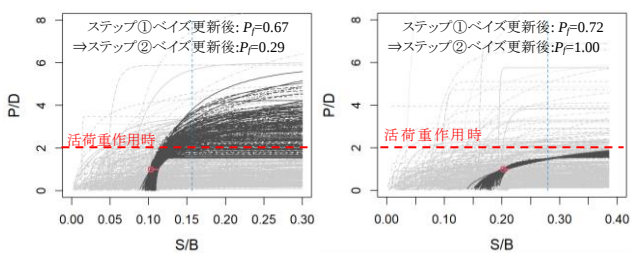
3. 模型実験結果への提案手法の適用

ここでは直接基礎模型を対象に洗堀被害の有無による荷重変位関係の違いを地盤条件が異なる2ケースで検討した。模型載荷実験結果⁴⁾に対して提案手法を適用する。模型実験結果のうち、正規化した荷重変位関係を Fig. 1 に示す。ここで正規化荷重 P/D の算出に用いる死荷重 D は各地盤条件の洗掘前の極限支持力の $1/3$ とした (すなわち常時で支持力安全率 3.0 を確保している状態を模擬した)。実験結果は、Case1 は洗掘後も高い残存支持力を発揮しているが、Case2 では洗掘後の残存支持力が小さくなっている。

本研究では、これら2ケースの洗掘後の荷重変位関係に対して、ステップ①「被災直後の死荷重作用時」からステップ②「活荷重の $1/2$ までの小規模な載荷試験時」へと段階的に変位 (沈下量) の観測結果が得られたと想定して仮想的にベイズ推定を行った。そして得られた荷重変位関係から極限支持力を推定し、それが活荷重を下回る破壊確率 P_f を求めた。なお、隅上川橋梁では活荷重と死荷重は同程度であったことから、本研究では活荷重の大きさを死荷重と同一とした。また、極限支持力の推定値は、最大荷重 P_u ではなく、実験での被災後の荷重変位関係が最大値を示す変位 (Case1 : $0.157B$, Case2 : $0.279B$) での荷重とした。

各ステップの変位の具体的な観測値 (すなわち実験値) を絶対変位表示で Table 1 に示す。また、各ステップでの観測誤差は 0 からある上限値までの一様分布とし、これを観測値の相対変位に加算することで不確実性を考慮した。

各ケースの2ステップ分の観測情報 (観測誤差の分布上限はいずれも $0.01B$) を用いたベイズ推定で得られた荷重変位関係群を Fig. 2 に示す。Fig. 2 中の灰色は事前分布であり、多様な荷重変位関係の候補の中から、観測情報を満足する荷重変位関係に絞り込まれていることがわかる。また、Fig. 2 には活荷重作用時 ($P/D=2.0$) の破壊確率 P_f の推移も示しているが、ステップ①の被災直後 ($P/D=1.0$) の観測情報のみでは両ケースとも破壊確率は 0.5 を上回るものの 1.0 には達しておらず、この段階では再供用の可否は判断しきれない。ここからステップ② ($P/D=1.5$ の小規模載荷試験) の観測情報でベイズ更新を行うと、残存支持力が大きい Case1 では破壊確率 P_f が小さくなっており、再供用できる可能性が高まっていることが評価できていることがわかる。一方、残存支持力が小さい Case2 では破壊確率 P_f が 1.0 となっており、確実に再供用が不可能であることが判定できている。



(a)Case1(残存支持力・大)

(b)Case2(残存支持力・小)

Fig. 2 Load-Settlement curves (Bayesian updating results)

(灰色: 事前分布, 黒: ステップ②ベイズ更新後)

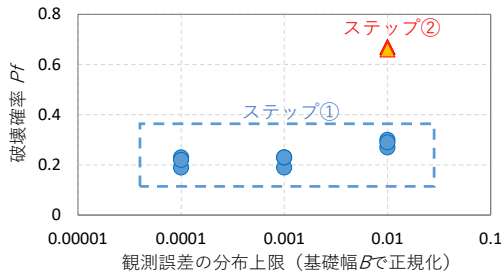


Fig. 3 Relationship between magnitude of observation error and failure probability

4. 観測誤差の大きさによる破壊確率 P_f の違い

実際の応急復旧の際には、被災直後の残留変位の計測は水準測量等を用いるのが一般的であり、数 mm オーダーから沈下量自体が大きい場合には数 cm オーダーの観測誤差が生じる。一方、載荷試験での変位増分の計測は、高精度な計測機器を用いれば計測誤差を 0.1mm オーダーまで減らすことも可能である。そこで、ここでは Case1 を対象に載荷試験時の計測精度を高めることによる破壊確率 P_f の違いについて検討した。具体的には、ステップ① (被災直後) の観測誤差の分布上限は $0.01B$ に固定し、ステップ② (小規模載荷試験時) の観測誤差の分布上限を、 $0.01B$, $0.001B$ と $0.0001B$ と変化させた。また、粒子フィルタの結果のばらつきの影響を確認するため、各ケースで3回ずつ実施した。

得られた観測誤差と破壊確率 P_f の関係を Fig. 3 に示す。ステップ②の観測誤差の分布上限を $0.01B$ から $0.001B$ に小さくすると P_f が約 7% 下がり、評価の信頼性が高まるが、もう1オーダー小さくする効果は小さいことがわかる。

5. おわりに

本研究では、直接基礎の洗掘後の残存支持力をベイズ推定する手法により、活荷重未滿の観測情報を用いてベイズ更新を行うことで、荷重変位関係が絞り込まれることを確認した。また、観測誤差の大小による活荷重作用時の破壊確率の違いを検証し、活荷重作用後の変位増分の観測誤差を小さくすることで推定される破壊確率が低下することを確認した。

参考文献

- 西岡英俊, 篠田昌弘, 角雄一郎, 山手宏幸: 洗堀により沈下した直接基礎橋脚に対する鉛直載荷試験および列車走行試験, 第48回地盤工学会研究発表会, pp.203-204, 2013.
- 西岡英俊, 大竹雄: 洗堀被害を受けた直接基礎橋脚の Survival Analysis による信頼性評価, 地盤工学会誌, Vol.69, No.7, pp.35-39, 2021.
- 西岡英俊, 佐名川太亮, 黒木悠輔, 大竹雄: 洗堀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, 土木学会第73回年次学術講演会, pp.887-888, 2018.
- 黒木悠輔, 佐藤武斗, 西岡英俊, 佐名川太亮: 洗堀を模擬した直接基礎橋脚模型の載荷試験, 土木学会第73回年次学術講演会, pp.885-886, 2018.