

簡易載荷試験に基づく既設杭の性能評価へ向けた基礎的研究

新潟大学 学生会員 ○大木 拓馬

新潟大学 正会員 大竹 雄

鉄道総合技術研究所 正会員 西岡 英俊

鉄道総合技術研究所 正会員 佐名川 太亮

1. 目的

著者らは、小さな変位レベルの簡易載荷試験から、既設構造物杭の性能を評価する方法の開発を進めている。本研究では、杭基礎の鉛直極限支持力の推定問題を対象とした研究成果を報告する。

2. 研究に用いたデータと統計分析

全国で実施された鉛直載荷試験データを収集し、(1)荷重の除荷過程が計測されている、(2)荷重変位関係に明瞭な非線形効果が確認できている、試験結果のみを用いることとした。その結果、打込み杭 10 現場、杭径 0.8~1.6m、杭長 25~72m、場所打ち杭 12 現場、杭径 0.8~1.5m、杭長 10~48m の範囲のデータが得られた。

全ての載荷試験データについて、Weibull モデルと R-O モデルの 2 種類の骨格モデルによるフィッティングを行い、モデルパラメータと各種諸元（杭径 D 、根入れ長 $L1$ ）、簡易載荷試験から得られる初期勾配 K_0 の相関性を分析した。

Weibull モデル : $P = P_{max}(1 - \exp(-(\delta/\delta_s)^m))$ (1)

R-O モデル : $\delta = P/K_0(1 + \alpha|P|^\beta)$ (2)

ここで、 δ は杭頭変位、 P は杭頭荷重、 K_0 は初期勾配、 α 、 β は R-O モデルのパラメータ、 P_{max} 、 δ_s 、 m は Weibull モデルのモデルパラメータで、荷重の上限値（極限支持力）、降伏変位、形状係数を意味する。

なお、既往の載荷試験において初期勾配 K_0 の計測は行われていないので、載荷試験の除荷勾配に着目し、 $\delta=0.01D$ のときの除荷勾配 K_{01} を規準として、それを 3 倍したものを K_0 と見立てている。

図-1 は、打込み杭を例に、フィッティング作業から得られたモデルパラメータと杭諸元（杭径 D 、根入れ長 $L1$ ）、 K_0 との対散布図である。全てのパラメータの散布図と相関係数、ヒストグラムが整理されている。

さらに、モデルパラメータを目的変数とした重回帰分析を行い、 K_0 観測することの効果を確認した。打込み杭における重回帰分析の結果は表-1 の通りであり、モデルパラメータ毎に杭諸元（ $D+L1$ ）、初期勾配 K_0 の見合わせで 3 種類の重回帰分析を行っている。残差の標準偏差、変動係数の変化をみると説明変数の説明力の強さを確認できる。

この結果を模式的に表したのが図-2 である。Weibull モデルのモデルパラメータ間の相関性は小さく独立であり、 P_{max} 、 m の推定では、杭径 D や根入れ長 $L1$ の説明力が強く、 K_0 が現場で計測されたとしても、推定精度は向上しないことが分かった。ただし、 δ_s については、 K_0 の説明力が高い結果が得られた。

R-O モデルでは、荷重が頭打ちする大きな変位レベルまでを適切にモデル化することはできないため、Weibull モデルで同定された降伏変位 δ_s 以下のデータに着目して回帰分析を行った。その結果、Weibull モデルと同様に、杭諸元（ $D+L1$ ）の説明力が強いものの、モデルパラメータ α 、 β の推定に K_0 が大きく寄与することを確認した。以上より、降伏変位レベル以下の挙動（モデルパラメータ）について、 K_0 の説明力の高さを確認することができた。

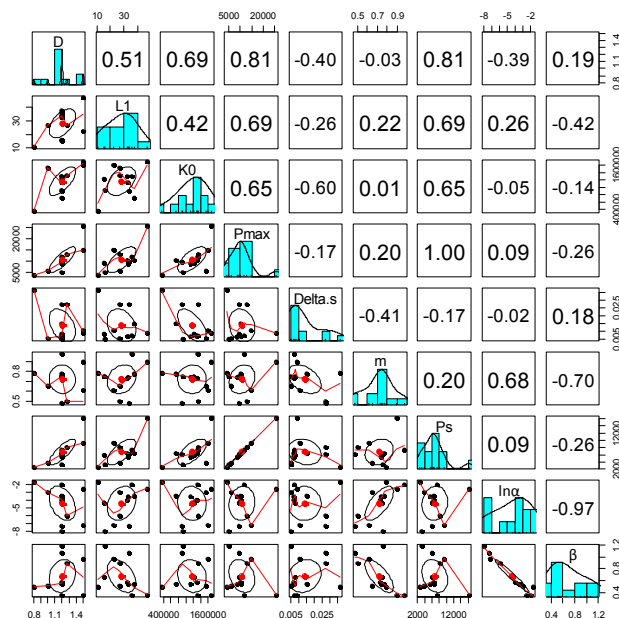


図-1 統計解析から得られたモデルパラメータと杭諸元、初期勾配 K_0 の相関関係（打込み鋼管杭）

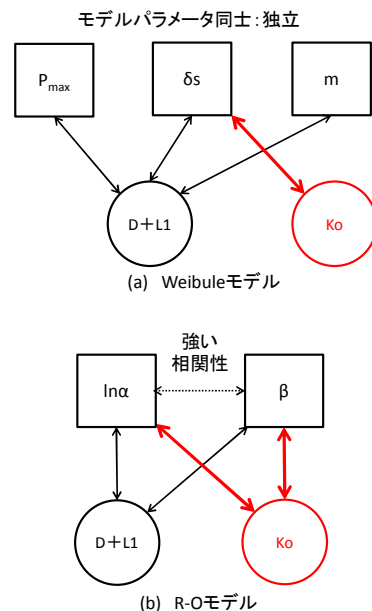


図-2 モデルパラメータと杭諸元、初期勾配 K_0 の相関（説明力）の関係

3. 信頼性更新モデルの提案と試算

先のデータ整理に基づき、下記に示す2種類の既設杭の鉛直支持力のベイズ更新方法を提案する。ベイズ更新の方法、確率分布（不確実性の大きさ）の詳細は紙面の都合上割愛する。

1) Survival Analysis¹⁾

小規模な静的載荷試験を想定し、載荷できた荷重レベルを保証荷重として、極限支持力 P_{max} の確率分布の足切りベイズ更新をする方法。

2) Direct Estimation Analysis

K_0 から δ_s および R-O モデルパラメータ α , β を推定し、降伏強度 P_s の確率分布を推定する。式(1)より、 $P_{max}=1.58P_s$ の関係があることから、R-O モデルパラメータの推定から P_{max} の確率分布を得ることができる。この確率分布を用いて、 P_{max} の事前確率をベイズ更新する方法である（図-3）。

図-4(a)は、1)Survival Analysis による P_{max} の更新結果を表している。観測された荷重レベルに応じて、 P_{max} の事前分布が足切り更新される。観測前の信頼性指標 $\beta=2.1$ が観測により $\beta=3.1$ となり信頼性が向上する結果となる。

図-4(b)は、2)Direct Estimation Analysis による P_{max} の更新結果を表している。R-O モデルは降伏変位レベルまでは推定精度も高い。 K_0 から降伏変位 δ_s に至る荷重 P_s の確率分布を精度良く推定することができるため、 P_{max} も効果的に推定更新できている様子が読み取れる。この場合、信頼性指標 $\beta=2.1$ から観測により $\beta=4.1$ となり信頼性が向上する結果となる。

4. 結論

本研究では、鉛直載荷試験の実データを用いて、杭基礎の荷重変位関係を統計的にモデル化し、そのモデルパラメータと杭諸元、初期勾配 K_0 との相関分析、重回帰分析から、既設杭の性能評価へ向けての基礎的分析を行った。その上で、統計的性質を考慮した上で、2つのベイズ更新モデルを提案し、簡易な例題を通して、その有効性を示した。既設構造物の対策優先度の設定、洪水時の橋脚基礎の洗掘変形後の残留耐力の評価等、管理実務上有効な基礎資料を提供できる可能性を確認した。

参考文献：1)Timo SCHWECKENDIEK: On reducing piping uncertainties a Bayesian decision approach TU Delft, 2014.

2)佐名川太亮，西岡英俊：斜杭ラーメン高架橋を対象とした地盤変位作用時の動的挙動に関する実験的検討，土木学会論文誌 C(地圏工学)，Vol.71，No.3，pp.163-176，2015

表-1 重回帰分析結果（打込み鋼管杭,Weibull）

Parameter	Intercept	coefficient			Residual Standard Error	COV	AIC
		杭径D	掘入れ長L1	初期剛性 K_0			
P_{max}	-1.68×10^4	1.65×10^4	1.90×10^2	1.91×10^{-3}	3170	0.252	232.7
	-1.78×10^4	1.90×10^4	196.8	—	3047	0.257	231.1
	-4.09×10^2	—	—	9.51×10^{-3}	4510	0.401	239.8
δ_s	3.22×10^{-2}	1.25×10^{-3}	-2.25×10^{-5}	-1.64×10^{-8}	0.010	0.609	-71.57
	4.09×10^{-2}	-2.06×10^{-2}	-7.71×10^{-5}	—	0.011	0.695	-70.43
	-3.29×10^{-2}	—	—	-1.63×10^{-8}	0.009	0.610	-75.56
m	0.780	-0.155	4.24×10^{-3}	6.29×10^{-9}	0.162	0.192	-4.475
	0.777	-0.146	0.004	—	0.153	0.192	-6.473
	0.717	—	—	3.45×10^{-9}	0.151	0.199	-7.551
log α	3.533	-11.21	8.44×10^{-2}	2.89×10^{-6}	1.942	1.782	88.84
	1.704	-6.381	0.089	—	2.318	2.192	95.19
	-4.653	—	—	7.403×10^{-7}	2.430	2.366	96.17
β	-0.148	1.323	-1.206×10^{-2}	-3.812×10^{-7}	0.253	0.394	7.297
	0.093	0.686	-0.013	—	0.303	0.487	13.77
	0.808	—	—	-1.585×10^{-7}	0.302	0.497	12.71

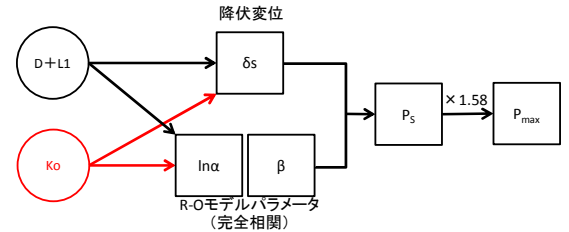
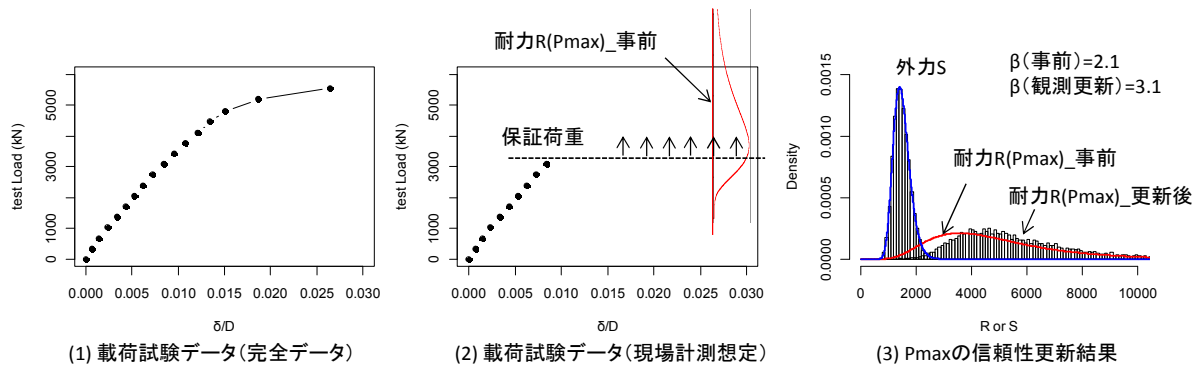
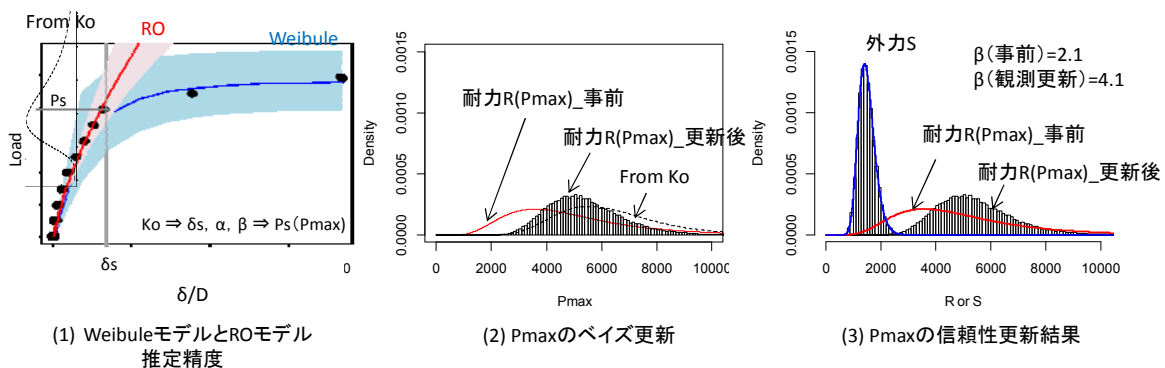


図-3 Direct Estimation Analysisの計算フロー



(a) Survival Analysis



(b) Direct Estimation Method

図-4 P_{max} の信頼性更新結果