

複数本のボーリングデータと載荷試験結果から設計用限界杭支持力を算定する方法について

(その1 算定手法)

杭 鉛直支持力 地盤パラメータ
限界状態設計法 載荷試験 ベイズの方法

正会員 ○永田 誠^{*1} 同 小林 勝巳^{*2}
同 本城 勇介^{*3} 同 椿原 康則^{*4}

1. はじめに

限界状態設計法において、地盤パラメータを用いた基礎の設計を行う場合に、ボーリングデータの数、敷地内の地盤パラメータの変動の大きさ、支持力式のモデル化誤差を耐力係数に反映する方法について、既報¹⁾により報告している。既報では、複数本のボーリングデータと支持力算定式を用いて、敷地内における杭の支持力の平均値を推定し、その不確定性を考慮して、設計用の限界支持力を考察した。本報では、既報におけるモデル化誤差の考慮方法を修正し、更にボーリングだけではなく、載荷試験を行った場合の設計用限界支持力についての考察を行う。

2. ボーリングデータから推定する設計用限界支持力

(1) 設計用限界支持力

ここでは、敷地内の地盤パラメータ(母集団)が正規分布をしており、標準偏差 σ_s が分かっている場合について検討する。

この場合にボーリングの数を n_B とすると、ボーリングデータの標準偏差は $\sigma_s/\sqrt{n_B}$ となる。ボーリングデータより支持力を推定する仮定にはモデル化誤差(データ数に依存しない)が含まれるため、ボーリングデータから算定する支持力の分布は、算定した支持力の平均値を \bar{R} とすると、次のように考えられる。

$$N(\bar{R}, \sqrt{\sigma_s^2/n_B + \sigma_M^2}) \quad (1)$$

ここで σ_M はモデル化誤差の標準偏差であり、 $\sigma_M = \lambda \sigma_s$ とおくと、(1)式は次のように表される。

$$N(\bar{R}, \sigma_s \sqrt{1/n_B + \lambda^2}) \quad (2)$$

この分布に対して既報の方法を適用すると、杭の支持力の特性値(敷地内の支持力の平均値の $\alpha\%$ 信頼限界) R_k は、

$$\begin{aligned} R_k &= \bar{R} - k_\alpha \cdot \sigma_s \sqrt{1/n_B + \lambda^2} \\ &= \bar{R} (1 - k_\alpha \cdot \frac{\sigma_s}{\bar{R}} \sqrt{1/n_B + \lambda^2}) \\ &\approx \bar{R} (1 - k_\alpha \cdot V_{R1} \sqrt{1/n_B + \lambda^2}) \\ &= \eta_m \cdot \bar{R} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\eta_m = 1 - k_\alpha \cdot V_{R1} \sqrt{1/n_B + \lambda^2} \quad (4)$$

であり、耐力の変動係数は、

$$\begin{aligned} V_m &= \frac{\sigma_s}{\bar{R}} \sqrt{1/n_B + \lambda^2} \\ &= V_{R1} \sqrt{1/n_B + \lambda^2} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ただし、 V_{R1} は敷地内の地盤のばらつきに関する変動係数である。

(2) 荷重・耐力係数と全体安全率

AIJ-LSD指針によると、杭の支持力算定式のモデル化誤差に関する変動係数 V_{R2} は0.3程度である。また、敷地内の支持力の空間変動については、ばらつきが小さい地盤($V_{R1}=0.1$)と、ばらつきの大きい地盤($V_{R1}=0.3$)を検討する。

全体安全率FS(荷重効果に対する支持力の標本平均の比率)は、荷重係数(γ_D, γ_L)と耐力係数(ϕ_R)を考慮することで既報と同様の式で算出される。つまり、

$$FS = \left(\gamma_D \cdot \frac{1}{1 + L_k/D_k} + \gamma_L \cdot \frac{L_k/D_k}{1 + L_k/D_k} \right) \cdot \frac{1}{\eta_m \cdot \phi_R} \quad (6)$$

である。基準期間50年の β_T を2とした場合の、 $D+Le$ に対する終局限界状態について、ボーリング数 n_B による各係数の値と、FSの値を表1に、FSの算定結果を図1に示す。なお本報では、固定荷重と積載荷重の比 $L_k/D_k=0.2$ とした。

結果を見ると、ボーリングデータ数が十分に大きい場合には、地盤のばらつきの大小に係らず、安全率は概ね3.2程度になっている。しかし、ばらつきの大きな地盤ではボーリングデータ数に敏感で、データ数が少ない場合の安全率はかなり大きい値になってしまうことが分かった。

表1 全体安全率算出表

n_B	1	2	3	4	5	10
$V_{R1}=0.1$	η_m	0.59	0.60	0.61	0.61	0.61
	V_m	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30
	γ_D	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	γ_L	1.97	1.98	1.98	1.99	1.99
	ϕ_R	0.58	0.59	0.59	0.59	0.60
	FS	3.39	3.27	3.23	3.21	3.18
$V_{R1}=0.3$	η_m	0.46	0.53	0.56	0.57	0.60
	V_m	0.42	0.37	0.35	0.34	0.33
	γ_D	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	γ_L	1.82	1.90	1.92	1.94	1.97
	ϕ_R	0.41	0.50	0.53	0.55	0.58
	FS	6.03	4.35	3.91	3.71	3.59

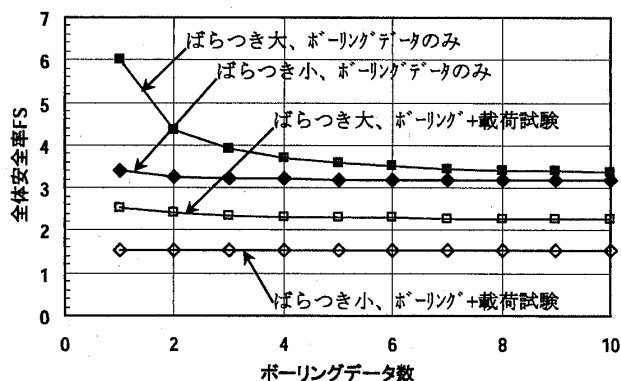


図1 全体安全率FS

3. 載荷試験を実施した場合の設計用限界支持力

(1) 設計用限界支持力

設計に際して、杭の支持力をボーリングデータだけではなく、更に載荷試験を行って評価することがある。このようなケースについて、ベイズの方法を適用することで載荷試験の効果を適切に評価することができると考えられる。ベイズの方法とは、パラメータに関する事前の確率分布に、観測や実験の結果（追加情報）を反映させて、確率分布を逐次修正していく方法である。一般に、正規分布の場合にベイズの方法を適用した事後統計は、

$$\text{事後平均} : \mu_{\mu}'' = \frac{\mu_{\mu}'(\sigma^2/n) + \bar{x}\sigma_{\mu}'^2}{\sigma^2/n + (\sigma_{\mu}')^2} \quad (7)$$

$$\text{事後標準偏差} : \sigma_{\mu}'' = \sqrt{\frac{(\sigma_{\mu}')^2(\sigma^2/n)}{(\sigma_{\mu}')^2 + \sigma^2/n}} \quad (8)$$

となる²⁾ことが知られている。

本報では、事前分布をボーリングデータから推定した杭の支持力とし、載荷試験を追加情報として、載荷試験結果を反映した事後統計量を求めることで、載荷試験を実施した場合の設計用限界支持力を検討する。

事前分布は式(2)で表される。載荷試験結果には、モデル化誤差はないものと考え、載荷試験結果の平均値を \bar{P} 、載荷試験数を n_t とすると、追加情報の分布は、

$$N(\bar{P}, \sqrt{\sigma_s^2/n_t}) \quad (9)$$

と表される。従って、ベイズの方法を適用した事後分布

$N(\bar{R}'', \sigma'')$ は次のようになる。

事後平均値は、

$$\begin{aligned} \bar{R}'' &= \frac{\bar{R}\sigma_s^2/n_t + \bar{P}\sigma_s^2(1/n_B + \lambda^2)}{\sigma_s^2/n_t + \sigma_s^2(1/n_B + \lambda^2)} \\ &= \frac{\bar{R}(1/n_t) + \bar{P}(1/n_B + \lambda^2)}{1/n_t + 1/n_B + \lambda^2} \end{aligned}$$

であり、載荷試験の結果が $\bar{P} = a \cdot \bar{R}$ になったとすると、

(a は載荷試験値が推定値の何倍になったかを示す値)

$$\bar{R}'' = \frac{1/n_t + a(1/n_B + \lambda^2)}{1/n_t + 1/n_B + \lambda^2} \bar{R} \quad (10)$$

である。また事後標準偏差は次のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma'' &= \sqrt{\frac{\sigma_s^2(1/n_B + \lambda^2)(\sigma_s^2/n_t)}{\sigma_s^2(1/n_B + \lambda^2) + \sigma_s^2/n_t}} \\ &= \sigma_s \sqrt{\frac{(1/n_B + \lambda^2)(1/n_t)}{1/n_B + 1/n_t + \lambda^2}} \quad (11) \end{aligned}$$

以上より事後分布は、 $N(\zeta \bar{R}, \xi \sigma_s)$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし、} \zeta &= \frac{1/n_t + a(1/n_B + \lambda^2)}{1/n_t + 1/n_B + \lambda^2} \\ \xi &= \sqrt{\frac{(1/n_B + \lambda^2)(1/n_t)}{1/n_B + 1/n_t + \lambda^2}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

と表すことができる。これより、

$$\left. \begin{aligned} R_k &= \zeta \bar{R} - k_{\alpha} \xi \sigma_s = \bar{R}(\zeta - k_{\alpha} \xi \sigma_s / \bar{R}) \\ &\approx \bar{R}(\zeta - k_{\alpha} \xi V_{R1}) = \eta_m'' \bar{R} \\ \eta_m'' &= \zeta - k_{\alpha} \xi V_{R1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

であり、耐力の変動係数は次のようになる。

$$V_m'' = \frac{\xi \sigma_s}{\zeta \bar{R}} = \frac{\xi}{\zeta} V_{R1} \quad (14)$$

(2) 荷重・耐力係数と全体安全率

上記2. で求めた全体安全率を、載荷試験結果(本例では $n_t=1, a=1.0$ とする)と事後分布によって修正すると、図1に示すような結果となり、載荷試験の効果によって、全体安全率を5割〜7割程度に小さくできることが分かった。

4. おわりに

敷地内の支持力のばらつきを考慮するために、本報では地盤パラメータの σ が既知の場合についての考察を行った。地盤パラメータは未知の場合もあり、今後この場合についても考察を行いたい。

[参考文献]

- 1) 小林勝巳, 「複数本のボーリングデータから設計用限界支持力を算定する方法について」, 日本建築学会大会, 2005年9月
- 2) A.H.S. Ang and W.H. Tang, (伊藤学、亀田弘行訳) 「土木建築のための確率・統計の基礎」、丸善

*1 新日本製鐵 *2 フジタ
*3 岐阜大学 *4 竹中工務店

*1 Nippon Steel Corporation *2 Fujita Corporation
*3 Gifu University *4 Takenaka Corporation