

限界状態設計法による鉛直力に対する杭の設計事例

杭 鉛直支持力 地盤パラメータ  
限界状態設計法 載荷試験

正会員 ○ 永田 誠\*1  
同 小林 勝巳\*2  
同 小椋 仁志\*3  
同 椿原 康則\*4

1. はじめに

本会の基礎構造の限界状態設計法小委員会（主査；小林勝巳）では、限界状態設計法を導入するための作業を行っている。本報告では、同小委員会載荷試験 WG（主査；小椋仁志）が実施した鉛直力に対する杭の設計事例を紹介する。なお、本設計事例は Evaluation of Eurocode7 の国際委員会 ERTC10 が作成した Design Example であり、各国の機関が Eurocode7 あるいは独自の限界状態設計基準に基づいて設計した結果を持ち合い、ワークショップで議論することを目的としている。載荷試験 WG では、本会編「建築物の限界状態設計指針(2002)」(以下 AIJ-LSD 指針) を用いて設計を行い、その結果をワークショップに提出した。

2. Example3 地盤パラメータから設計する場合

設計条件を図 1 に示す。

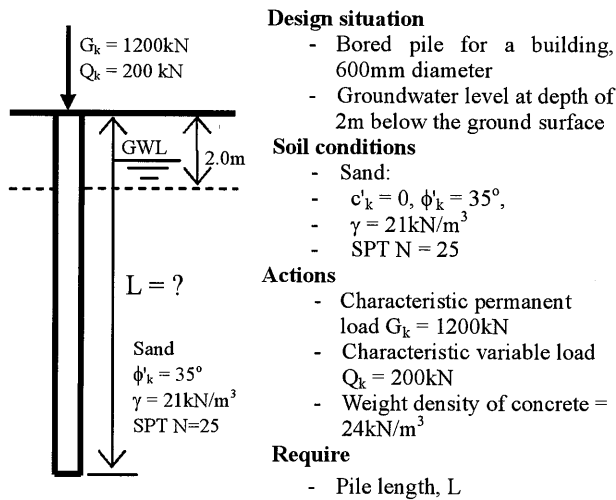


図 1 Example 3 の設計条件

設計用の地盤パラメータには、N 値を用いる。SPT N=25 という条件を、「杭周面地盤及び先端地盤の平均 N 値が 25 である」と解釈した。さらに、この平均 N 値は特性値  $X_k$  であり、敷地内のばらつきを考慮して推定した平均値を表していると解釈した。なお、AIJ-LSD 指針では、複数のサンプルデータから、敷地内のばらつきを考慮して特性値  $X_k$  を求める方法について (1) 式を推奨している。

$$X_k = \bar{X} - t_{\alpha, n-1} \cdot S / \sqrt{n} \quad (1)$$

ただし、n はサンプル数、 $X_k$  は特性値、 $\bar{X}$  は標本平均、 $S^2$  は標本分散、 $t_{\alpha, n-1}$  は t 分布の  $\alpha\%$  値である。

本問題に対して、要求性能を表 1 のように設定した。ただし、沈下の検討及び地震時の検討は省略した。

表 1 要求性能

ULS (終局)	G+Q	50 年 $\beta_T=3$	杭頭に作用する設計用鉛直力が、杭の設計極限支持力を超えない。
SLS (使用)	G+Q	1 年 $\beta_T=2$	(a) 杭頭に作用する設計用鉛直力が、杭の設計降伏支持力を超えない。 (b) 杭頭の沈下の計算値が、設計限界値を超えない。

(G は固定荷重、Q は積載荷重とする)

照査式を以下に示す。

$$F_d < R_d$$

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k \quad (2)$$

$$R_d = \phi_p \cdot q_p \cdot A_p + \phi_f \cdot f_s \cdot L \cdot \varphi$$

ただし、L は必要杭長、 $\varphi$  は周長、 $\gamma_G$ 、 $\gamma_Q$  は荷重係数、 $\phi_p$ 、 $\phi_f$  は耐力係数で、AIJ-LSD 指針より表 2 の値を採用する。これらの値は、埋込み杭のデータを用いて耐力の変動係数が概ね 0.3 であると仮定して求めている。

表 2 荷重係数と耐力係数

	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\phi_p$	$\phi_f$
ULS	1.0	2.4	0.5	0.9
SLS	1.0	0.95	0.5	0.9

設計条件における bored pile を埋込み杭と解釈して、 $q_p$  及び  $f_s$  に埋め込み杭の式を採用した。

$$\text{ULS ; } q_p=200N \quad f_s=2.5N \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\text{SLS ; } q_p=2/3 (200N) \quad f_s=2/3 (2.5N) \quad (\text{kN/m}^2)$$

以上を照査式(2)に代入する事により、必要杭長 L を算定すると 13m である。なお、このケースでは SLS の検討で杭長が決まっている。杭長を 13m として全体安全率を下式で求めると、全体安全率 FS は 2.5 となる。

$$FS = R_u / F$$

$$F = G_k + Q_k \quad (3)$$

$$R_u = q_p \cdot A_p + f_s \cdot L \cdot \varphi$$

3. Example 4 杭の載荷試験から設計する場合  
設計条件を以下に示す。

**Design Situation**

- Pile foundation, driven piles, pile diameter  $D = 0.4\text{m}$  and length = 15m. The building supported by the piles does not have the capacity to transfer the load from weak to strong piles. The allowable pile settlement is 10mm

**Pile Resistance**

- 2 static pile load test results provided on driven piles of same diameter and length as design piles. Piles were loaded beyond a settlement of  $0.1D = 40\text{mm}$  to give the limit load.

**Characteristic values of actions**

- Permanent vertical load  $G_k = 20,000\text{kN}$
- Variable vertical load  $Q_k = 5,000\text{kN}$

**Require number of piles needed to satisfy both ULS and SLS**

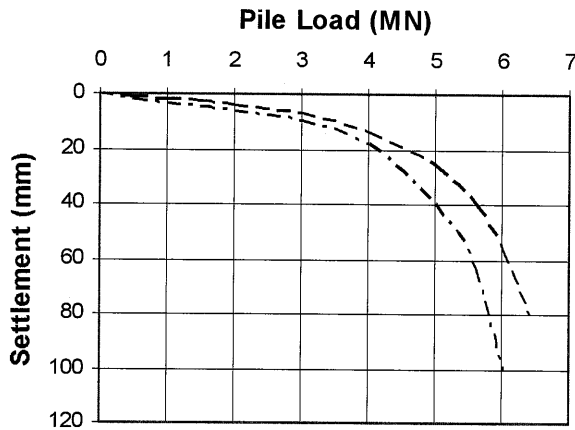


図2 杭の載荷試験結果

本問題に対して、表1と同じ要求性能を設定した。Example3と同様に、地震時の検討を省略した。照査式を以下に示す。

$$F_d < n \cdot R_d$$

$$F_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k \quad (4)$$

$$R_d = \phi_R \cdot R_k$$

ここで、 $n$ は必要な杭本数、 $\gamma_G$ 、 $\gamma_Q$ は荷重係数、 $\phi_R$ は耐力係数である。比較的一様な地盤であると仮定し、敷地内のばらつきによる支持力の変動係数を0.1として、荷重・耐力係数を算定した(表3)。なお、本ケースでは載荷試験を実施しているため、モデル化誤差による変動を考慮していない。

表3 荷重係数と耐力係数

	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\phi_R$
ULS	1.0	3.1	0.85
SLS	1.0	1.25	0.9

(4)式の  $R_k$  は複数の載荷試験結果から推定した敷地内の支持力の平均値(特性値)である。AIJ-LSD 指針においては、 $R_k$  の算定方法を記述していない。そこでWGで検討したが新しい提案に到らなかったため、今回についてはEurocode7の方法を採用することとした。Eurocode7の方法は以下の通りである。

$$R_k = \min \left\{ \frac{(R_m)_{mean}}{\xi_1}, \frac{(R_m)_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (5)$$

ただし、 $(R_m)_{mean}$ 、 $(R_m)_{min}$  は載荷試験結果の平均値と最小値である。今回の場合には、ULS と SLS の検討があるため、以下の値を用いることとした。

ULS ; 極限支持力 ; 0.1D (D は杭径) の時の杭頭荷重  
SLS ; 沈下量 10mm の時の杭頭荷重

Eurocode7 の TableA.9 には、 $\xi_1$ 、 $\xi_2$  として表4の値が推奨されている。この根拠はあまり明快にはされていないが、WG内での検討から推測すると、敷地内の杭の支持力の変動係数を、試験数が少ない場合には0.2~0.3試験数が多い場合には0.1程度としているのではないかと考えられる。本ケースの場合には、試験数が2であるから、 $\xi_1=1.3$ 、 $\xi_2=1.2$ を採用する。

表4  $\xi_1$ 、 $\xi_2$

試験数	1	2	3	4	5
$\xi_1$	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
$\xi_2$	1.4	1.2	1.1	1.0	—

これらを照査式(4)に代入することにより、必要本数  $n$  を算定すると12本となる。本ケースでは必要本数  $n$  はSLSの検討で決まっている。 $n$ を12として下式により全体安全率FSを求めると、FSは2.0であった。

$$FS = n \cdot R_k / (G_k + Q_k) \quad (6)$$

ただし、 $R_k$ は極限支持力(沈下量0.1Dの時)の特性値

4. おわりに

今回ERTC10の設計例題を解くことにより、敷地内の地盤のばらつきとモデル化誤差との両者を合理的に考慮する方法を理解した。すなわち、敷地内の地盤のばらつきについては、「敷地内における支持力の平均値である特性値を推定する」際に考慮するのが有効であることが分かった。これによればボーリングの数や載荷試験の数を考慮することも出来る。支持力式を使って設計する場合には、さらに耐力係数を算定する際にモデル化誤差による変動係数を考慮すれば良い。しかし、載荷試験を複数行う事は稀で、ボーリングデータで補完することが多い。この場合の考え方についてはいずれの基準にもないため、今後の課題でありWGでも現在検討中である。

\*1 新日本製鐵  
\*3 ジャパンパイル

\*2 フジタ  
\*4 竹中工務店

\*1 Nippon Steel Corporation  
\*3 Japan Pile Corporation

\*2 Fujita Corporation  
\*3 Takenaka Corporation