

杭の鉛直ばね定数の簡易算定法の提案  
(その2 : 中掘り拡大根固め工法杭)

正会員 ○小椋仁志\* 同 阪上浩二\*\*  
同 三町直志\*\*\*

鉛直ばね定数 杭頭沈下量 長期荷重  
載荷試験 既製コンクリート杭 中掘り工法

1. はじめに

杭の鉛直ばね定数について、(その2)では中掘り拡大根固め工法杭の算定方法を検討する。

2. 対象とする工法

対象とする工法は、図1に示すN工法である。杭の上方は一般掘削部で、下方は拡大掘削部(径Dkは杭径Dの1.5倍、約1.37倍、約1.2倍の3種類)であり杭周固定部と根固め部からなる。算定式の作成には、N工法杭の載荷試験データ36件(杭先端地盤は砂質・礫質土)を用いた。図2に、Dkと杭全長Lの関係を示す。

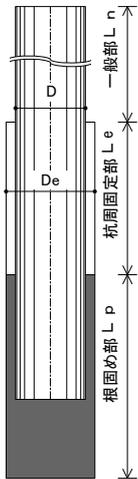


図1 N工法

図2に、Dkと杭全長Lの関係を示す。

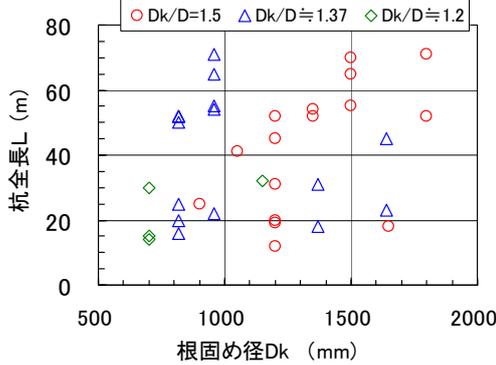


図2 載荷試験データの分布

3. 杭頭ばねの基本式

長期荷重時の杭頭ばね定数Kaoは次式で表される。  
 $K_{ao} = R_{ao} / S_{ao}$

ここに、Rao:長期許容支持力、Sao:杭頭沈下量。Saoは先端沈下量Sapと杭の縮み量δaの和であるから、 $K_{ao} = R_{ao} / (\delta a + S_{ap})$ となる。したがって、Kaoの逆数は、次式のように周面ばねKaδ = Rao / δaの逆数と先端ばねKapo = Rao / Sapの逆数の和として表される。

$$1/K_{ao} = 1/K_{a\delta} + 1/K_{apo}$$

4. 周面ばねδKaδ

4.1 杭の圧縮剛性

杭の一般部、杭周固定部、根固め部の圧縮剛性

Cn、Ce、Cpは以下のように表される。

$$C_n = \rho_A \cdot A \times \rho_E \cdot E$$

$$C_e = \rho_A \cdot A \times \rho_E \cdot E + (A_e - \rho_A \cdot A) E_s$$

$$C_p = \rho_A \cdot A \times \rho_E \cdot E + (A_k - \rho_A \cdot A) E_p$$

ここに、A:杭の換算断面積の公称値、ρA:杭の

実測断面積比(ρA=1.07<sup>1)</sup>、E:杭のヤング係数の公称値(E=40kN/mm<sup>2</sup>)、ρE:杭の実測ヤング係数比(ρE=1.1<sup>1)</sup>、Es:杭周固定材のヤング係数(Es=5kN/mm<sup>2</sup>)、Ep:根固め材のヤング係数(Es=12kN/mm<sup>2</sup>)、Ae:拡大掘削部の閉塞断面積(Ae=Dk<sup>2</sup>π/4)、Ak:根固め部の閉塞断面積(Ak=Ae)

ここで、簡単化のためCnとCeをまとめて、杭周部の平均圧縮剛性Csとする。

$$C_s = (C_n \times L_n + C_e \times L_e) / (L_n + L_e)$$

ここに、Ln:一般部長さ、Le:杭周固定部長さ。

長期支持力時の杭頭ひずみをεao、根固め部上端のひずみをεapとすると、εao=Rao/Cs、εap=Rap/Cpとなる(Rap:長期許容支持力時先端抵抗)。

4.2 杭体のひずみ分布(摩擦力分布)の仮定

ひずみ分布(摩擦力分布)は次のようにモデル化する。杭頭~フリクションカット(以下FC)処理部分(長さLc)下端間と根固め部のひずみは一定値(εao、εap)とし、FC下端から根固め部上端までの間(長さLs=Ln+Le)の摩擦力は深さZを境とする2区間に分けて考え、Z=Lc+ξ×Lsでのひずみをεaz=η×(εao-μ×εap)+μ×εapとする。ξとηは摩擦力分布を表す係数で、これらを変えることによって摩擦力の分布状態が考慮できる。たとえば、Zより下方の摩擦力が大きい場合はξ+η>1となる。ここではξ=0.5に固定して、深さZc=Lc+Ls/2でのηを載荷試験データから逆算して求めた。しかし、ηとZcとの相関係数は0.164と、相関性は認められなかった。これは、FC処理された試験杭が多かったこと、杭周固定部の摩擦力が大きいこと等によるのであろう。このため、ηの平均値の0.607から、η=0.6とすることとした。

4.3 周面ばねKaδの計算

長期荷重時の杭縮み量δaは次式で計算される。

$$\delta a = \epsilon_{ao} \times L_c + (\epsilon_{ao} + \epsilon_{az}) \times \xi \times L_s / 2 + (\epsilon_{az} + \mu \epsilon_{ap}) (1 - \xi) \times L_s / 2 + \epsilon_{ap} \times L_p = R_{ao} \times [ \{ L_c + (\xi + \eta + 2\lambda a - \eta \lambda a - \xi \lambda a) \times L_s / 2 \} / C_s + \lambda a L_p / C_p ]$$

ここに、Lp:杭先端から上方の根固め部長さ(Lp=2D)である。λaは長期荷重時先端伝達率であり、極限荷重時先端伝達率λu=Rup/Ruoから求める。RuoとRupはN工法の支持力算定式による極限支持力と

先端支持力である。載荷試験データから、長期許容支持力  $R_{ao} = R_{uo}/3$  と、荷重が  $R_{ao}$  の時の先端支持力  $R_{ap}$  の比  $R_{ap}/R_{ao}$  を実測  $\lambda_a$  とし、それと  $\lambda_u$  の関係を図3に示す。相関係数は0.403と弱い相関が認められ、回帰直線は  $\lambda_a = -0.202 + 0.868\lambda_u$  となる。これから  $\lambda_a$  の算定は  $\lambda_a = -0.16 + 0.8\lambda_u$  とする。ただし、 $\lambda_a < 0$  となる  $\lambda_u < 0.2$  の場合は、 $\lambda_a = 0$  とする。

以上より、周面ばね  $K_{a\delta}$  は次式で得られる。

$$1/K_{a\delta} = \delta_a/R_{ao} = \{Lc + (\xi + \eta - \xi\lambda_a - \eta\lambda_a + 2\lambda_a) \times Ls/2\} / C_s + \lambda_a Lp/C_p$$

### 5. 先端ばね $K_{apo}$

先端ばね  $K_{apo} = R_{ao}/S_{ap}$  は、次式で与えられる。

$$1/K_{apo} = \lambda_a/K_{app} = \lambda_a \times (Dk/Ak) / k_{app}$$

この式の  $K_{app}$  は先端ばね定数で  $K_{app} = R_{ap}/S_{ap}$ 、 $k_{app}$  は先端地盤反力係数で  $k_{app} = (R_{ap}/Ak) / (S_{ap}/Dk)$  で表される。

載荷試験データから  $R_{ap}$  と長期荷重時の先端沈下量  $S_{ap}$  を求め、得られた  $k_{app} = (R_{ap}/Ak) / (S_{ap}/Dk)$  と  $N_p$  の関係を図4に示す。なお、 $S_{ap}/Dk$  が0.1%未満のデータは省いている。両者の相関係数は0.519と弱い相関性は認められ、両者の回帰直線、 $k_{app}/N_p$  の平均値、 $k_{app}$  と  $N_p$  各々の平均値の比を求めると、それぞれ  $k_{app} = 0.056 + 0.0153N_p$ 、0.0199、0.0164となる。これから、 $k_{app}$  の算定式は  $k_{app} = 0.017N_p$  とする。

### 6. 杭頭ばね定数 $K_{ao}$ の算定手順

以下に、杭頭ばね定数  $K_{ao}$  の算定手順をまとめる。

- ① 杭等の諸元から、 $L$ 、 $L_c$ 、 $L_e$ 、 $D$ 、 $D_k$ 、 $A$
- ② N工法の支持力算定式から、 $N_p$ 、 $R_{uo}$ 、 $R_{up}$
- ③  $\rho_A = 1.07$ 、 $\rho_E = 1.1$ 、 $E = 40\text{kN/mm}^2$ 、 $E_s = 5\text{kN/mm}^2$   
 $E_p = 12\text{kN/mm}^2$ 、 $\xi = 0.5$ 、 $\eta = 0.6$
- ④  $L_p = 2D$ 、 $L_n = L - L_c - L_e - L_p$ 、 $L_s = L_n + L_e$ 、 $A_e = Ak = Dk^2\pi/4$ 、 $A_p = D^2\pi/4$
- ⑤  $\lambda_u = R_{up}/R_{uo}$

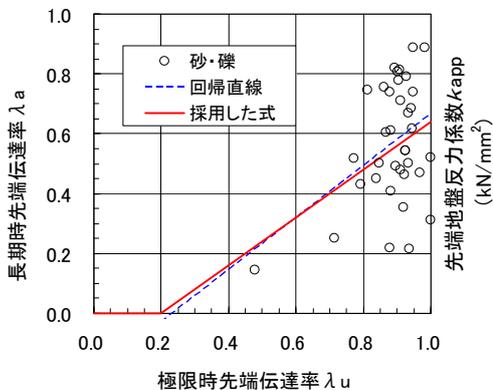


図3  $\lambda_a \sim \lambda_u$ 関係

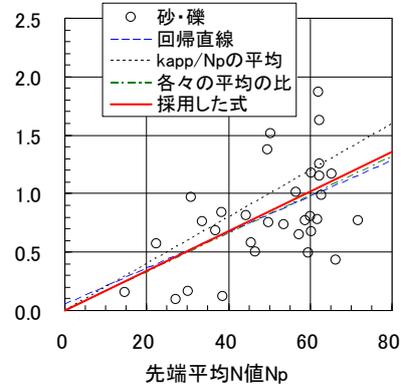


図4  $k_{app} \sim N_p$ 関係

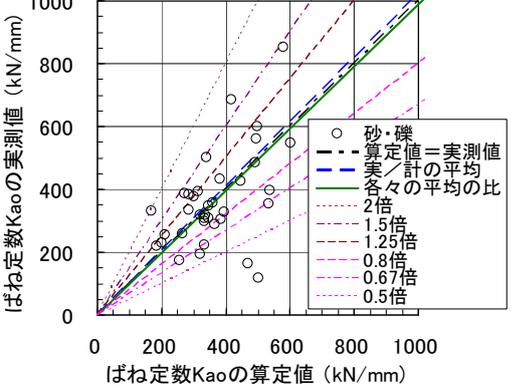


図5  $K_{ao}$ の算定値と実測値

$$\textcircled{6} \lambda_a = -0.16 + 0.8\lambda_u \quad (\lambda_u < 0.2 \text{ では } \lambda_a = 0)$$

$$\textcircled{7} C_n = \rho_A A \times \rho_E E$$

$$C_e = \rho_A A \times \rho_E E + (A_e - \rho_A A) E_s$$

$$C_p = \rho_A A \times \rho_E E + (A_k - \rho_A A) E_p$$

$$\textcircled{8} C_s = (C_n \times L_n + C_e \times L_e) / L_s$$

$$\textcircled{9} 1/K_{a\delta} = \{Lc + (\xi + \eta - \xi\lambda_a - \eta\lambda_a + 2\lambda_a) Ls/2\} / C_s + \lambda_a Lp/C_p$$

$$\textcircled{10} k_{app} = 0.017N_p$$

$$\textcircled{11} 1/K_{apo} = \lambda_a \times (Dk/Ak) / k_{app}$$

$$\textcircled{12} K_{ao} = 1 / (1/K_{a\delta} + 1/K_{apo})$$

### 7. $K_{ao}$ の算定結果

図5は、以上の手順による  $K_{ao}$  の算定値と実測値の関係である。実測値/算定値の平均は1.02、各々の平均値の比は0.99と、平均的にはほぼ一致している。相関係数は0.527であるが、摩擦分布を2区間と単純化し、 $\lambda_a$  と  $k_{app}$  に地盤定数からの推定値を用いたことを考えると、実用的には満足できる相関といえよう。

次に、実測値 < 算定値のデータを軽く扱う不合理を避けるため(実測値/算定値)を対数で表した  $\ln(\text{実測値}/\text{算定値})$  の分布は、ほぼ正規分布とみなすことができた。そこで、平均  $m$  と標準偏差  $\sigma$  を求めると、 $m = -0.044$ 、 $\sigma = 0.401$  となった。したがって、算定値は50%の確率で実測値の0.73~1.25倍の範囲に、80%の確率で0.6~1.6倍の範囲に入ることになる。

### 8. おわりに

本報では、中掘り拡大根固め工法による杭について、長期荷重時の杭頭ばね定数の算定方法を提案した。

貴重な載荷試験データをご提供いただいた日本コンクリート工業(株)と、N工法の関係各位に深甚の謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 小椋仁志・本間裕介：「プレ・リガ」(拡大)根固め工法杭の鉛直ばね定数の簡易算定法の提案(その1：算定方法の検討)、第46回地盤工学研究発表会講演集、pp. 1233-1234、2011.6

\* ジャパンパイル(株)・工博  
 \*\* (株)山下設計構造設計部門  
 \*\*\* (株)日本設計(株)構造設計群

JAPAN PILE Corp, Dr.Eng  
 Yamashita Sekkei Inc. Structural Design Dept.  
 NIHON SEKKEI, Inc. Structural Engineering Dept.