

㈱ジオトップ 正会員 ○吉川 那穂
同 上 正会員 小椋 仁志
同 上 正会員 二見 智子

1. はじめに

筆者らは、埋込み節杭に対する多数のひずみ計測を伴う鉛直載荷試験の結果から、支持力や荷重～沈下量関係を推定する方法を提案している¹⁾²⁾。今回、そのデータを用いて杭頭ばね定数 K_v について検討したので、報告する。

2. 載荷試験データによる杭頭ばね定数 K_{vt}

節杭は、摩擦杭や中間支持杭として多く用いられるPHC杭であって、杭径(節部径-軸部径)は表-1に示す4種類である。載荷試験を行ったのは、改良セメント工法と低排土セメント工法による74本の節杭であって、いずれもひずみ計を設置して先端抵抗や周面摩擦抵抗を計測している。表-1には杭径別のデータ数を示している。杭長は6~41m(平均14.9m)であって、先端地盤のN値は数例を除いて30以下と一般に摩擦杭と分類される範囲となっている。なお、施工方法やひずみデータの処理方法については、文献2)を参照されたい。

表-1 杭径(節部径-軸部径)別データ数

杭径	試験数	周面摩擦抵抗			先端抵抗
		砂質土	粘性土	腐植土	
φ440-300	29	55	65	27	29
φ500-400	22	51	50	15	22
φ600-450	11	24	33	6	11
φ650-500	12	36	39	1	12
合計	74	166	187	49	74

載荷試験で得られる杭頭の荷重P～沈下量Sの初期接線勾配が、杭頭ばね定数の実測値 K_{vt} となる。ただし、P～S関係は初期の段階から非線形性を示すことが多いため、原則としてS=10mm時のP/Sの値を K_{vt} とした。

3. 道路橋示方書の式による杭頭ばね定数 K_{vr}

K_v の計算には次の道路橋示方書式³⁾がよく用いられる。

$$K_v = a \frac{A_p E_p}{L} \dots \dots \dots (1)$$

A_p : 杭の断面積、 E_p : 杭のヤング係数、 L : 杭長
aはLと杭径Dによって決まる係数であるが、示方書にはセメント工法杭に対するaは示されていない。そこで、(2)式の中掘りPHC杭に対するaを用いる。

$$a = 0.011(L/D) + 0.36 \dots \dots \dots (2)$$

(1),(2)式から求めた K_v を K_{vr} とする。このとき、 A_p, E_p は軸部の圧縮剛性、Dは節部径とした。 K_{vr} と K_{vt} との関係を実験的に検討するために、 K_{vt}/K_{vr} の値が対数正規分布になると仮定して統計処理を行った。これは、 K_{vt}/K_{vr} を正規分布と仮定したのでは、 $K_{vt} > K_{vr}$ の場合は K_{vt}/K_{vr} が $1 \sim \infty$ の値となるのに対し、 $K_{vt} < K_{vr}$ の場合では $0 \sim 1$ と狭

い範囲の値となり、単純に平均すると後者のデータを軽く扱うことになって不合理な結果となるためである。

その結果、 K_{vt}/K_{vr} の自然対数、 $\ln(K_{vt}/K_{vr})$ の平均値 λ は -0.113、標準偏差 ζ は 0.576 となった。すなわち、平均値で見ると $K_{vt} = e^{-0.113} K_{vr} = 0.89 K_{vr}$ と、 K_{vt} は K_{vr} よりも1割程度小さめの値となる。また、 K_{vt} が K_{vr} の 4/5~5/4 倍の範囲に入る確率を λ と ζ から求めると 29%、1/2~2 倍の範囲では 76% となる。これらより、(1),(2)式による K_{vr} の精度は悪く、あまり信頼できない推定値ということになる。これは、(2)式が中掘り杭に対するものであって、主に支持杭を対象にしていることを考えると、当然の結果と言える。

4. 摩擦杭用の係数を用いた道路橋示方書式による杭頭ばね定数 K_{vn}

セメント工法による摩擦杭を対象とした係数 a を求める式を作成することとし、載荷試験データによる K_{vt} を用いて a を逆算した。それを最小自乗法を用いて回帰分析すると、a を求める式は(3)式となった。

$$a = 0.031(L/D) - 0.183 \dots \dots \dots (3)$$

この式と(1)式とを用いて求めた K_v を K_{vn} とすると、 $\ln(K_{vt}/K_{vn})$ は $\lambda = 0.037$ 、 $\zeta = 0.353$ となった。すなわち、 $K_{vt} = e^{0.037} K_{vn} = 1.04 K_{vn}$ と、平均で見ると K_{vn} は K_{vt} とほぼ等しい値を与えており、 K_{vt} が K_{vn} の 4/5~5/4 倍の範囲に入る確率は 47%、1/2~2 倍に入る確率は 95% となる。この精度では十分とは言えないものの、杭径、杭長と圧縮剛性のみから計算された値であることを考えると、工学的には許容される精度と言えよう。

5. 荷重伝達解析による杭頭ばね定数 K_{vc}

K_v の推定精度を向上するためには地盤条件を考慮することが不可欠と考え、文献2)で提案した荷重～沈下量関係の推定法と同じ手法を用いて、 K_v の推定法を作成することとした。文献2)の手法は、荷重伝達解析を用いた平山らの方法⁴⁾に基づいたものであって、地盤のN値から荷重～沈下量関係を工学的には満足できる精度で推定できる。以下、 K_v 推定法の作成手順について述べる。

5.1 双曲線への近似

非線形モデルとして、簡潔で適用性の良い Kondner 型双曲線を用い、載荷試験で得られた区間周面摩擦力度 f_i ~ 区間沈下量 S_i 関係と先端支持力度 q_p ~ 先端沈下量 S_p 関係が、次式で表されるものと仮定する。

$$f_i = S_i / (a_f + b_f S_i) \dots (4) \quad q_p = S_p / (a_p + b_p S_p) \dots (5)$$

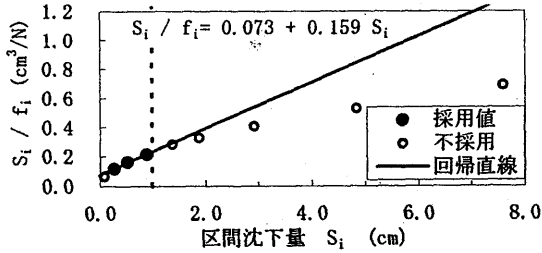
ここに、 a_f, b_f, a_p, b_p は双曲線定数であり、 $1/a_f, 1/a_p$ は初期接線勾配を、 $1/b_f, 1/b_p$ は漸近値を表すことになる。(4),(5)式

“Estimating Pile Head Stiffness of Friction Piles Based on Loading Test of Bored Nodular piles”,
Nao YOSHIKAWA, Hitoshi OGURA and Tomoko FUTAMI (GEOTOP Corporation)

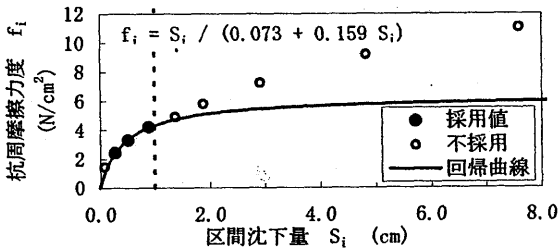
を次のように変形すると、線形で表される式となる。

$$S_i / f_i = a_f + b_f S_i \dots (6) \quad S_p / q_p = a_p + b_p S_p \dots (7)$$

上記の f_i, S_i および q_p, S_p に载荷試験で得られた値を代入し、図-1 のように、最小自乗法によって直線に近似させて双曲線定数を求める。このとき、文献 2) では $P \sim S$ 関係を考えたため、 S_i や S_p が 10mm ~ 0.05D 間のデータから得られる直線を重視していた。しかし、今回は K_v を考えているため、10mm 以下のデータから得られる直線を重視した。



(a) $S_i / f_i - S_i$ 関係



(b) $f_i - S_i$ 関係

図-1 双曲線近似の一例

5.2 双曲線定数と N 値との関係

5.1 で得られた双曲線定数のうち a_f と b_f について、 $1/a_f, 1/b_f$ と地盤の N 値との関係を砂質土、粘性土、腐植土に分けて検討した。図-2 に、その一例として砂質土の $1/a_f - N$ 値関係を示す。図の N 値は区間内の N 値の単純平均値である。 $1/a_f, 1/b_f$ と N 値との相関係数を計算すると 0.399 ~ 0.684 となり、ばらつきは大きいものの正の相関関係が認められることから、両者を関係づけることは妥当と判断される。

先端抵抗についても 5.1 で得られた $1/a_p, 1/b_p$ と先端平均 N 値 N_p との関係を検討した。このとき、 N_p の平均範囲は、最下端節部の上方 1D ~ 下方 3D 間とした²⁾。相関係数は 0.580 および 0.654 となり、両者には相関関係が認められる。

図中の実線は最小自乗法による回帰直線、破線は平均値(回帰値) $\pm \sigma$ (標準偏差)の線である。全体的な傾向から大きく外れるデータは、これらの計算では除外している。こうして求めた回帰直線式と σ とを、表-2 にまとめておいた。

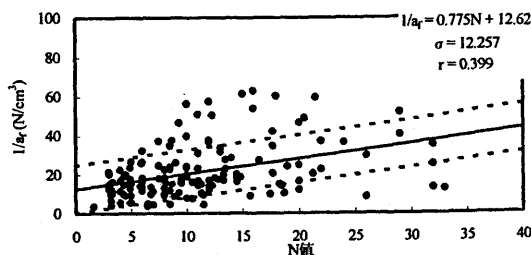


図-2 周面摩擦抵抗の $1/a_f - N$ 値関係(砂質土)

表-2 双曲線定数の回帰直線式

	回帰直線		σ
周面	$1/a_f (N/cm^2)$	砂質土: 0.775N + 12.62	12.257
		粘性土: 2.484N + 8.599	13.857
		腐植土: 1.775N + 3.849	6.565
	$1/b_f (N/cm^2)$	砂質土: 0.870N + 4.734	5.869
		粘性土: 0.540N + 4.714	2.937
		腐植土: 0.548N + 1.727	1.922
先端	$1/a_p (N/cm^2)$	16.60N + 126.3	237.97
	$1/b_p (N/cm^2)$	13.85N + 80.50	160.67

5.3 解析結果

表-2 の諸式に N 値を代入して求めた双曲線定数を用いて荷重伝達解析を行い K_{vc} を計算した。解析方法は文献 2) と同じである。図-3 に、 $\ln(K_{vt}/K_{vc})$ のヒストグラムを示す。なお、74 件のデータのうち全体的な傾向から外れる 4 件は除外している。 $\ln(K_{vt}/K_{vc})$ の λ と ζ は、 $-0.032, 0.247$ となっている。すなわち、 $K_{vt} = e^{-0.032} K_{vc} = 0.97 K_{vc}$ と、平均で見ると K_{vt} とほぼ一致した K_{vc} が得られる。また、 K_{vt} が K_{vc} の 4/5 ~ 5/4 倍の範囲に入る確率は約 63%、1/2 ~ 2 倍の範囲に入る確率は約 99% となる。したがって、この方法で得られる K_{vc} は、実用的に十分満足できる精度であると判断できよう。

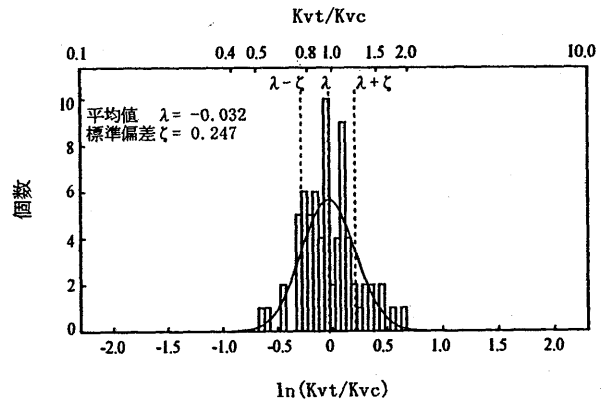


図-3 $\ln(K_{vt}/K_{vc})$ のヒストグラム

6. おわりに

以上、埋込み節杭の鉛直载荷試験の結果を用いて杭頭ばね定数 K_v について検討した。その結果、道路橋示方書式の係数による K_v では推定精度が良くないこと、摩擦杭用の係数を用いれば許容範囲の精度の K_v が得られること、および地盤の N 値を考慮した解析によれば実用上満足できる K_v が得られること、等が分かった。今後も引き続きデータを蓄積し、推定精度を向上させていきたい。

参考文献

- 1) 小椋仁志・日野真紀子・カキマツ: 信頼性理論を考慮した杭の支持力算定式の作成例, 第 44 回地盤工学シンポジウム, III-6, 121-126, 1999
- 2) 二見智子・小椋仁志: 埋め込み節杭のデータによる摩擦杭の荷重~沈下量関係推定法の提案, 第 44 回地盤工学シンポジウム, III-7, 127-132, 1999
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書(IV 下部構造編), pp.346-347, 1996.
- 4) 平山英喜・金井重夫・木原律子: 埋め込み節杭の荷重-沈下解析(その 1)(その 2), 第 32 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1507-1510, 1997.