

752 埋込み節杭の荷重-沈下解析 (その1: 荷重伝達関数の定数に関する統計的解析)

㈱ジオトップ 正会員 平山 英喜  
 ㈱ジオトップ 正会員 金井 重夫  
 ㈱ジオトップ 正会員 ○木原 律子

1. まえがき

杭基礎の設計において、支持力だけでなく、沈下についても検討することの重要性が増大してきている。荷重-沈下特性推定が支持力と同程度の簡便さで可能な、①地盤定数決定法、②沈下計算法、が実用的な観点から望まれる。まず、本稿では、埋込み節杭の鉛直載荷試験結果を、統計的に解析した結果についてまとめる。(その2)で本稿の結果を用いた荷重伝達法解析に基づいて上記①、(その3)で杭頭ばね定数の手計算法に関する検討により上記②、を考察した結果をまとめる。

2. データの解析方法

2.1 対象データ

対象とした鉛直載荷試験結果は、杭種: PHC節杭、杭径(節部-軸部): 500-400[mm]と440-300[mm]、杭長: 6.0~24.0[m](平均 13.3[m])、施工法: セメントミルク工法(MT工法)、に対するものである。

ひずみ計のデータから、(f, z)、(q, z) (ここに、f=周面抵抗応力、q=先端抵抗応力、z=区間中央または先端の沈下量)を計算する。この際、fとqは、節部径を用いて計算する。φ440-300の(f, z)のデータと、支持力に関する検討は、文献<sup>1)</sup>にまとめられている。データ数を、表-1に示す。

表-1 (f, z)、(q, z)のデータ数

	(f, z)		(q, z)	
	砂質土	粘性土	砂質土	粘性土
φ500-400	17	14	5	3
φ440-300	18	22	7	3

2.2 荷重伝達関数

非線形モデルとして、簡潔で適用性の良い Kondner型双曲線に基づいた荷重伝達関数を用いる<sup>2)</sup>。fに関しては、ピーク値  $f_0$ が生じるケースを考慮して、定数  $R = f_0 / (1/b_r)$  を導入して上限値を設定する修正型の関数を仮定する。f-z、q-z関係は、次式で表される。

$$f = z / (a_r + b_r z) \quad (f \leq R/b_r) \quad (1)$$

$$q = z / (a_b + b_b z) \quad (2)$$

線形解析に用いる周面せん断地盤反力係数  $k_r$ と先端地盤反力係数  $k_b$ は、基準沈下量を 1[cm]とすると、(1)(2)式から、次のようになる。

$$k_r = 1 / (a_r + b_r) \quad (3)$$

$$k_b = 1 / (a_b + b_b) \quad (4)$$

2.3 定数の算定法

(f, z)のデータを(z, z/f)座標上にプロットする。

一部には、zの小さい範囲や大きい範囲 ( $z < 0.2$ [cm]あるいは  $z > 2$ [cm]程度)での点が、全体的な直線傾向からかなり離れる場合もある。このような場合には、それらの点を除去する。最小自乗法で求めた回帰直線の切片と傾きから  $a_r$ と  $b_r$ 、そして(3)式から  $k_r$ を決める。

(q, z)のデータから同様に  $a_b$ 、 $b_b$ 、 $k_b$ を決める。

3. 解析結果

3.1 周面抵抗

$1/a_r$  [kgf/cm<sup>3</sup>] (=初期接線勾配)、 $1/b_r$  [kgf/cm<sup>2</sup>] (=漸近値)、 $k_r$  [kgf/cm<sup>3</sup>]の各々と区間平均N値の関係を、図-1~3に示す。32%に当たる23のデータでfにピーク値  $f_0$ が生じたが、それらの  $R = f_0 / (1/b_r)$  と平均N値の関係を、図-4に示す。各々の図には、回帰直線±σ (σ=標準偏差の不偏推定量)も示してある。

3.2 先端抵抗

$1/a_b$  [kgf/cm<sup>3</sup>]、 $1/b_b$  [kgf/cm<sup>2</sup>]、 $k_b$  [kgf/cm<sup>3</sup>]の各々と先端平均N値の関係を、図-5~7に示す。

先端平均N値に関しては、杭先端上部4d・下部1d (d=軸部径)と上部1D・下部1D (D=節部径)の2通りで検討した結果、前者の方が3定数ともσが10%程度小さかった。この原因の一つに、杭径が比較的小さいため1D・1Dの範囲では実測N値が1個しかなく、地層構成を考慮して外挿によって平均N値を求めざるを得ないことが挙げられる。ここでは、支持力推定で慣用されている4d・1dの範囲の先端平均N値による図を示してある。

4. まとめ

図-1~7の結果を、表-2にまとめて示す。

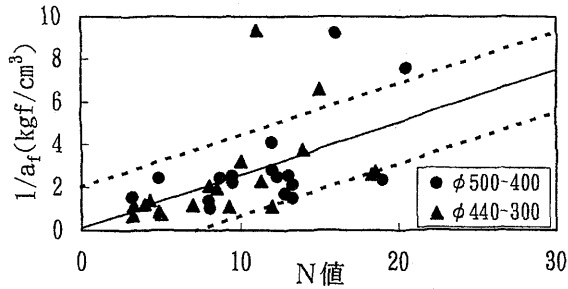
表-2 統計的解析結果のまとめ

		回帰直線	σ
周面	$1/a_r$ [kgf/cm <sup>3</sup> ]	砂質土: 0.247N + 0.117	1.888
		粘性土: 0.320N + 0.889	1.136
	$1/b_r$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	砂質土: 0.056N + 0.665	0.278
		粘性土: 0.048N + 0.467	0.155
	$k_r$ [kgf/cm <sup>3</sup> ]	砂質土: 0.045N + 0.298	0.137
		粘性土: 0.046N + 0.282	0.092
R	0.004N + 0.868	0.068	
先端	$1/a_b$ [kgf/cm <sup>3</sup> ]	3.74N - 4.22	16.17
	$1/b_b$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	2.50N + 4.31	9.96
	$k_b$ [kgf/cm <sup>3</sup> ]	1.42N + 0.12	2.86

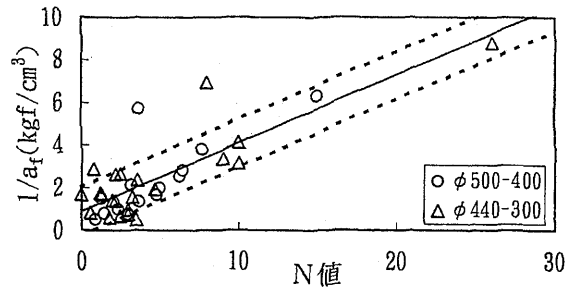
参考文献

- 1) 金井重夫ほか:埋込み工法によるPHC節杭の鉛直支持力, 第30回土質工学研究発表会, pp.1387-1388, 1995.
- 2) 平山英喜:杭の沈下解析法と構成式, 土と基礎, Vol.38, No.7, pp.51-56, 1990.

"Load-settlement analysis of bored precast nodular piles (Part 1: statistic analysis on the parameters of load-transfer functions)", H.Hirayama, S.Kanai & R.Kihara (GEOTOP Corp.)

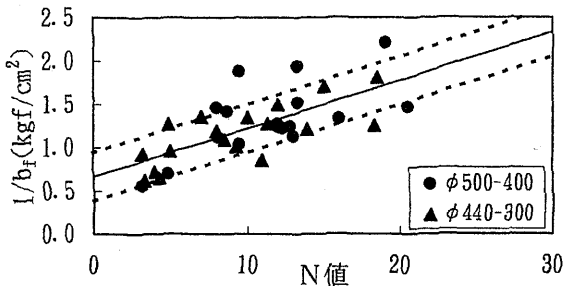


(a) 砂質土

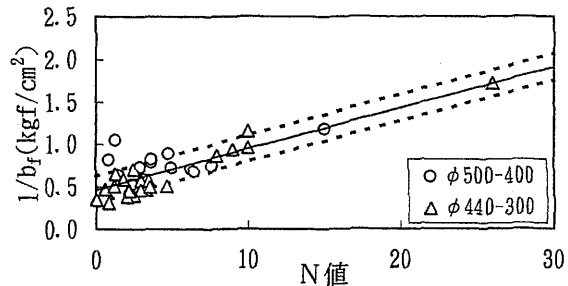


(b) 粘性土

図-1 初期接線勾配-区間平均N値 ( $1/a_f - N$ ) 関係

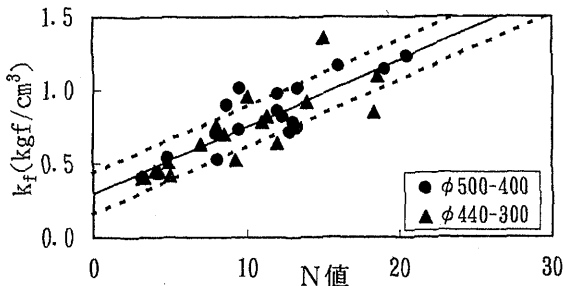


(a) 砂質土

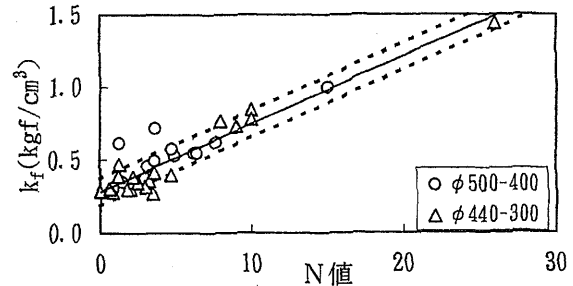


(b) 粘性土

図-2 漸近値-区間平均N値 ( $1/b_f - N$ ) 関係



(a) 砂質土



(b) 粘性土

図-3 せん断地盤反力係数-区間平均N値 ( $k_f - N$ ) 関係

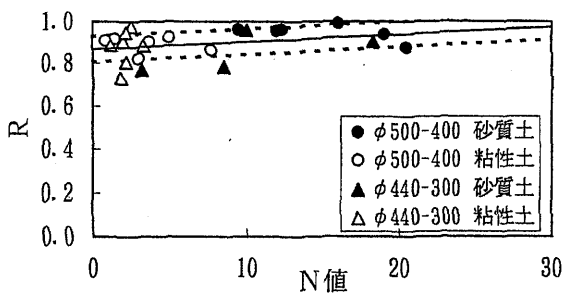


図-4 ピーク値/漸近値-区間平均N値 ( $R - N$ ) 関係

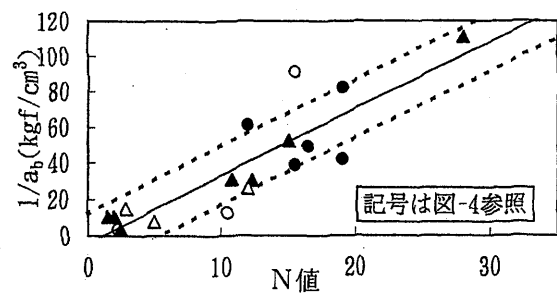


図-5 初期接線勾配-先端平均N値 ( $1/a_b - N$ ) 関係

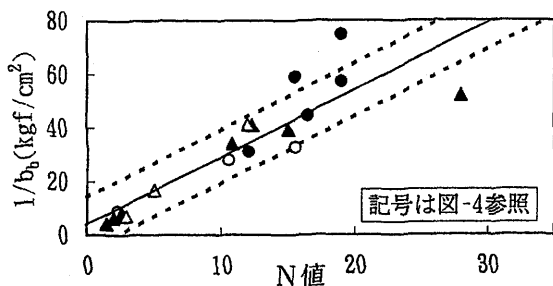


図-6 漸近値-先端平均N値 ( $1/b_b - N$ ) 関係

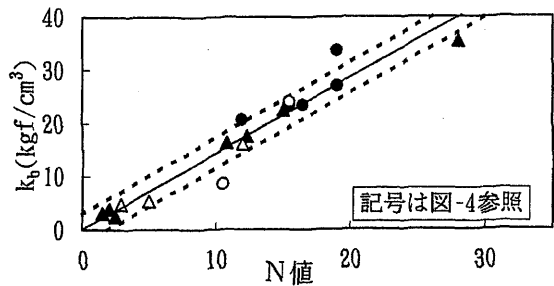


図-7 先端地盤反力係数-先端平均N値 ( $k_b - N$ ) 関係

753 埋込み節杭の荷重-沈下解析 (その2: 荷重伝達法解析に基づく修正定数算定式)

(株)ジオトップ 正会員 平山 英喜  
(株)ジオトップ 正会員 ○ 金井 重夫  
(株)ジオトップ 正会員 木原 律子

1. まえがき

本稿では、(その1)で対象とした載荷試験に対して、まず、統計解析で求めた回帰直線式でN値からインプット定数を求め、線形および非線形の荷重伝達法で荷重-沈下関係を解析し、実測値を比較して考察する。次に、定数算定式を修正し、それをを用いて再解析し、修正式が安全側の上限に対応する実用的な式であることを示す。

2. 解析方法

解析対象は、(その1)の統計的解析のデータベースの基の載荷試験結果である。厚い腐植土層を含む地盤条件のものは対象外とし、17件の試験結果を対象とする。

荷重伝達関数は、(その1)の(1)(2)式で示した修正型双曲線による非線形のもの、(3)(4)式による線形のものを用いる。

解析は、Kondner型双曲線の荷重伝達関数に対する1次元FEMプログラム<sup>1)</sup>を、上記の両モデルも計算できるように改良したもので行う。

各インプット定数は、(その1)の表-2に示した回帰直線式に、要素および先端の平均N値を代入して決める。Rに関しては、平均約0.9で1/3のデータで生じている。しかし、このような高い値では、極限に近い状態でしか荷重-沈下関係に影響しない。ここでは、全要素の周面抵抗に対して一律0.95を与える。

表土層に関しては、N値が無かったりばらつきが大きい場合が多いので、実際には無視するのが安全側の仮定である。ここでの解析は、試験結果と比較して定数算定式の特性を考察するのが目的なので、表土層が厚く、配置されたひずみ計からその層の定数の実測値が得られている7件については、実測値による値をそのままインプットとして用いる。

杭体のヤング率は、PHC杭の $4.0 \times 10^5$  [kgf/cm<sup>2</sup>]を基に、節部径の円の断面積に対する等価値としてφ500-400、φ440-300に対して、各々 $1.6 \times 10^5$  [kgf/cm<sup>2</sup>]、 $1.3 \times 10^5$  [kgf/cm<sup>2</sup>]を与える。

3. 解析結果とその考察

まず、荷重-沈下関係の実測と計算の比較例を図-1に示す。この例は、杭長・地盤抵抗・実測と計算の一致度が、全体の平均値に近いものである。

図-1において、杭頭沈下量1cmでの荷重から、杭頭ばね定数 $K_v$  [tf/cm]として $K_v$ (実測)、 $K_v$ (計算:線形)、 $K_v$ (計算:非線形)の値が求められる。全ケースに対する $K_v$ (実測)と $K_v$ (計算)の比較を、図-2(a)に示す。

また、図-1の例において、同一荷重での(実測沈下量、非線形計算沈下量)のデータが11個得られる。全ケースについて、両者を比較したものを図-3(a)に示す。なお、第1限界荷重(降伏荷重)での沈下量の範囲は1.02~2.22 [cm] (平均1.59 [cm])、その1/2の荷重での沈下量は0.31~0.75 [cm] (平均0.43 [cm])である。

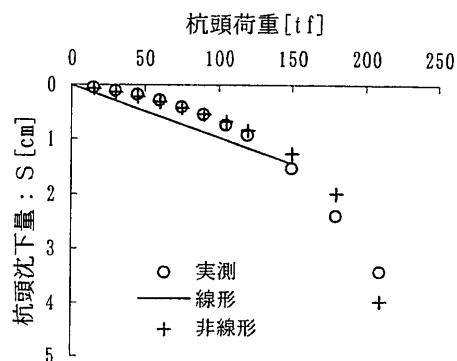
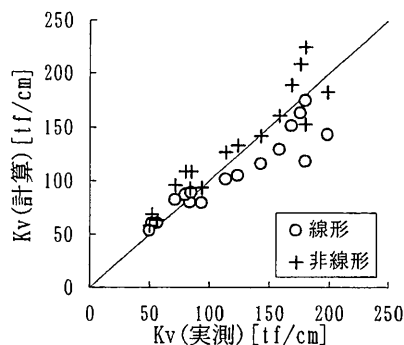
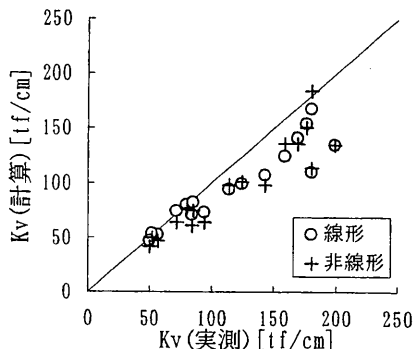


図-1 荷重-沈下関係の実測と計算の比較例



(a) 回帰式((その1)表-2)による計算



(b) 修正算定式(表-1)による計算

図-2 実測と計算の杭頭ばね定数の比較

"Load-settlement analysis of bored precast nodular piles (Part 2: modified parameters based on analysis with load-transfer methods)", H. Hirayama, S. Kanai & R. Kihara (GEOTOP Corp.)

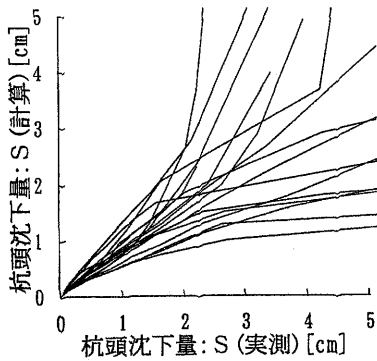
図-2(a)から、 $K_v$ の計算値は、ほぼ次の範囲に分布していることが分かる。

線形解析： $K_v(\text{計算}) = (0.9 \pm 0.2) K_v(\text{実測})$

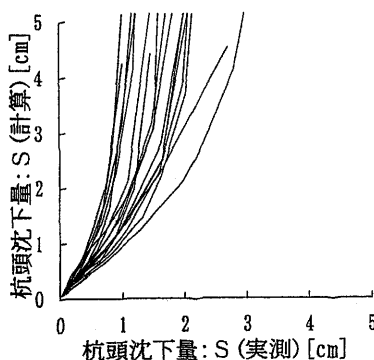
非線形解析： $K_v(\text{計算}) = (1.1 \pm 0.2) K_v(\text{実測})$

線形解析が平均的に10%程度小さい $K_v$ 値を与える要因として、 $k$ 値が杭体の各点での沈下量が1[cm]の時の値であることが挙げられる。線形解析において、杭頭沈下量1.00[cm]の時の杭先端沈下量の範囲は、0.34~0.90[cm] (平均0.69[cm])となっており、 $K_v$ 値の大きいものほど小さい傾向がある。したがって、杭体の各点での沈下量から決められた $k$ 値を用いて $K_v$ 値を計算すると、安全側の値を与えることになる。一方、非線形解析では、杭体の各点での沈下量に対応する接線係数を用いるので、そのような問題は生じない。

非線形解析が平均的に10%程度大きい $K_v$ 値を与える原因を検討するために、回帰式の $k$ と、回帰式の $a$ 、 $b$ から $1/(a+b)$ で計算した $k(a, b)$ の比を、 $N$ 値の関数として比較してみた。その結果、非線形解析で用いる $a$ 、 $b$ から計算した $k(a, b)$ は、線形解析で用いる $k$ より約10%大きいことが分かった。図-3(a)において、沈下量の大きい部分で半数程度のデータが急勾配になって極限状態に近づいているので、 $1/b$ に関してはほぼ平均的な値になっていると考えられる。 $1/a$ のデータは、(その1)に示したように、ばらつきが最も大きい。周面抵抗では、 $+2\sigma$ を超えるデータが各2個見られる。先端抵抗では、切片がマイナスになっていることから、いくつかの値がかなり大きめの値になっていると考えられる。



(a) 回帰式((その1)表-2)による計算



(b) 修正算定式(表-1)による計算

図-3 実測と非線形計算の同一荷重での沈下量の比較

以上のことから、 $1/a$ の回帰式が全体的な傾向よりもかなり大きい値を与えるものになっていることが、 $k(a, b) > k$ の要因として挙げられる。

#### 4. 定数算定式の修正と再解析

回帰式による解析結果から、次のことが分かった。

- ①  $K_v(\text{計算})/K_v(\text{実測})$ は、 $\pm 20\%$ 程度ばらつく。
- ② 線形解析の $k$ は、杭体圧縮に起因して安全側である。
- ③ 非線形解析の定数、特に $1/a$ は、大きめである。

上記①を参考に、安全側の上限として、線形・非線形解析ともに、 $K_v(\text{計算}) = (0.8 \pm 0.2) K_v(\text{実測})$ 、となるように定数算定式を修正する。

$k$ に関しては、上記②の理由により、(回帰直線 $-\sigma$ )まで低下させずに、 $-\sigma/2$ 程度低下させる。また、砂質土と粘性土でほとんど同じなので、(その3)で説明する手計算での利便性を考慮して、両者を同じものとする。

$1/b$ に関しては、ばらつきの程度を考慮して、下限に近い(回帰直線 $-\sigma$ )程度とする。 $1/a$ は、上記③の理由により、回帰直線にとらわれずに、全体的な分布の傾向をより良く表せる式とする。

以上の方針のもとで、線形解析と非線形解析の $K_v$ の計算値が、平均的にはほぼ同じになるように $k$ と $k(a, b) = 1/(a+b)$ の関係を検討した。前章で述べたように、線形計算における杭先端沈下量が、杭先端沈下量の平均約70%であることを参考に、 $k/k(a, b)$ の値を、先端抵抗では $1.0/0.7=1.4$ 、周面抵抗では $1.0/0.85=1.2$ 程度になるように、 $k$ 、 $1/a$ 、 $1/b$ 間の関係を調整した。その結果、表-1にまとめた修正算定式を決めた。

表-1の修正算定式を用いて、再度、解析を行った。その結果を、回帰式による結果と対比して図-2(b)、図-3(b)に示す。

図-2(b)は、ほぼ目標通りの結果が得られたことを示している。図-3(b)から、非線形解析の計算沈下量は、すべてのケースの全沈下量において、実測沈下量とほぼ同じか大きくなっていることが分かる。

#### 5. まとめ

荷重伝達法解析に基づいて回帰式を修正した表-1の算定式は、安全側のほぼ上限を与えるものである。

表-1 修正算定式

周面	$1/a_f$ [kgf/cm <sup>3</sup> ]	砂質土: $0.13N+0.35$ 粘性土: $0.20N+0.50$
	$1/b_f$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	砂質土: $0.050N+0.40$ 粘性土: $0.045N+0.30$
	$k_f$ [kgf/cm <sup>3</sup> ]	$0.045N+0.23$
	R	0.95
先端	$1/a_b$ [kgf/cm <sup>3</sup> ]	$1.7N$
	$1/b_b$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	$2.0N$
	$k_b$ [kgf/cm <sup>3</sup> ]	$1.3N$

#### 参考文献

- 1) Hirayama, H.: Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions. Soils and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp. 55-64, 1990.

754 埋込み節杭の荷重-沈下解析 (その3: 杭頭ばね定数の簡便計算法)

㈱ジオトップ 正会員 ○ 平山 英喜  
 ㈱ジオトップ 正会員 金井 重夫  
 ㈱ジオトップ 正会員 木原 律子

1. まえがき

(その2)の線形解析は1次元FEMによるものであるが、本稿では実用的な観点から、杭頭ばね定数 $K_v$ を手計算で求める方法について検討する。まず、周面抵抗が均質な場合の理論解と、3種類の簡易なばねモデルによる $K_v$ の計算値を、1次元FEMによる計算値と比較する。その結果、理論解を利用する方法と、ばねモデルの1つが、実用の可能性があることを示す。誤差の要因として、周面抵抗の非均質性の影響と、ばねモデルではさらに簡易モデルと実際との差の影響がある。そこで、それらに対する簡単な修正法を提案する。両修正解は、ともに平均精度99%で、FEM解と一致することを示す。

2. 計算法

(その2)では、図-1(a)に示した荷重伝達法で解析している。この方法では、分割された要素ごとに異なる $k_f$ を与えることにより、地盤の非均質性が考慮できる。

本稿では、手計算で可能な方法として図-1(b)(c)に示した4つのモデルを用いる。これらの解は、次の3つのパラメータの関数として与えられる。

$$K_f = k_f (\pi D) L \quad (= \text{周面抵抗ばね定数}) \quad (1)$$

$$K_b = k_b A \quad (= \text{先端抵抗ばね定数}) \quad (2)$$

$$K_p = A E / L \quad (= \text{基準ばね定数}) \quad (3)$$

ここに、 $D$  = 杭径、 $L$  = 杭長、 $A = \pi D^2 / 4$ 、

$k_f$  = 周面せん断地盤反力係数、

$k_b$  = 先端地盤反力係数、 $E$  = 杭体のヤング率

(b)の理論解は、 $k_f = \text{constant}$  の条件で、基礎方程式の2階線形微分方程式の解として得られるものであり、杭頭ばね定数 $K_{TH}$  は次のようになる<sup>1)</sup>。

$$K_{TH} = \frac{\lambda \tanh \lambda + \gamma}{\gamma \tanh \lambda + \lambda} \lambda K_p \quad (4)$$

ここに、 $\gamma = K_b / K_p$ 、 $\lambda = (K_f / K_p)^{1/2}$

(c)のばねモデルは、杭と地盤の抵抗を分離し、直列ばねで連結したものである。モデル①は、杭体の圧縮を無視したものである。モデル②は、逆に杭体の最大圧縮量を想定して、杭のばね定数を(3)式の基準ばね定数 $K_p$  ( $K_f = 0$ 、 $K_b = \infty$ の場合の杭体圧縮量に対応するばね定数)としたものである。モデル③では、①②の中間的な杭体圧縮量を想定し、軸力の平均値レベルでの圧縮量を考慮する。そこで、 $k_f = \text{constant}$  の条件での杭中央での軸力と杭頭軸力の比、

$$r = (K_b + 0.5 K_f) / (K_b + K_f) \quad (5)$$

を導入し、杭のばね定数を $K_p / r$ とする。

ばねモデル①②③による杭頭ばね定数 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$

は、次式で与えられる。

$$K_1 = K_b + K_f = a K_p \quad (6)$$

$$K_2 = a K_p / (1 + a) \quad (7)$$

$$K_3 = a K_p / (1 + r a) \quad (8)$$

ここに、

$$a = (K_b + K_f) / K_p \quad (= K_1 / K_p) \quad (9)$$

(その2)で解析した17件の鉛直荷重試験を対象に、図-1(b)(c)の4モデル、すなわち、(4)(6)(7)(8)式で杭頭ばね定数を計算する。

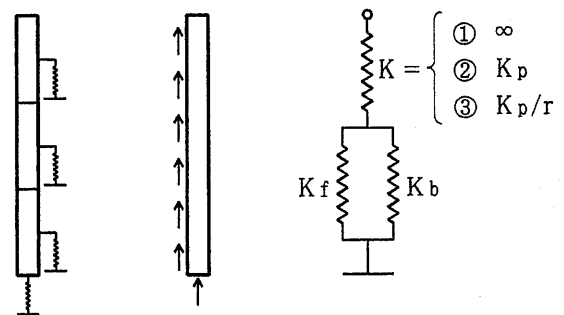
計算のためのインプットは、(1)~(3)式で計算する。 $K_f$ は、(その2)の表-1の算定式を用いて区間平均 $N$ 値から $k_f$ を計算し、それに区間長さを乗じ、杭全体でそれらを合計した値に、 $\pi D$ を乗じて計算する。しかし、砂質土と粘性土の $k_f$ の算定式が共通なので、杭全長の平均 $N$ 値から直接 $k_f$ の平均値を求め、それを(1)式に代入すればよい。先端平均 $N$ 値から $k_b$ を計算し、(2)式で $K_b$ を求める。杭の条件から(3)式で $K_p$ を決める。

3. 計算結果とその考察

(その2)の線形解析による杭頭ばね定数を $K_{FEM}$ と表記し、基準値とする。 $K_{TH} / K_{FEM}$ 、 $K_1 / K_{FEM}$ 、 $K_2 / K_{FEM}$ 、 $K_3 / K_{FEM}$ と、(9)式の $a$ の関係を図-2に示す。

この図から、次のようなことが分かる。

- ①  $K_{TH}$ は最も精度が良いが、全般的に危険側の値を与える。 $K_{TH}$ の誤差の原因は、理論式の仮定から、地盤の非均質性の影響である。
- ②  $K_1$ の危険側、 $K_2$ の安全側の程度は、 $a$ が大きくなるにつれて増大し、計算法としては適切でないと判断される。
- ③  $K_3$ は、常に安全側の値を与える。その程度は、 $a$ が大きくなると増加する。地盤の非均質性の影響は、 $K_{TH}$ と同程度になっている。



(a) 荷重伝達法 (b) 理論解 (c) ばねモデル①②③

図-1 計算法のモデル

"Load-settlement analysis of bored precast nodular piles (Part 3: simplified methods for calculating spring constants at pile head)", H. Hirayama, S. Kanai & R. Kihara (GEOTOP Corp.)

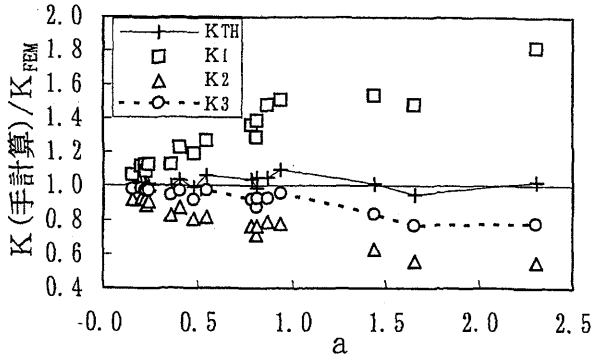


図-2 K(手計算)/K<sub>FEM</sub>-a 関係

以上のことから、杭頭ばね定数の手計算の方法として、理論解による $K_{TH}$ と、ばねモデル③による $K_3$ が、実用の可能性があると考えられる。しかし、 $K_{TH}$ には地盤の非均質性の影響、 $K_3$ にはそれに加えて、杭と地盤を分離した簡易モデルと実際との差の影響がある。そこで、次章でこれらの影響を修正する方法を考察する。

#### 4. 修正計算法

##### 4.1 地盤の非均質性の影響に対する修正

周面抵抗は、図-3(a)のB-B線のように深さとともに増加するのが一般的である。しかも、実際にはかなり不規則である。 $K_{TH}$ と $K_3$ では、A-A線のように一定と仮定している。 $K_{TH}$ と $K_3$ における地盤の非均質性の影響は、図-2の実線と破線の形から分かるように、非常に相関性が良く、しかも同程度であるので、簡潔なばねモデル③でその影響を修正する方法を検討してみる。

A-A型、B-B型の軸力分布は、図-3(b)のようになる。ばねモデル③では、A-A型の分布を仮定して軸力の平均値を決め、(5)式の $r$ を定義している。B-B型の場合の軸力の平均値の安全側の値として杭中央での軸力値を用い、 $r$ を定義し直したものを $r_{mod}$ とすると、次式のようになる。

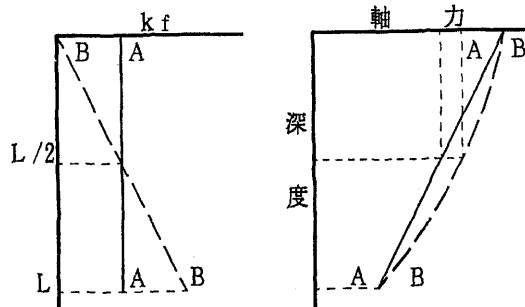
$$r_{mod} = (K_b + K_f - K_{fu}) / (K_b + K_f) \quad (10)$$

ここに、 $K_{fu}$ は杭頭から杭中央までの $K_f$

$r$ の代わりに $r_{mod}$ を用いて、(8)式の $K_3$ を修正したものを $K_{3r}$ とすると、次式のように表される。

$$K_{3r} = a K_p / (1 + r_{mod} a) = R_{mod} K_3 \quad (11)$$

ここに、 $R_{mod}$ は、非均質性の影響に対する修正減少係数に相当するもので、次式で表される。



(a) 周面抵抗の分布タイプ (b) 軸力の分布

図-3 非均質地盤のモデル

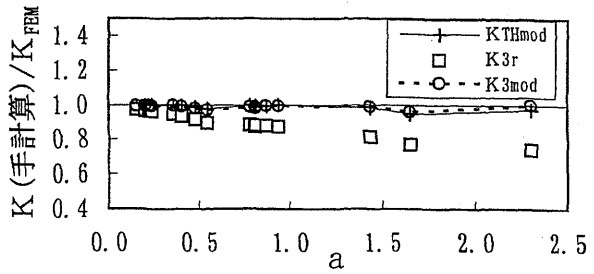


図-4 K(修正手計算)/K<sub>FEM</sub>-a 関係

$$R_{mod} = (1 + r a) / (1 + r_{mod} a) \quad (12)$$

なお、 $R_{mod} > 1.0$  の場合は、安全のために $R_{mod} = 1.0$ とする。

ばねモデル③に対して考察した $R_{mod}$ を、理論解にも適用して、(4)式の $K_{TH}$ を修正したものを $K_{THmod}$ とする。

$$K_{THmod} = R_{mod} K_{TH} \quad (13)$$

$K_{THmod}/K_{FEM} \cdot K_{3r}/K_{FEM}$ と、(9)式の $a$ の関係を図-4に示す。図-2と比較すると、 $K_{TH}$ における非均質性の影響は、 $R_{mod}$ を乗じることにより、非常に良い精度で安全側に修正されることが分かる。また、 $K_{3r}$ の分布も、滑らかなものになることが分かる。

##### 4.2 ばねモデル③の実際との差に対する修正

図-4において、 $K_{3r}/K_{FEM}$ の値は全体に $K_{3r}/K_{FEM} = 1 - 0.13a$ の線よりも下にあるが、 $a$ の大きい場合はこの線よりも上にある。そこで、逆数 $K_{FEM}/K_{3r}$ と $a$ の関係をしてみると、分布がより直線状になり全体に $K_{FEM}/K_{3r} = 1 + 0.15a$ よりも上に位置するようになる。この近似式は、(4)式と(8)式の比較によって、 $K_f > K_b$ ならば妥当なものであることが、理論的にも説明できる<sup>2)</sup>。

そこで、ばねモデル③の実際との差に対する修正増加係数として、

$$I_{mod} = 1 + 0.15a \quad (14)$$

を導入して $K_{3r}$ を補正し、次式で $K_{3mod}$ を計算する。

$$K_{3mod} = I_{mod} K_{3r} = I_{mod} R_{mod} K_3 = (1 + 0.15a) a K_p / (1 + r_{mod} a) \quad (15)$$

$K_{3mod}/K_{FEM}$ の値も図-4に示したが、 $K_{3mod}$ は $K_{THmod}$ とほとんど一致する。 $K_{THmod}/K_{FEM} = 0.95 \sim 1.00$ (平均0.99)、 $K_{3mod}/K_{FEM} = 0.96 \sim 1.00$ (平均0.99)となり、高精度でかつ安全側のものとなっている。

したがって、 $K_{THmod}$ 、 $K_{3mod}$ と実測との対応は、(その2)の図-2(b)の線形解析とほとんど同じになり、両者は $(0.8 \pm 0.2) K_v$ (実測)の範囲の値を与える。

#### 5. まとめ

理論解を修正した(13)式と、ばねモデル③を修正した(15)式は、高精度の解を与える。(13)式では関数電卓が必要であるが、簡便であるので、両者で計算すれば検算も兼ねられる。

##### 参考文献

- 1) 例えば、横山幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，pp. 147-152，1977。
- 2) 平山英喜：杭頭鉛直ばね定数の簡便計算法，土木学会第52回年講Ⅲ，1997(投稿予定)