

杭の摩擦抵抗に関する一算定法

On estimation of frictional resistance of piles

あ かわ たけ し*
阿 河 武 志*まえ だ と き はる*
前 田 都 喜 春*

1. はじめに

一般に、杭周面摩擦力の算定は原位置地盤の相対密度を端的に表す N 値を用いて計算が行われている。しかし、地盤評価を N 値のみに置き換えることの問題点はこれまで多くの人が言及していることであり、特に、その利用性に関しては目的に応じた選択性¹⁾を持つことの重要性が指摘されている。このような背景に立って、杭の周面摩擦力と N 値の関係を追求してみると、すべてを N 値に頼る現状の算定方法にはいくつかの不合理が発見されてくる。

まず阪口²⁾は、砂質土を対象とした打込み杭において、 N 値を用いてある程度の精度 $\left\{f = \frac{N}{5} + (3 \sim 6)\right\}$ によって周面摩擦力は算定できるが、場所打ち杭、埋込み杭に関しては問題点が多いことを指摘している。酒井ら³⁾は、場所打ち杭を施工法別に分類したところ次のような特徴を得た。すなわち、①リバース工法は、粘性土の場合に N 値が同一であっても根入れが深くなると周面摩擦力は大きく現れるが、砂質土の場合には N 値が20～40の範囲で小さな値になる。②ベント工法では、粘性土、砂質土ともに極端に安全側の値をとる。③アースオーガー工法では、粘性土、砂質土ともに N 値の大小にかかわらず周面摩擦力は $f=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の小さな値になることが示された。これらのことから、周面摩擦力と N 値の関係はある広がりをもった解釈が必要となり、一概には決定できない不確定要素の多いことが指摘された。一方、小林⁴⁾は、粘性土を対象にして打込み杭について言及し、 N 値から周面摩擦力を求めることの不合理性を指摘している。更に藤田⁵⁾は、荷重～沈下量曲線の関係において、周面摩擦力に関する二つの地盤定数を N 値と根入れ長さによって比較した結果、根入れ長さによる精度が良好な事実をつかんだ。これは、周面摩擦力は有効応力に関する要素が強いため、 N 値よりも根入れ長さの関数で表現した方がより実際に近いことを示唆している。

このように、各種杭(打込み杭、場所打ち杭、埋込み杭)の周面摩擦力は、 N 値との対応関係が明確ではなく、あるばらつきの分布をもった大きな範囲のなかで利用されていることが分かる。いわゆる、 N 値を用いた周面摩擦力の算定は、地盤条件、施工条件によって精度的に信頼できない

状態が生まれていることを意味している。

本研究は、杭の載荷試験結果を用いて、杭周面の変位量とせん断応力の関係から各種杭の周面摩擦力を推定しようとするものである。この結果は周面摩擦力は土かぶり圧と杭頭沈下量の関係による簡単な表示から求めることが可能となり、その精度は N 値式による解、建築規準に比較してばらつきが少なく、実測値との対応関係が優れていることが明らかになった。

2. 載荷試験資料による統計的解析

各種杭の載荷試験結果は、建設省土木研究所、高強度パイル研究会、およびコンクリートパイル協会から収集したものであり、このうちからひずみ計測を行った資料82件を抽出して、山肩⁶⁾と同一の方法によって各種杭を杭径、根入れ長さ、施工法別に整理、分類した。

$$\begin{cases} \text{大口径杭: } d \geq 0.7 \text{ m} \\ \text{中口径杭: } d = 0.6, 0.5 \text{ m} \\ \text{小口径杭: } d \leq 0.45 \text{ m} \end{cases}$$

ただし、 d : 杭径

(a) 打込み杭について

打込み杭の分類結果は表—1に示し、資料数15件、先端形状はすべて閉端である。表—2は根入れ深さの分布を示し、その平均深さは22.1m、地下水位はすべて存在している。

(b) 場所打ち杭について

場所打ち杭の分類結果は表—3のようになり、資料数41件を施工法および口径別に示した。表—4は根入れ深さの分布を示し、その平均深さは22.6m、地下水位は2、3の資料を除いてすべて存在している。

(c) 埋込み杭について

埋込み杭の分類結果は表—5のようになり、資料数26件、先端形状は閉端、開端に分かれた。表—6は根入れ深さの分布を示し、その平均深さは26.45m、地下水位はすべて存在している。

3. 基本方程式

3.1 摩擦力、付着力および周面摩擦力

一般に杭の周面摩擦力 f は次式で示される⁷⁾。

$$f = K \cdot \gamma z \cdot \tan \delta + c a \quad \cdots \cdots (1)$$

*名城大学助手 理工学部土木工学科

表-1 打込み杭の先端形状

	閉 端	計
大 口 径		
中 口 径	5	5
小 口 径	10	10

表-2 打込み杭の根入れ深さ分布

	10≤ <15m	15≤ <20m	20≤ <25m	25≤ <30m	30≤ <35m	35≤ <40m	40≤	平 均
大 口 径	0	0	0	0	0	0	0	0
中 口 径	0	1	1	0	1	2	0	28
小 口 径	6	0	3	1	0	0	0	16.3
計	6	1	4	1	1	2	0	22.1

表-3 場所打ち杭の工法別分類

直 径	アースドリル	ベ ノ ト	リ バ ース	計
φ 1.5m	0	3	0	3
φ 1.2m	3	7	0	4
φ 1.1m	0	1	0	1
φ 1.0m	6	14	1	21
φ 0.9m		2		2
φ 0.8m	4	5	0	9
φ 0.6m	0	1	0	1
計	13	27	1	41

表-4 場所打ち杭の根入れ深さの分布

	5≤ <10m	10≤ <15m	15≤ <20m	20≤ <25m	25≤ <30m	30≤ <35m	35≤ <40m	平 均
φ 1.5m						1	2	42.3
φ 1.2m		1	2			1		20.1
φ 1.1m				1				24.3
φ 1.0m	3	3	2	4	5	3	1	22.1
φ 0.8m	1	2	2	1	1	1	1	20.86
φ 0.9m		2						10.5
φ 0.6m		1						15
計	4	9	6	6	6	6	4	22.16

表-5 埋込み杭の先端形状

	閉 端	開 端	計
大 口 径	0	6	6
中 口 径	9	8	17
小 口 径	0	3	3
計	9	17	26

表-6 埋込み杭の根入れ深さの分布

	5≤ <10m	10≤ <15m	15≤ <20m	20≤ <25m	25≤ <30m	30≤ <35m	35≤ <40m	40≤	平 均
大 口 径	1	0	1	0	0	3	0	0	28.05
中 口 径	0	7	1	4	3	1	2	0	21.5
小 口 径	0	0	0	0	2	1	0	0	29.5
計	1	7	2	4	5	5	2		26.45

ここで、 K :土圧係数、 γ :土の単位体積重量、 z :地表面からの深さ、 $\tan \delta$:杭体周面と土の間の摩擦角、 c_a :杭と土の間の付着力、である。

式(1)において、非粘性土の場合、 $c_a=0$ 、および粘土の

場合、 $\delta=0$ とすれば、各々に対する周面摩擦力 f_1 、 f_2 は、

$$f_1 = K \cdot \gamma z \cdot \tan \delta = K \cdot P \cdot \mu \cdots \cdots (2)$$

$$f_2 = c_a = \sigma_h \tan \delta' = \sigma_v \cdot \tan \delta' = k \cdot P \cdot \tan \delta' = K \cdot P \cdot \beta (3)$$

となる。ここで、 $P=\gamma z$ 、 σ_h :杭に作用する水平方向の有効応力、 σ_v :杭に作用する鉛直方向の有効応力である。

式(2)、(3)を変形すると、

$$\mu = \frac{f_1}{P} = K \cdot \tan \delta \cdots \cdots (4)$$

$$\beta = \frac{f_2}{P} = K \cdot \tan \delta' \cdots \cdots (5)$$

ここで、 μ =摩擦係数、 β =付着力と書くことにした。

一般的に、 $\mu = \tan \phi$ と考えるなら、 μ は摩擦係数となるが、式(4)、(5)には K (土圧係数)が含まれており、杭周面に作用する垂直力を受けているからである。

式(4)の砂質土の摩擦力は、このような表示式の値がいまのところない。また、式(5)の付着力については、Vijayve-rgiya⁸⁾が $\beta=(0.18\sim 0.5)$ 、Burland(バーランド)⁹⁾(表示式は式(5)と同様)が $\beta=(0.25\sim 0.4)$ を提案しているにすぎない。

一方、 K は静止土圧係数～受働土圧係数に分布しており、この値を一概に決定することは困難であるために式(4)、(5)の表示方法を用いた。

このように、 μ 、 β はかなりの幅があるため、設計上この値を決定することは困難である。そこで、 μ 、 β は実測値から求めることにした。解析方法は、周面摩擦力～変位量(杭と地盤)の関係より、変位量1.0cmを基準としたときのゲージ区間ごとの周面摩擦力と平均土かぶり圧を計算した。すなわち、縦軸に式(4)、(5)の μ 、 β を取り、横軸に土かぶり圧を取って両対数紙上にプロットすると、その曲線勾配は次式となる。

$$\mu, \beta = x_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-\alpha} \cdots \cdots (6)$$

ここで、 α =各種杭の勾配係数、 x_0 =係数、 p =平均土かぶり圧(kgf/cm²)、 p_0 =任意の平均土かぶり圧(kgf/cm²)。

いま、便宜上、 $p_0=1.0$ (kgf/cm²)としたときの μ 、 β を x_0 とすると、

$$\mu, \beta = x_0 \left(\frac{p}{1.0} \right)^{-\alpha} \cdots \cdots (7)$$

となる。これによって周面摩擦力は式(7)を式(2)、(3)に代入して、

$$f_1, f_2 = x_0 \cdot p \left(\frac{p}{1.0} \right)^{-\alpha} \cdots \cdots (8)$$

となる。

3.2 周面摩擦力～変位量の関係

一般に周面摩擦力 f はある値に達するまでは変位量 S に比例(弾性領域)し、それ以降は一定値を保つ(塑性領域)ものとして近似される。図-1は実測値とモデル化による $f \sim S$ 関係を示し、この塑性領域 $=S_x$ の値をここでは最

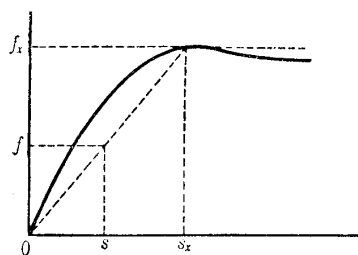


図-1 周面摩擦力～変位量の関係

大は周面摩擦力 f_x とする。すなわち、式(8)は変位量 1.0 cm のときの $f_{1,2}$ を示す式であり、図-1 より、塑性領域 S_x になるためには、0 から S_x までの変位量を推定するために、周面摩擦力～変位量の関係を用いることにより、

$$f_{1,2} = x_0 \cdot P \left(\frac{P}{1.0} \right)^{-\alpha} (S)^n \quad \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。ここで、 $S = \left(\frac{S}{1.0} \right)^{10}$: 変位量の項、 n : 勾配係数、

しかし、実測データから得られるゲージ区間ごとの $f \sim S$ 関係は杭の長方向、および土質条件によって不規則な値をとるため、この近似モデルから変位量の項と勾配係数を決定することは困難である。そこで、全周面摩擦抵抗力 ($Q/2\pi r l$) $f_0 \sim$ 杭頭沈下量 S_0 の関係を用いて、① $f \sim S \div f_0 \sim S_0$ の関係の勾配、② $f_x \div f_{0x}$ が生ずるときの $S_x \div S_{0x}$ の値を求めることにした。すなわち、 $f_0 \sim S_0$ 、 S_{0x} の関係は両対数紙上にプロットして推定する。

4. 解析結果と考察

4.1 勾配係数 n と変位量 S_x

上述の手順によって解析した実測値の $f_0 \sim S_0$ 関係の結果は図-2～4 になる。最大周面摩擦力を与える変位量 S_{0x} は図中に▼印で示した。これによると、打込み杭ではあまり明確に現れていないが、場所打ち杭、埋込み杭では明確に現れている。勾配係数 n は、 n_1 = 初期の $\log f_0 \sim \log S_0$ 曲線の直線部の勾配、 n_2 = 後期の $\log f_0 \sim \log S_0$ 曲線の直線部の勾配とに分けて考え、最終的には両者を平均化した n を一連の勾配係数として求めた。

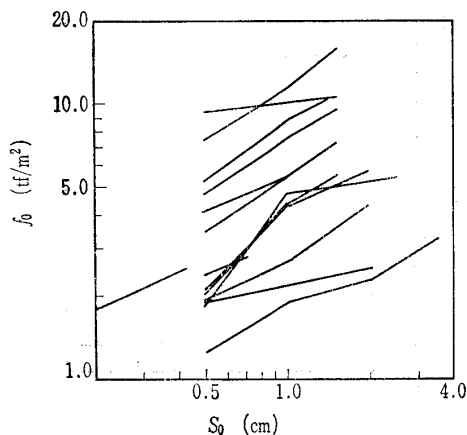


図-2 打込み杭の全周面摩擦力～沈下曲線

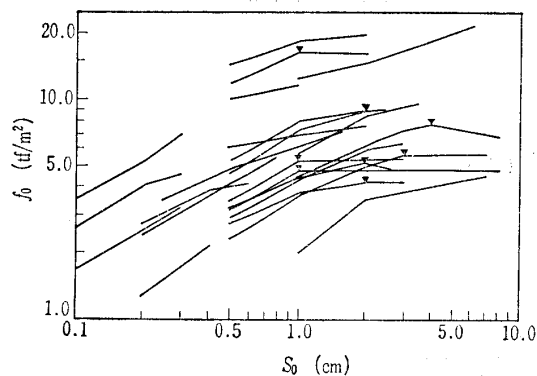


図-3 場所打ち杭の全周面摩擦力～沈下曲線

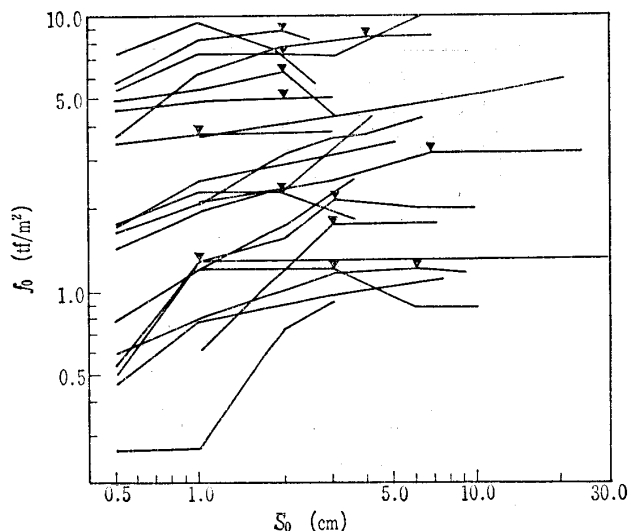


図-4 埋込み杭の全周面摩擦力～沈下曲線

このような考え方によって各種杭の n を決定すると次のようになる。打込み杭では、 $0.2 \leq n \leq 1.2$ および $0.2 \leq n_2 \leq 0.6$ に分布しているため、重みつき平均法によって $n \div 0.5$ を採用した。 S_{0x} の範囲は $1.0 \leq S_{0x} \leq 1.5$ に分布しているため上限値をとって $S_{0x} \div 1.5$ cm とした。同様に場所打ち杭は、 $0.2 \leq n_1 \leq 1.8$ および $0.1 \leq n_2 \leq 0.3$ に分布しているため、 $n \div 0.4$ とした。 S_{0x} は $1.0 \leq S_{0x} \leq 2.0$ より上限値をとって $S_{0x} \div 2.0$ とした。埋込み杭は、 $0.1 \leq n_1 \leq 1.4$ 、および $0.2 \leq n_2 \leq 0.5$ に分布しているため、 $n \div 0.4$ とした。 S_{0x} は $1.0 \leq S_{0x} \leq 2.0$ より上限値をとって $S_{0x} \div 2.0$ を採用した。

これらの結果を整理して式(9)に代入すると、砂質土および粘性土における周面摩擦力～変位量の関係は、

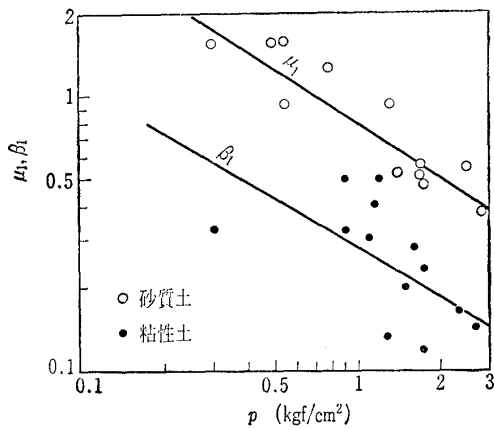
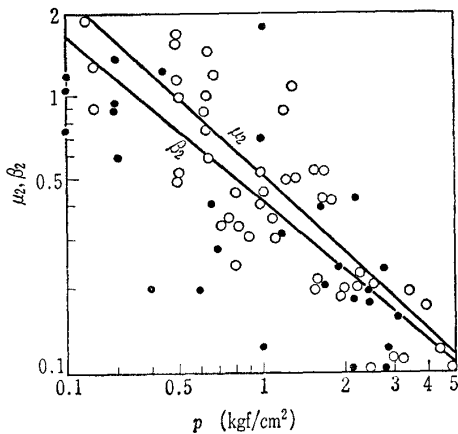
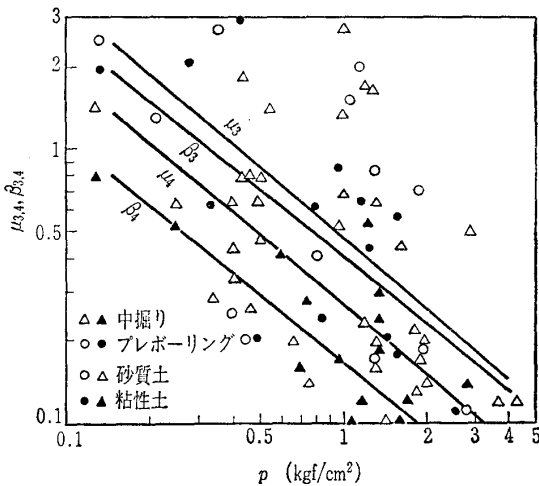
(i) 打込み杭

$$f_{1,2} = x_0 \cdot P(P)^{-\alpha} (S)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (10)$$

(ii) 場所打ち杭、埋込み杭

$$f_{1,2} = x_0 \cdot P(P)^{-\alpha} (S)^{0.4} \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。このとき、式(10)、(11)の S は、周面摩擦力を求める場合の任意の杭頭沈下量 (0 からある値) を意味し、ここでは前述の手順によって求められた値、すなわち、打込み杭は $S_{0x} = 1.5$ cm、場所打ち杭、埋込み杭は $S_{0x} = 2.0$ cm を上限とし、それ以降は一定値として計算する。

図-5 打込み杭の P と μ_1 , β_1 の関係図-6 場所打ち杭の P と μ_2 , β_2 の関係図-7 埋込み杭の P と μ_{3-4} , β_{3-4} の関係

4.2 摩擦係数 μ と付着力 β

実測値から求めた μ , β はそれぞれ図-5～7 のようになり、この図から直線の勾配は次式のように決定される。

$$(i) \text{ 打込み杭 } \left. \begin{aligned} \mu_1 &= 0.8(P)^{-0.7}(S)^{0.5} \\ \beta_1 &= 0.28(P)^{-0.6}(S)^{0.5} \end{aligned} \right\} \dots\dots(12)$$

$$(ii) \text{ 場所打ち杭 } \left. \begin{aligned} \mu_2 &= 0.52(P)^{-0.92}(S)^{0.4} \\ \beta_2 &= 0.42(P)^{-0.82}(S)^{0.4} \end{aligned} \right\} \dots\dots(13)$$

(iii) 埋込み杭

(a) プレボーリング工法

$$\left. \begin{aligned} \mu_3 &= 0.48(P)^{-0.9}(S)^{0.4} \\ \beta_3 &= 0.4(P)^{-0.81}(S)^{0.4} \end{aligned} \right\} \dots\dots(14)$$

(b) 中掘り工法

$$\left. \begin{aligned} \mu_4 &= 0.27(P)^{-0.85}(S)^{0.4} \\ \beta_4 &= 0.16(P)^{-0.82}(S)^{0.4} \end{aligned} \right\} \dots\dots(15)$$

図-5 は打込み杭の μ_1 , β_1 を示し、砂質土、粘性土ともに土かぶり圧の増加につれて減少の傾向をたどり、その範囲は $\mu_1 \div (0.1 \sim 1.5)$, $\beta_1 \div (0.1 \sim 0.6)$ となる。図-6 は場所打ち杭の μ_2 , β_2 でともに μ_2 , $\beta_2 \div (0.1 \sim 2.0)$ の範囲になっている。図-7 は埋込み杭の μ_{3-4} , β_{3-4} で μ_{3-4} , $\beta_{3-4} \div (0.1 \sim 3.0)$ となり、ばらつきが特に大きく表れている。

一方、砂質土に対する土かぶり圧と摩擦力の研究は少なく、現有する資料は鋼管杭について行われているのみである。ここではそれらの傾向を観察するために μ_1 , μ_2 の摩擦力を比較した。

宮本¹¹⁾らは摩擦試験で $D_r > 80\%$, $P = (1 \sim 9) \text{ kgf/cm}^2$, および $D_r = 25 \sim 50\%$, $P = (1.5, 4.5, 6.0) \text{ kgf/cm}^2$ を用いて摩擦力を求めた。図-8 は、宮本らの摩擦試験結果による極限値の沈下量 $S \div 0.3 \text{ cm}$, および著者らの提案式(12), (13)を示した。これによると、宮本の値は相対密度によって摩擦力が異なっており、土かぶり圧の増加につれて摩擦力が緩やかに減少している。前述(3.1)において、式(2)は $\mu = K \tan \phi$ であるのに対して、宮本らは $\mu = \tan \phi$ の違いがある。宮本らの土圧係数 $K = 0.5, 1.0$ 相違点は $D_r > 80\%$

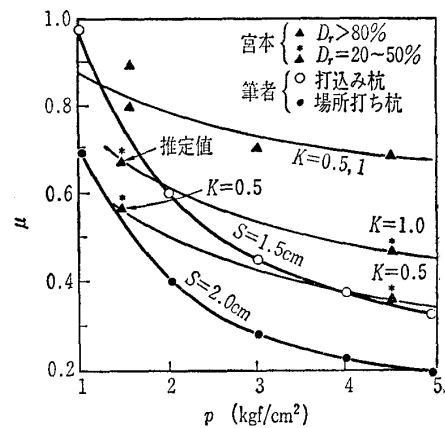


図-8 土かぶり圧と摩擦力の関係

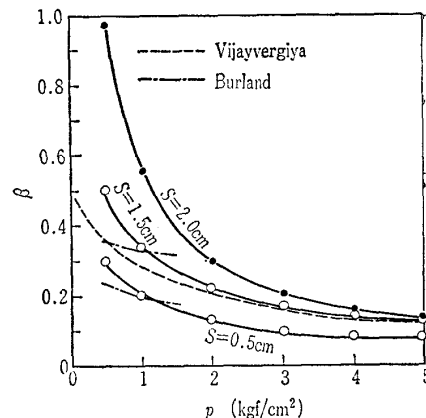


図-9 土かぶり圧と付着力の関係

では K の違いが表れておらず、 $D_r=25\sim50\%$ では K の違いが表れている。

一方、著者らの値は打込み杭 ($S=1.5$ cm), $P=1\sim3$ kgf/cm², および場所打ち杭 ($S=2.0$ cm), $P=1\sim3$ kgf/cm² の範囲では μ の急激な減少を示し、その後は宮本と同様に緩やかな減少を示している。この現象は、中田¹²⁾, 高野¹³⁾らの埋込み杭の先端支持力係数の実験結果と傾向が類似しており興味深いところである。

次に粘性土の付着力の研究について述べる。Burlandは深さ $z=(2\sim14)$ mにおける軟弱粘土に対して $\beta=(0.25\sim0.4)$ を示し、Vijayvergiyaは、 $\lambda=Q_s/(P+2c_u)A_s$ によって求めている。ただし、 λ =摩擦係数、 Q_s =全摩擦力、 A_s =杭周面積、 c_u =非排水せん断強度である。これらの値はすべて打込み杭(ティーパ、鋼管)について示されたものである。図-9は、Vijayvergiya, Burlandの値、および著者らによる式(12), (13)の計算結果を比較した。これによると、提案式の打込み杭はVijayvergiyaの値に良く対応している。

また、Burlandの値は提案式の $S=0.5, 1.5$ cmの上下限に近似している。

4.3 土圧係数 K

一般的に、摩擦力、付着力は $\mu, \beta < 1.0$ の関係が知られているが、4.2では $P=(0.2\sim1.0)$ kgf/cm²の範囲において $\mu, \beta > 1.0$ の結果が現れている。つまり、式(12)~(15)は $K_{\mu 1\sim4}, K_{\beta 1\sim4}$ であるから、土圧係数と摩擦力および付着力の分担の値が異なるためである。そこで、 μ, β を仮定してみても各々を推定してみる。

摩擦力は Winterkorn¹⁴⁾ (ウインターコーン) の飽和した土の内部摩擦角 31° , $\tan \phi = \mu = 0.6$ を用いて沈下量 $S=1.0$ cmの条件で K を計算したのが図-10になる(ここで、縦軸にはすべて水位があるものとして有効応力法、横軸には K で表示した)。これによると、 $P=(0.2\sim1.0)$ kgf/cm²の範囲は受働土圧係数となり、 $P \geq 2.0$ kgf/cm²では $K \approx 0.5$ の静止土圧係数を示し、 $P=2.0$ kgf/cm²以上では主働土圧係数に変化している。

石堂¹⁵⁾は打込み杭の $K\mu=(1+2\eta \tan^2 \phi) (\eta \tan \phi)$, $\eta=$

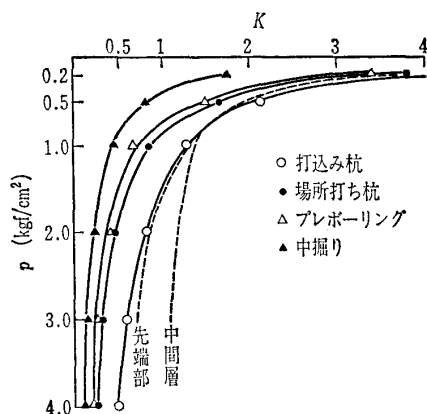


図-10 砂質土の土圧係数

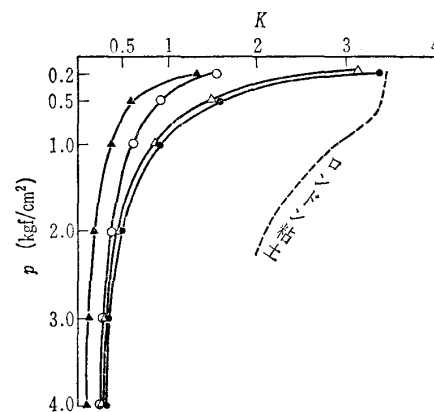


図-11 粘性土の土圧係数

摩擦係数比 $=0.9\sim1.0$ を用いて、Schultze (シュルツ) と Menzenbach (メンツェンバッハ) の $N-P-D_r$ の関係により、図式的に中間層、先端部の周面摩擦力 f を求めている。そこで、この周面摩擦力より K を求めるためには、 $\tan \phi = 31^\circ$ を N 値に換算すると $N \approx 10$, および中間層の $P=(0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0)$ kgf/cm²のとき f を読み取ると $f=(0.4, 0.6, 0.85, 1.45, 2.0)$ kgf/cm²と先端部の $P=(2.0, 3.0)$ kgf/cm²のとき $f=(0.95, 1.35)$ kgf/cm²となり $f=PK\mu$ の式で $\mu=0.6$ を用いて計算値を図中に示した。これに先端部の K は著者らの打込み杭の値に一致している。

図-11は軟弱な粘性土の非排水摩擦角 25° , $\beta=0.47$ を用いて沈下量 1.0 cmとロンドン粘土の K 値を示した。この粘性土の K は砂質土と同様な傾向となり、また、ロンドン粘土は受働土圧係数の値となり曲線の傾向は近似している。

以上の結果から、 $\mu, \beta > 1.0$ になる原因は $P=(0.1, \sim 0.5)$ kgf/cm²の範囲では K が受働土圧係数を示すからである。

4.4 周面摩擦力の算定式

周面摩擦力は式(12)~(15)を式(2)~(3)に代入して次式で示される。

$$(i) \text{ 打込み杭 } \left. \begin{aligned} f_1 &= 0.8 P(P)^{-0.7}(S)^{0.5} \\ f_2 &= 0.28 P(P)^{-0.6}(S)^{0.5} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

$$(ii) \text{ 場所打ち杭 } \left. \begin{aligned} f_1 &= 0.52 P(P)^{-0.92}(S)^{0.4} \\ f_2 &= 0.42 P(P)^{-0.82}(S)^{0.4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

(iii) 埋込み杭

$$(a) \text{ プレボーリング工法 } \left. \begin{aligned} f_1 &= 0.48 P(P)^{-0.9}(S)^{0.4} \\ f_2 &= 0.4 P(P)^{-0.81}(S)^{0.4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

$$(b) \text{ 中掘り工法 } \left. \begin{aligned} f_1 &= 0.27 P(P)^{-0.85}(S)^{0.4} \\ f_2 &= 0.16 P(P)^{-0.82}(S)^{0.4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 f_1 : 砂質土の工法別の周面摩擦力
 f_2 : 粘性土の工法別の周面摩擦力

5. 提案式と N 値式による実測値の比較

周面摩擦力に関する提案式(16)~(19)の評価について、ここ

表—7 砂質土の最大周面摩擦力

施工別 研究者	打込み杭	場所打ち杭	埋込み杭	
			中掘り	プレボーリング
山 肩	0.2N 1~6	0.2N 1~6	0.1N≤5 0.1~3	0.1N≤5 0.1~3
阪 口	0.2N+3 3~9	0.2N+3 3~9		
酒 井		0.5N 0.5~1.5		
吉 成	2.3+0.47N 2.7~16.4	4.75+0.11N 4.8~8	0.09+0.13N 0.2~4	0.32+0.19N 0.5~6
提 案 式	7.9~13.7	6.5~7.4	3.2~4.2	5.7~7.1

(単位: tf/m²)

表—8 粘性土の最大周面摩擦力

施工別 研究者	打込み杭	場所打ち杭	埋込み杭	
			中掘り	プレボーリング
阪 口	(1.25~2.5)N 1.25~10			
山 肩	(1.5~2)N 1.5~8	(1.5~2)N 6~8	N 1~8	N 1~8
酒 井		N 1~20		
吉 成	1.64+1.14N 2.7~24	3.95+0.33N 4.3~10.5	3.67+0.07N 3.74~5	1.64+0.12N 1.7~4
著 者	2.6~5.3	4.9~6.5	1.8~2.5	4.6~6.4

(単位: tf/m²)

では、(1)N値との対応による検討、(2)実測値との対応による検討、の二つによって比較した。

5.1 N値と計算値の比較

各種杭の最大周面摩擦力は、従来のN値による各提案者の値、および式(16)~(19)の結果を集約すると表—7、8になる。ここで、式(16)~(19)は任意の周面摩擦力であるため最大変位量を用いて補正する。打込み杭では $S=1.5$ cm, 場所打ち杭, 埋込み杭では $S=2.0$ cm によって計算した値である。また、表中の他の算定式はすべてN値による表示式であるため、一概に比較できない部分があることから次のように考えた。杭の根入れ深さは前述2.の(a), (b), (c)から平均 $z=(21\sim25)$ m の範囲の上限値 $z=25$ m, および下限値の $z=5$ m として、 $5\leq z\leq 25$ m の範囲を用いた。単位体積重量 γ は、地下水位以上では 1.8 tf/m³, 地下水位以下では 1.0 tf/m³とした。これより、土かぶり圧は $P=(0.5\sim2.5)$ kgf/cm² となる。N値は根入れ深さの平均値を用いると、砂質土では $N=5\sim30$, 粘性土では $N=1\sim20$ の範囲であった。

まず、表—7の砂質土に対しては、打込み杭では提案式の上限值と吉成¹⁶⁾の値が対応しており、場所打ち杭では提案式、山肩¹⁷⁾, 吉成の値に近い値を示すが、酒井³⁾の値は大きく現れている。埋込み杭では提案式の上限值と吉成の値がほぼ一致している。このように、砂質土を対象としたN値式の解は、N値の大小に依存しているため上、下限値の分布が大きくなりやすく、提案式はその分布が小さいことが分かる。

次に表—8の粘性土に対しては、打込み杭では提案式が小さく吉成の値が大きい。また、阪口と山肩の値は近似している。場所打ち杭では提案式が吉成、山肩に比べて少し小さく現れ、酒井の値が最も大きい。中掘り工法では提案式が山肩, 吉成の値より小さめになり、プレボーリング工法では山肩の値に近似している。

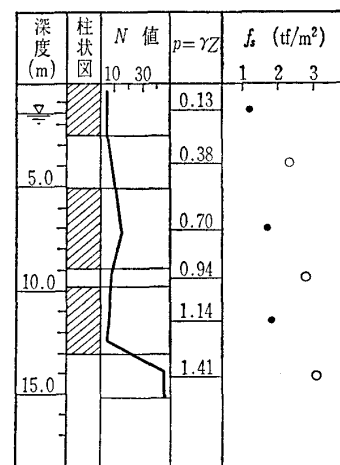
5.2 実測値と計算値の比較

杭の載荷試験結果(前述2の資料)と提案式、および建築規準による3者を比較した。

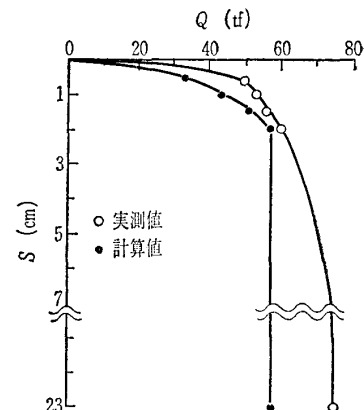
ここで、提案式による計算を示すと次のようになる。1例として、埋込み杭(中掘り工法)の条件は、杭径=50 cm, 根入れ深さ=15.2 m, 杭周長=1.57 m, 水位有り, 最終沈下量 $S=24$ cm である。

図—12は柱状図と杭頭沈下量 $S=1.0$ cm における周面摩擦力〔式(19)による〕を示す。この f 値を用いて区間ごとの層厚をかけると、全周面摩擦荷重、 $Q_f=27.7\times 1.57=43.5$ tf が得られる。これに沈下量 $S=(0.5, 1.0, 1.5, 2.0)$ cm をそれぞれ代入すると、全周面摩擦荷重~沈下量曲線は、 $Q_f=43.5(0.5\sim2.0)^{0.4}$ tf=(33.0, 43.5, 51.1, 57.4)tf となり、これをプロットしたのが図—13である。

また、図—14は実測値によるゲージ区間ごとの周面摩擦応力度~変位量の関係と計算値を示した。計算値はゲージ区間ごとの平均土かぶり圧を用いて、 $z_1=(0\sim8)$ m, $z_2=$



図—12 柱状図と摩擦力



図—13 全周面摩擦、荷重~沈下曲線の関係

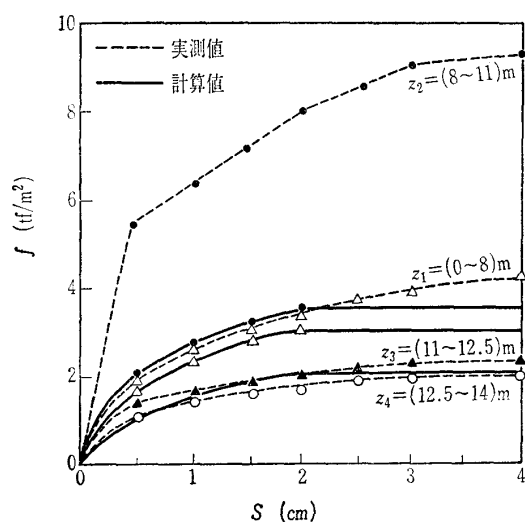


図-14 杭周面摩擦応力度～変位曲線の関係

(8~11) m の範囲では砂質土とし、 $z_3=(11\sim12.5)$ m, $z_4=(12.5\sim14)$ m では粘性土として取り扱った。

以上の結果、図-13の Q_f は計算値と実測値が良く一致しており、図-14の関係では、 z_2 区間において計算値が非常に小さく現れ、 z_1, z_3, z_4 (図中において z_3, z_4 の計算値はほとんど一致しているため実線だけで描いた) の区間では実測値に近似している。

これと同様な方法で他の各種杭の周面摩擦力を順次計算していくが、式(16)～(19)の沈下量は実測値の最終沈下量を用いた。また、全周面摩擦荷重の相関性の検討は x =実測値÷計算値で行った。

打込み杭の相関性は図-15となり、提案式では、標準偏差 $\sigma=0.44$, 平均値 $\bar{x}=1.22$, 変動率 $\sigma/\bar{x}=c=0.36$, 90% の信頼範囲 $(\bar{x}\pm\sigma)=0.78, 1.66$ を示し、建築基準では、 $\sigma=1.05$, $\mu=1.45$, $c=0.73$, $(\bar{x}\pm\sigma)=0.4, 2.55$ となる。

場所打ち杭は図-16となり、提案式では、 $\sigma=0.78$, $\bar{x}=1.46$, $c=0.53$, $(\bar{x}\pm\sigma)=0.68, 2.44$ を示し、建築基準では、 $\sigma=1.69$, $\bar{x}=1.69$, $c=1.0$, $(\bar{x}\pm\sigma)=0, 3.38$ となる。

埋込み杭は図-17となり、提案式では、 $\sigma=0.77$, $\bar{x}=1.18$, $c=0.65$, $(\bar{x}\pm\sigma)=0.41, 1.95$, 建築基準では、 $\sigma=0.55$, $\bar{x}=0.89$, $c=0.62$, $(\bar{x}\pm\sigma)=0.34, 1.44$ となる。

これらのことから、提案式による施工法別にみると、埋込み杭は打込み杭、場所打ち杭と比較するとばらつきが大きくなっている。また、提案式の打込み杭、場所打ち杭は建築基準よりばらつきが小さく現れている。

6. 結論

本研究は載荷試験資料より各種杭の周面摩擦力について解析した。本研究により得られた知見を要約すると次のとおりである。

(1) 周面摩擦力～変位量関係の弾性領域、および弾塑性領域における勾配は、周面摩擦力～変位量÷全周面摩擦荷重～杭頭沈下量と仮定することにより、打込み杭 $(S)^{0.5}$,

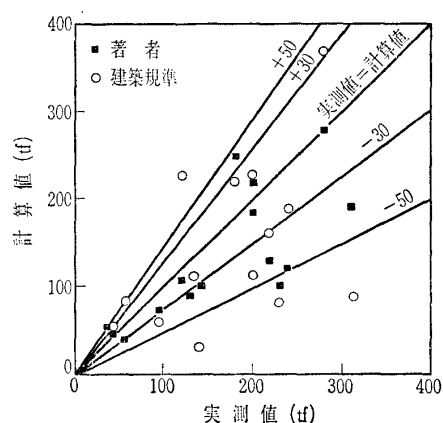


図-15 打込み杭の相関図

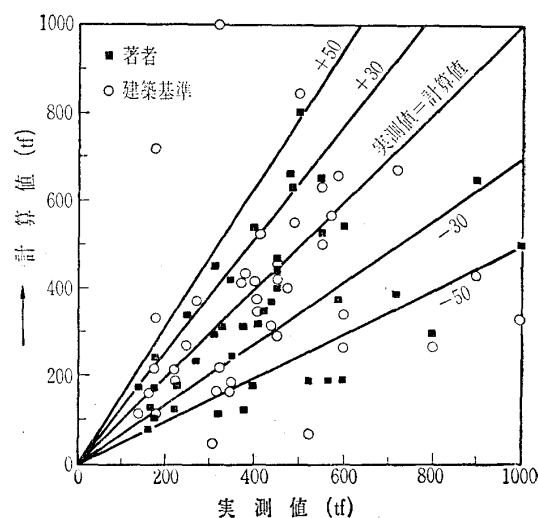


図-16 場所打ち杭の相関図

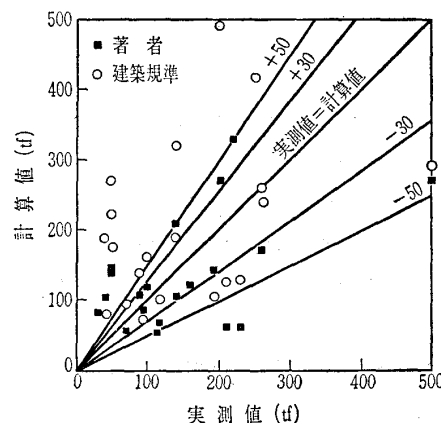


図-17 埋込み杭の相関図

場所打ち杭、埋込み杭 $(S)^{0.4}$ で表される。また、最大摩擦荷重 f_x を与える変位量 S_x は各種杭とも $S_x=(1.5\sim2.0)$ cm の範囲に分布し、これは阪口と同様な結果を示す。

(2) 摩擦力 μ , 付着力 β は、従来あまり究明されていないが、式(12)～(15)を用いればある程度推定することが可能となった。この結果は、 μ, β ともに土かぶり圧 $P=(2\sim3)$ kgf/cm² の範囲で急激に減少している。

(3) 提案式は、周面摩擦力～変位量の関係、および全周面摩擦荷重～沈下量曲線の関係を求めることができる特徴

をもち、杭頭の沈下量で規準する場合には実用的な優れた面をもつ。

(4) 提案式は、各種杭の周面摩擦力を土かぶり圧 P と沈下量 S の簡単な関係によって使用できる特長をもち、この結果は、建築規準の N 値式による解に比較して、ばらつきが小さく、精度的に優れていることが明らかになった。

最後に、周面摩擦力の算定式は著者らが収集したデータのみによって解析したものであり、今後、多くのデータを蓄積することによって更に精度を高めていきたい所存である。

謝辞

本研究において、貴重な載荷試験資料は、建設省土木研究所、高強度パイル研究会、およびコンクリートパイル協会の提供によるものであり、ここに深く感謝の意を表します。また、計算および図面の作成は本学の吉岡聖一君（現、エーシーイーコンサルタント）に多大な協力をいただいた。

参 考 文 献

- 1) 今井五郎：粒状体力学の現状とその応用「砂質地盤力学へのアプローチ」，土と基礎，Vol. 26, No. 9, pp. 67-72, 1978.
- 2) 阪口 理：クイ・ピヤ基礎の設計，施工法の合理化に関する研究，その1，日本住宅公団量産試験場技術研究報告，1969.
- 3) 酒井左武郎・炭谷 稔・安池利二：場所打ち杭の工法別による周面摩擦力と N 値の関係，第36回土木学会年次学術講演会，第Ⅲ部，pp. 600-601, 1981.
- 4) 小林精二：基礎地盤調査の設計への適用，基礎の設計，施工

- ⑨，総合土木研究所，pp. 35-45, 1981.
- 5) 藤田圭一：くいの荷重～沈下量関係の予測方法について，間組研究年報，pp. 1-21, 1976.
- 6) 山肩邦男：各種施工法によるクイの許容支持力，土と基礎，Vol. 23, No. 7, pp. 13-20, 1975.
- 7) トーマス，ホイテカー著，岸田英明訳：杭基礎の設計，彰国社刊，pp. 57-58.
- 8) Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A.: Proceedings, offshore Technology Conference, Vol. 2, pp. 865-874, 1972.
- 9) Burland, J.B.: shaft friction of piles in clay—a simple fundamental approach, Building Research Establishment Cuvent paper CP 33/73, 1973.
- 10) 竹田仁一・立川博之：高速度荷重をうける砂層中の基礎グイの荷重～沈下曲線，第1回土質工学研究発表会，pp. 233-239, 1966.
- 11) 宮本準一・岸田英明・小林一重：高側圧による摩擦係数の変化，第10回土質工学研究発表会，pp. 487-488, 1975.
- 12) 中田一雄・山田清臣・吉長健二：杭の先端支持力と相対密度の関係についての考察，第13回土質工学研究発表会，pp. 785-788, 1977.
- 13) 高野昭信・岸田英明・佐伯英一郎：砂地盤に埋込まれたクイの荷重～沈下特性，第9回土質工学研究発表会，pp. 533-536, 1976.
- 14) Winterkorn: Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Co. p. 561, 1975.
- 15) 石堂 稔：砂中の杭の鉛直支持力に関する基礎的研究，学位論文，pp. 54-65, 227-240, 1974.
- 16) 吉成元伸・木原隆明：杭の施工法別による周面摩擦抵抗と N 値との関係—最大周面摩擦に関する考察，日本建築学会学術講演概要集，pp. 2071-2072, 1978.
- 17) 山肩邦男・富永晃司・大杉富美一：クイの静力学的支持力公式に関する提案，第1報，日本建築学会学術講演概要集，1974. (原受理 1981.10.15)

書 籍 紹 介

「改訂新版 道路工学」

植下 協・加藤 晃 著

道路を新設する場合、合理的かつ経済的な路線選定や幾何学的設計のために、交通量関係の諸調査やその経済的効果に対する調査ならびに環境影響評価のための調査などの知識が必要であり、さらに、これらを快適走行できる道路として供するための舗装技術には、舗装を支える母体としての土工の土質工学の知識も不可欠であります。

したがって、道路工学においては計画工学，交通工学，土質工学などの体系化された専門知識のほかに、舗装技術のように、かなりの部分が経験工学的な知識も要求され、著者は、旧版の序が限られた時間内に広範囲な道路工学を説明するのは容易でないと述べられています。

そこで、植下，加藤両氏がその専門の分野で執筆され初版後10年あまり経た今日、道路に関する技術指針，要綱，政令等が新しく作られたり、改訂されたのを機会に、改訂新版として出版されたのが本書であります。

本書は、日本道路協会の出版物、例えば、アスファルト舗装要綱，コンクリート舗装要綱，簡易舗装要綱，道路維持修繕要綱，道路土工—排水工指針，道路構造令の解説と運用

などから引用されているところから、実務書であり、目次にみられるように、道路の計画，構造設計，施工および維持修繕に至る内容の豊かさから、これから道路関連分野をめざす学生や若い技術者には、よい教科書になると思います。

また具体的内容としては、今日的なものとして環境アセスメントについてや、ブロック舗装，透水性舗装および除雪，路面凍結対策など生活に密着した事項についても触れられており、本書に対する著者の姿勢がみられます。

本書の構成は次のとおりです。

目 次

- | | |
|------------------|--------------|
| 1. 序論 | 2. 道路の調査と計画 |
| 3. 交通の性格 | 4. 道路の幾何学設計 |
| 5. 土工 | 6. 排水と凍上防止 |
| 7. 舗装概論 | 8. 路床，路盤 |
| 9. アスファルト舗装 | 10. コンクリート舗装 |
| 11. 砂利道，防じん処理，歴青 | 12. 道路の付属施設 |
| 路面処理，ブロック舗装 | 13. 道路の維持修繕 |

なお道路工学分野における植下氏は舗装構造の力学に対して、研究なされており、舗装技術の経験学から工学への体系化に期待致します。(平井延次)

B 5 判 264ページ 定価 3,000円
発行所 (株)朝倉書店