

砂質地盤におけるくい基礎の沈下

橋 本 敏 秀*

Settlements of a Pile Foundation in Sand

Toshihide HASHIMOTO*

(Received August 29, 1969)

This paper deduces an analytical theory concerning the method of estimating the settlement of a pile foundation embeded in sand.

In general, sands are classified as good foundation materials, and in most cases allowable bearing pressure on a pile foundation is determined by estimating only the strengths of pile materials or soils surrounding the pile. Nevertheless the detailed knowledge clarifying their statical and dynamical behaviours under load is required to obtain some basic data designing constructions.

A new assumption concerning skin friction and axial resistance against the virtical load will be introduced, and an analytical method to estimate the values of strain and displacement at any depth along a pile shaft is presented with some basic equations. Applying these equations under increasing load, we can also obtain the fluctuation of values by computation. The computed loadsettlement curve may be formed.

Some numerical examples are given, and comparison of the computed values and the results of loading tests shows a fair approximation.

1. 緒 論

本論は砂層におけるくい基礎の沈下量を推定するための一つの解析的方法について述べるものである。

一般に砂質地盤は良好な支持層と見なされる場合が多く、くい基礎の許容耐力は主としてくい材料またはくいに接続する地盤の強度によって決定されていたため、くい基礎の沈下特性、および沈下量の推定方法を追求する必要性が少なかったが、近時くいそのものが長大化して、くい本体の弾性変形量が大きくなってきたこと、また建物柱脚部を必ずしも地中梁によって補剛し得ない大スパン構造物の増加などにより、くい基礎の沈下量あるいはバネ定数の推定値をあらかじめ構造設計の条件とし

て取り入れるべきであると考えられる場合が多くなって来た。

このような場合、載荷試験を行ない、くい体各部の応力測定によって軸圧の分布がわかり、先端沈下量は二重管などで直接測定する事はできるが、これらの実験の方法の結果によって構造設計を修正することには、施工期間との関係で問題を生じやすい。

本論における解析的方法は、くい基礎の沈下量を予測し、構造設計の際の基本的な、かつ実用的なデータを与える為に役立つことを目的としたものである。

くい基礎の沈下に関する理論的研究としては、くい周面摩擦についてすでに Seed および Reese の研究⁽¹⁾ があり、その理論からくい周面摩擦力と変位に関する弾性方程式が立てられている。その後 Kézdi⁽²⁾ や山肩⁽³⁾ に

* 建築学科 (Department of Architecture)

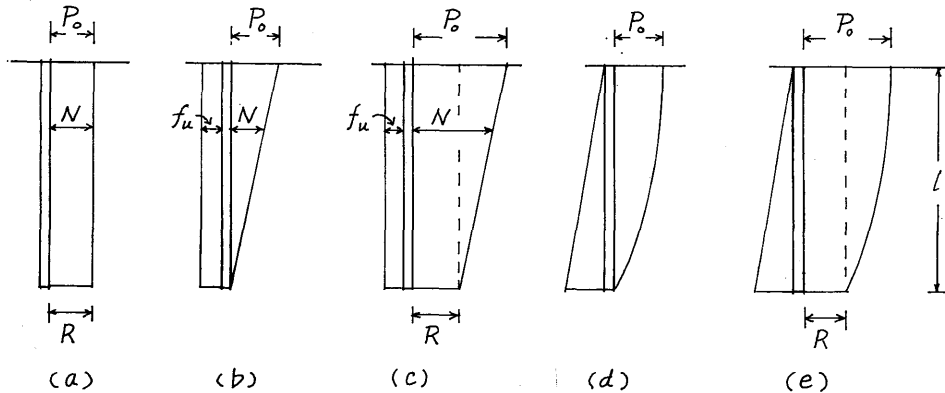


Fig. 1. Types of reactions of pile foundations.

よって一般解が求められ、本論でも摩擦力に関してはこの弾性方程式を出発点とした。

くい先端地盤に関しては、Kézdiの解においてはくい先端は沈下しないものと仮定したため、一般のくい基礎に適用することはできない。山肩の解では地盤反力係数の概念を利用して、各種の地盤に適用できるようにした。この点について本論も同様である。

くい周面摩擦力の分布、および荷重の変動に伴う挙動について今なお解明し得ないことも多いが、山肩は摩擦力和くいの変位との関係を完全弾塑性的なものと仮定することにより解の線形化を計り理論体系を形成したが、実用的段階での解析のむつかしき等のため、一般に普及されるには至っていない。

本論では、くい周面摩擦力の分布に関して近似的な仮定を立て、くい体の弾性圧縮量を推定する基本式を導いて、くい体各部の変位量などを推定することを容易ならしめ、さらに荷重の変動に対応して周面および先端における抵抗の分担比の変動状態を、近似的モデルを用いて推定する方法を提案した。これらにより変動する荷重下におけるくい体各部の変位量（沈下量）の概略値を推定することが容易となった。以下にその理論と若干の計算例を示す。

2. くいの沈下に関する基本的事項

2.1 くい頭荷重に対する抵抗の形式

くい頭荷重 P_0 、くい周面の摩擦による抵抗 F 、くい先端地盤反力 R の3者は次の関係でつらう。

$$P_0 = F + R \quad (2.1)$$

くい体の任意の深さにおける軸力を N_z とすれば、

$$N_z = P_0 - F_z \quad (2.2)$$

ここに F_z は深さ z までの周面抵抗であって、一般に次式であらわされる。

$$F_z = \int_0^z f \psi dz \quad (2.3)$$

記号 f = くいの単位周面摩擦

ψ = くいの周長

f の分布状態および R の有無による抵抗形式によってくいを分類すると Fig. 1 のように区分される。

本論はこのうち (e) を対象とするもので、砂質地盤におけるくいはほとんどこの型に属する。

2.2 くい体の変位に関する基本式

くい体の微小部分 dz の変位について、くいの周面摩擦による軸方向抵抗（以下単に周面抵抗という）とくいの軸圧力との釣合いから導かれた次の微分方程式が知られている。（Fig. 2 参照）

$$\frac{d^2 u}{dz^2} - \frac{f \psi}{AE} = 0 \quad (2.4)$$

記号 u = 深さ z における変位

この式はくい周面抵抗に関する諸問題を解析的に扱うときの手がかりとなるものである。

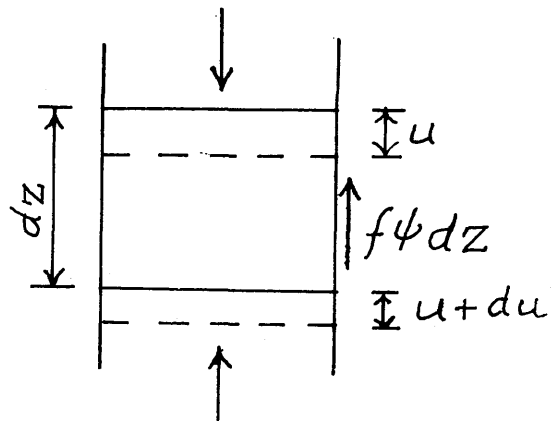


Fig. 2. Equilibrium of the skin friction and the axial compression.

一方、くい先端に関して次の関係が用いられる。

$$u_p = \frac{1}{k_s} \cdot \frac{R}{A} \quad (\text{cm}) \quad (2.5)$$

記号 u_p = くい先端の変位 (cm)

k_s = くい先端地盤の地盤係数 (kg/cm^2)

3. くい周面摩擦による軸方向抵抗の分布

3.1 くい周面摩擦に関する仮定

くいの単位周面に生ずる摩擦の大きさには限度があり、その限度は他の条件が同じならば周面に直角に作用する土圧に比例するものとする。砂質地盤で土の内部摩擦角がほぼ一様な範囲では、土圧はくいの貫入深さに比例することとなるから、このとき深さ z における単位周面摩擦の最大値 f_u は次式で表わされる。

$$f_u = \alpha K_0 \gamma z \quad (\text{t/m}^2) \quad (3.1)$$

記号 K_0 = 土圧係数, γ = 土の単位体積重量 (t/m^3)

α = くい周面と土との摩擦係数

同一のくいで α はほぼ一定と考えられ、かつ $K_0 \gamma$ がほぼ一様な地盤では f_u は単にくいの貫入深さにのみ比例することとなる。

荷重の増加に伴ない、 f はくい頭から下方へ順次 f_u に達して行く。またその下方には未だ f_u に達しない部分がある。本論ではこれら2つの部分を次のように呼ぶこととする。(Fig. 3 参照)

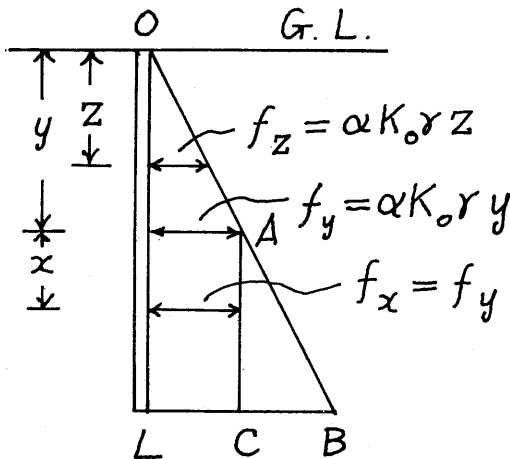


Fig. 3. Distribution of unit skin friction along a pile shaft.

$f = f_u$ なる部分 領域 I

$f < f_u$ なる部分 領域 II

3.2 領域 I における変位の分布

式 (3.1) は領域 I において $f = f_u$ だから、

$$f = \alpha K_0 \gamma z \quad (\text{t/m}^2) \quad (3.3)$$

$$\therefore \frac{f \psi}{AE} = \alpha K_0 \gamma z \cdot \frac{\psi}{AE} = K \gamma z$$

$$\left(\text{ただし } K = \alpha K_0 \frac{\psi}{AE} \right) \quad (3.4)$$

これを式 (2.5) に適用すると、

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = K \gamma z \quad (3.5)$$

境界条件として、くい頭 ($z=0$) における歪を ε_0 とすると、

$$\left(\frac{du}{dz} \right)_{z=0} = -\varepsilon_0 \dots \dots \left(= -\frac{P_0}{AE} \right)$$

記号 P_0 = くい頭荷重

また深さ y (m) における変位を u_y とすると、

$$(u)_{z=y} = u_y$$

を用いると、次の2つの関係式が得られる。

$$\frac{du}{dz} = -\varepsilon_0 - K \gamma \frac{z^2}{2} \quad (3.6)$$

記号 ε_z = 深さ z における歪

$$u = u_y - K \gamma \frac{y^3 - z^3}{6} + \varepsilon_0 (y - z) \quad (3.7)$$

式 (3.7) よりくい頭の変位を求めると、

$$u_0 = (u)_{z=0} = u_y - K \gamma \frac{y^3}{6} + \varepsilon_0 y \quad (3.8)$$

式 (3.8) を用いて式 (3.7) を書き直せば、

$$u = u_0 + K \gamma \frac{z^3}{6} - \varepsilon_0 z \quad (3.9)$$

式 (3.6) から、くい軸方向の歪の分布がわかり、式 (3.7) または式 (3.8) から変位の分布がわかる。

3.3 領域 II における変位の分布

この領域では f は f_u に達していないから、最大値たる f_u を知るだけでは、現実に生じている f を知ることはできないから、何らか他の仮定を利用することを考える必要がある。

くい体の任意の深さにおける変位について山肩⁽³⁾あるいは佐藤⁽⁴⁾は次のような仮定を用いている。

$$f = c_s \cdot u \quad (3.10)$$

記号 c_s = スベリ係数 (t/m^3 などの単位)

この c_s は土圧、載荷速度その他種々の因子に影響されるものと思われているが、それらがどのように影響するかについては未だ明らかでない。ここで砂質地盤のみを対象とした場合には、深さと共に土圧が増大するならば c_s も増大するものと考えられるであろう。しからば f と u との比例関係は、深さに無関係に成立するものではないといえることができる。

そこで近似的な仮定として領域 II においては思い切った簡単化を行ない、 f の大きさは両領域の境界における

値 f_y のまま、領域Ⅱに属する部分に等分布されているものとする。この仮定は後にくい載荷試験におけるくい体各部応力測定結果と対比して検討したところ、一般的に低荷重時（領域Ⅱの範囲が広い場合）において測定による推定値と必ずしも一致しないが、その相違は僅かであって実用を目的とする場合には許容し得るものと認めた。

この仮定を用いるとき、くい軸に沿う f の分布は Fig. 3 における OAC のように表わすことができる。したがって領域Ⅱにおいては式 (3・4) は次のように表わされる。

$$\frac{f\psi}{AE} = K\gamma y \quad (y \text{ は領域境界深さ}) \quad (3 \cdot 4)'$$

したがって式 (3・5) は

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = K\gamma y \quad (3 \cdot 5)'$$

となる。右辺はいずれも定数であるから、

$$\frac{du}{dx} = K\gamma yx + c_1 \quad (c_1 \text{ は積分定数})$$

境界条件 $\left(\frac{du}{dx}\right)_{x=0} = -\varepsilon_y$ を用いると、

$$\frac{du}{dx} = -\varepsilon_y = K\gamma yx - \varepsilon_y \quad (3 \cdot 6)'$$

すなわち ε_y が既知であるとき、深さ y 以下の部分の歪の分布がわかる。さらに、

$$u = K\gamma y \frac{x^2}{2} - \varepsilon_y x + c_2 \quad (c_2 \text{ は積分定数})$$

$(u)_{x=l-y} = u_p$ (くい先端沈下量) を用いると、

$$u - u_p = \frac{K\gamma y}{2} [x^2 - (l-y)^2] - \varepsilon_y [x - (l-y)] \quad (3 \cdot 7)'$$

また $(u)_{x=0} = u_y$ なることから、

$$u_y - u_p = -\frac{K\gamma y}{2} (l-y)^2 + \varepsilon_y (l-y) \quad (3 \cdot 8)'$$

式 (3・8)' を用いて式 (3・7)' を書きなおせば、

$$u_y - u = \varepsilon_y x - \frac{K\gamma y}{2} x^2 \quad (3 \cdot 9)'$$

3. 4 くい体の圧縮量

以上の諸式を利用することにより、くい体の圧縮量は容易に計算することができる。便宜上全圧縮量を δ 、そのうち領域Ⅰにおけるものを δ_I 、領域Ⅱにおけるものを δ_{II} とする。

$$\delta_I = u_0 - u_y = \varepsilon_0 y - \frac{K\gamma y^3}{6} \quad (3 \cdot 10)$$

$$\delta_{II} = u_y - u_p = \varepsilon_y x - \frac{K\gamma y(l-y)^2}{2} \quad (3 \cdot 11)$$

$$\therefore \delta = \delta_I + \delta_{II} = \left(\varepsilon_0 y - \frac{K\gamma y^3}{6} \right) + \left[\varepsilon_y (l-y) - \frac{K\gamma y(l-y)^2}{2} \right] \quad (3 \cdot 12)$$

これらの諸式はくい頭沈下量 (u_0) からくい先端沈下量 (u_p) を推定したり、またその逆の推定をするときに役立つようまとめたものである。

4. くい周面抵抗と先端抵抗との分離

この問題は次の2つの荷重条件に大別して考えることができる。

- i) 周面抵抗が限界値に達しないような荷重時
- ii) 周面抵抗が限界値に達する荷重時

従来の静力学的支持力公式は後者を対象とするものである前者については支持力と直接の関係はないし、またその機構もほとんど説明されていない。これについて本論では沈下に関する解析方法に用いた周面摩擦に関する近似モデルから周面抵抗と先端抵抗との分担割合とその変化を解明し、後に実測値と比較検討した。

4. 1 荷重の増加に対応する周面抵抗の変動

くい周面の f およびこれによる上向きの周面抵抗の分布が一般的に Fig. 3 のようであると仮定したことから、くい全長の周面抵抗は、

$$F = \left(l f_y - \frac{1}{2} y f_y \right) \psi \quad (4 \cdot 1)$$

となり、また $y = \frac{f_y}{f_l} \cdot l$ であるから、

$$F = l f_l \psi \left\{ \frac{f_y}{f_l} - \frac{1}{2} \left(\frac{f_y}{f_l} \right)^2 \right\} \quad (4 \cdot 1)'$$

ここに f_l はくい先端における単位周面摩擦である。くい頭荷重の増加に伴ない $y \rightarrow l$, $f_y \rightarrow f_l$ となり、 F の値は最大値 F_u に達する。すなわち、

$$F_u = \frac{1}{2} l f_l \psi \quad (4 \cdot 2)$$

となるから、 F と F_u との比は次式のようになる。

$$\frac{F}{F_u} = 2 \frac{f_y}{f_l} - \left(\frac{f_y}{f_l} \right)^2 \quad (4 \cdot 3)$$

上式における f_y/f_l と、 F/F_u との関係を図示すると Fig. 4 の (a) 曲線のようになる。この曲線は明らかに放物形である。これを「標準分離曲線」とよぶことにする。

いま $F = F_u$ となったときの、くい頭荷重を $P f_u$ とすれば次の比例関係もまた成立する。

$$P_0 / P f_u = f_y / f_l$$

ゆえに式 (4・3) は次のように書いてもよい。

$$\frac{F}{F_u} = 2 \frac{P_0}{P f_u} - \left(\frac{P_0}{P f_u} \right)^2 \quad (4 \cdot 3)'$$

標準分離曲線はくい頭荷重の直線的な増加に対応して周面抵抗の発展が放物線的であることを示している。勿論すべてのくいが全く同じ法則に従うものとは思われないが、砂質地盤中のくいの挙動を代表するものとした。

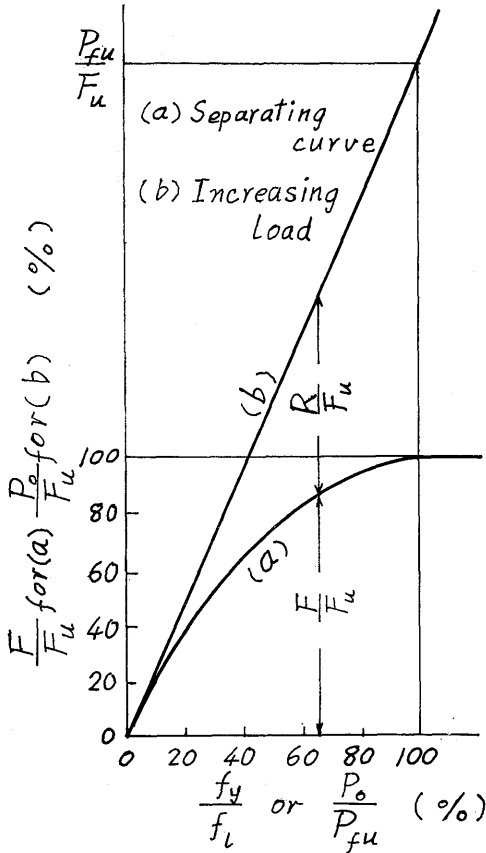


Fig. 4. The theoretical curve separating frictional resistance and subgrade reaction.

— Theoretical curve
 -▲- Measured on a pile ①
 -x- " ②
 -o- " ③

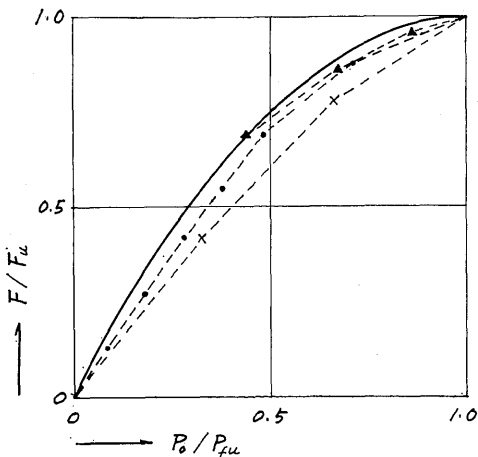


Fig. 5. The theoretical separating curve and actual frictional resistance measured by strain meter.

なお、Fig. 5 には、実際のくい载荷試験における応力測定結果から求めたものを数例記入しておいたが、かなりの近似性が認められる。この実測データを簡単に記しておく。

- ① 東京中野区。PCパイル，800φ，11m.
- ② 静岡県蒲原。同上，600φ，6m.
- ③ 愛知県北岡崎。同上，350φ，25m.

4. 2 標準分離曲線を決定する条件

くい頭荷重 P_0 が P_{fu} に達したとき、すなわちくいの全周面抵抗 F が最大値 F_u に達したとき、式 (2・2) は次のようになる。

$$P_{fu} = F_u + R_{fu} \quad (4 \cdot 4)$$

ここに R_{fu} はくい頭荷重 P_{fu} における先端地盤反力である。

標準分離曲線はこの式中のパラメタのうち2つを定めることにより決定する。

F_u と R_{fu} との比は、地盤条件以外に、くいの断面形、ヤング係数にも関係があると思われるが、現在解明されるに至っていない。そこで载荷試験結果から、あるいは支持力公式等から推定する他はない。支持力公式による先端支持力（先端貫入抵抗）は、 R_{fu} とは同義のものではないが、実験的な方法を取り得ない場合は、 R_{fu} の値として用いることもやむを得ないであろう。

载荷試験を行なう場合には、まず F_u の判定に重点を置いた解析をすべきである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また従来の解析方法によって降伏荷重と判定したものの多くは実は P_{fu} であったということも推察される。

Fig. 4. 1 において直線 (b) は荷重（全抵抗に等しい）の増加を示すものであるから、曲線 (a) との縦距離は R の値を示すこととなる。

5. 変位の分布とその変動

5. 1 解析の順序

さきに仮定した関係 $P_0/P_{fu} = y/l$ において P_{fu} の値が既知となったとき、 P_0 に対応する y の値を求めることができる。そこで P_0 が順次増加される場合にくい体各部の変位と分布とその変動状態を調べようとする。

まず P_0 の各段階に対し y の値を算出する。任意の深さ z の変位量は領域Ⅰの部分 ($z \leq y$) については式 (3・9) から、領域Ⅱの部分 ($z > y$) については式 (3・9)'' から求める。

この順序は最初にくい頭沈下量 u_0 を既知とした場合のものである。

载荷試験が行なわれない場合は最初に u_0 は不明であ

るから、次の関係から先ず u_p から求める。

$$u_p = \frac{1}{k_s} \cdot \frac{R}{A} \quad (\text{cm})$$

記号 k_s = くい先端の地盤係数

u_p をきめれば、 $u_0 = u_p + \delta$ であるから u_0 がわかり、前述の解析順序に従えばよい。 δ は式 (3・12) から求めることができる。

5. 2 定数 $K\gamma$ について

以上に列举した関係式に用いられている定数 $K\gamma$ は実際上どのようにしてきめるかについて述べよう。

K の値は式 (3・4) ただし書により、 α 、 K_0 の K のきを値めてから求めるのも一法であるが、これらの値をきめるには在実実験的手段にたよる他はない。しかし実験的手段を省略しようと思うならば、次のように静力的支持力公式の一部を利用することによって求めることができる。すなわち式 (5・1) において左辺 F_u を静力学的支持力公式等によって求め、右辺に含まれる定数 $K\gamma$ を求めればよい。

$$F_u = \frac{1}{2} f_l \psi l = \frac{1}{2} K \gamma l^2 A E \quad (5 \cdot 1)$$

砂質地盤では、地盤の標準貫入試験結果による N 値を利用する Meyerhof の公式⁽⁷⁾⁽⁸⁾ を利用するのが便利と思われる。しかし周囲抵抗はやや過少評価される傾向があるから注意を要する。

5. 3 計算例 1

くい頭荷重が変動するとき、その荷重に対応するくい頭沈下量 u_0 がわかっている場合に、くい軸に沿う変位量の分布と、その変動状態を知るための計算例を示す。計算の要点は Table. 1 に示し、その結果は Fig. 6 に

Table. 1. Numerical Ex.-1

A) Estimation of Values of displacement.

[Data] PC-Pile, $D=0.6\text{m}$, $\psi=1.88\text{m}$,

$A=0.16\text{m}^2$, $l=5\text{m}$, $E=400,000\text{kg/cm}^2$

$K\gamma=0.00001125(\text{m}^{-2})$

[Values of parameters under each load]

$P_0(\text{t})$	60	120	180
$u_0(\text{m})$	0.008	0.0026	0.0056
$y(\text{m})$	1.667	3.333	5.000
ε_0	0.000094	0.000188	0.000282
ε_y	0.00008	0.000126	0.000141

[Values of displacement u (mm)]

Depth (m)	$P_0=60\text{t}$		$P_0=120\text{t}$		$P_0=180\text{t}$
	$x(\text{m})$	u	$x(\text{m})$	u	u
0	—	0.80	—	2.60	5.60
1.0	—	0.71	—	2.41	5.32
1.667	0	0.65	—	—	—
2.0	0.333	0.625	—	2.24	5.05
3.0	1.333	0.56	—	2.09	4.81
3.333	—	—	0	2.05	—
4.0	2.333	0.62	0.667	1.97	4.59
5.0	3.333	0.495	1.667	1.89	4.43
Notes	$y=1.667\text{m}$		$y=3.333\text{m}$		

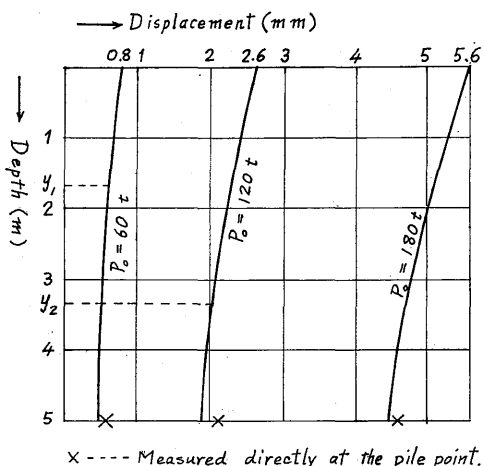


Fig. 6. Numerical example of computed displacement along a pile shaft.

示してある。さらに同じ条件による歪の分布についての計算例を Table. 2 および Fig. 7 に示しておいた。

Table. 2. Numerical Ex.-1

B) Values of strains at each depth. ($\times 10^{-6}$)

P_0	$P_0=60\text{t}$	$P_0=120\text{t}$	$P_0=180\text{t}$
0.0m	94	188	282
1.0	88	182	276
1.667	78	—	—
2.0	72	165	259
3.0	53	137	231
3.333	—	126	—
4.0	34	101	192
5.0	15	63	141

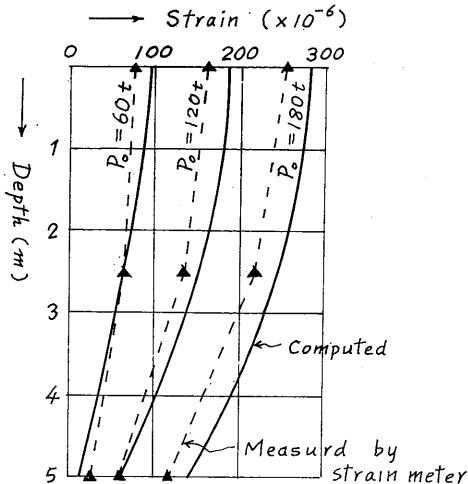


Fig. 7. Numerical example of computed strains along a pile shaft

Fig. 6 においては先端沈下量についてのみ直接測定結果と比較した。また Fig. 7 においては応力測定結果と比較した。後者においては E の評価における誤差 (計算では $E=400,000\text{kg/cm}^2$, 測定では $E=430,000\text{kg/cm}^2$) も含まれている。

6. 荷重—沈下曲線の推定

6.1 くい全体における力のつりあい

くい頭に荷重 P_0 が加えられるとき、くい体に働く軸

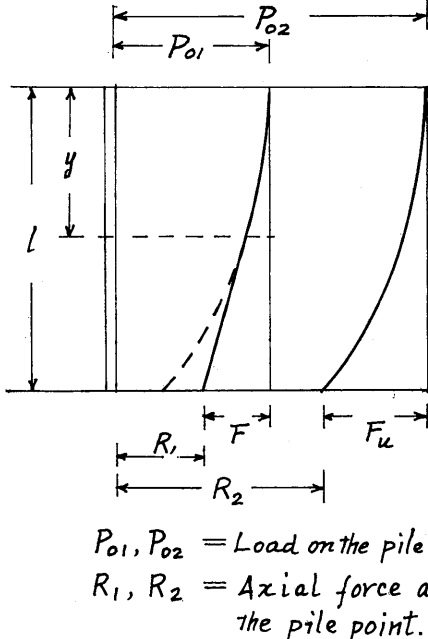


Fig. 8. Axial force and frictional resistance along a pile shaft.

方向圧縮力 N 、くいの全周に発生する摩擦による抵抗 F およびくい先端地盤反力 R の3者のつりあいを Fig. 8 に示す。

F が最大値 F_u に達してのちに R が生じるのではなく、それ以前から、すなわち P_0 が P_{fu} に達する以前から R は生じており、 N と F との分担をきめる曲線は領域 I (上部) においては2次曲線であり、領域 II (下部) においては直線となる。くいの弾性圧縮量を支配するものは軸力 N の分布であるが、これを知るためには通常歪計による応力測定などの実験的方法がとられている。

すでに述べた歪の分布に関する諸式から、軸力の分布を知ることは容易である。しかしながら単にくい頭あるいはくい先端の変位だけを求める目的のときは、くい体の弾性圧縮量を推定する式 (3・10)~(3・11) を利用するのが簡単である。

6.2 荷重と沈下量との関係

式 (3・6) において、深さ $z=y$ では、

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 - \frac{K\gamma y^2}{2}$$

これを式 (3・12) に代入すると

$$\begin{aligned} \delta &= \left(\varepsilon_0 y - \frac{K\gamma y^3}{6} \right) + \left[\varepsilon_0 (l-y) - \frac{K\gamma y}{2} (l-y)^2 - \frac{K\gamma y}{2} (l-y)^3 \right] \\ &= \varepsilon_0 l - \frac{K\gamma y^3}{6} - \frac{K\gamma y l}{2} (l-y) \\ &= \frac{P_0}{EA} l - K\gamma \left[\frac{y^3}{6} + \frac{yl(l-y)}{2} \right] \end{aligned}$$

$$\text{ここに } \delta = u_0 - u_p \quad (6 \cdot 1)$$

上式は $P_0 \leq P_{fu}$ の範囲において成立する。

P_0 が P_{fu} に達した以後においては、くいが全長にわたって領域 I の状態となり、式 (6・1) において $y=l$ とおいた次式が得られる。

$$\delta = \varepsilon_0 l - \frac{K\gamma y^3}{6} = \frac{P_0}{EA} l - \frac{K\gamma y^3}{6}$$

$$\text{ここに } \delta = u_0 - u_p \quad (6 \cdot 2)$$

以上の2式により、任意のくい頭荷重 P_0 に対応するくい体の圧縮量を求めることができ、また u_0 , u_p のうち何れか一方が既知のとき他方を求めることができる。

通常の載荷試験において得た u_0 を用いて u_p を求める場合は、その結果が比較的正確である。それは u_0 の値がすでに先端地盤の沈下特性をも正当に反映しているからである。これに反し、載荷試験を行わない場合は先端地盤の特性について、在来の静力学公式および地盤係数の推定値を利用するため、これらの保有する誤差は本論による解析過程を通じて縮小し得ない。しかしなが

ら実用上要求されるのはむしろ後者の場合が多いので、次に計算例を示し、実際の載荷試験による応力測定結果と対比してみる。

6.3 計算例 2

〔地盤およびくいの条件〕 一地盤は Fig. 9 参照。

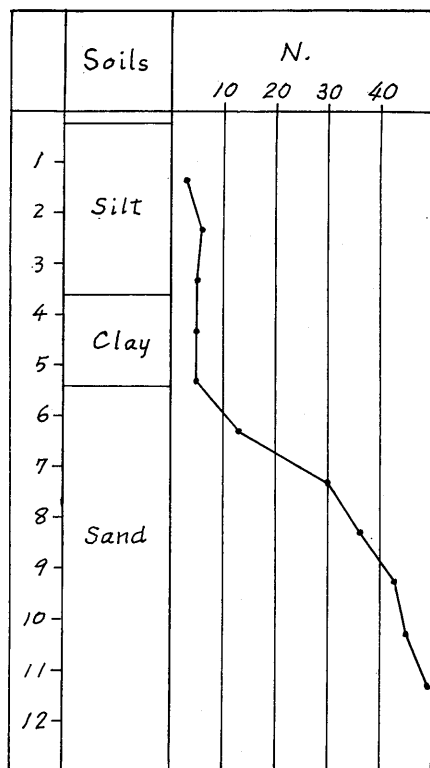


Fig. 9. A Soil profile.

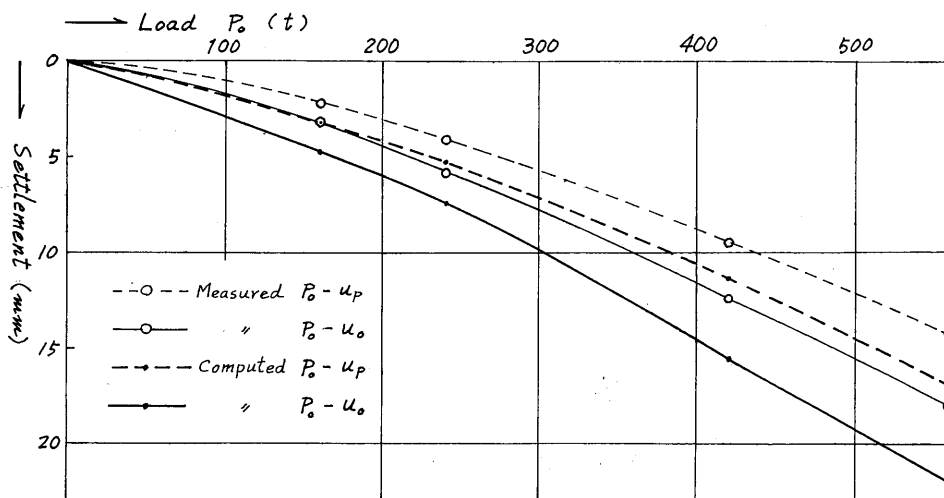


Fig. 10. Load-settlement curve.

C P くい。 $D=800\text{mm}$, $l=11\text{m}$, $A=0.256\text{m}^2$, $E=430,000\text{kg/cm}^2$

〔計算の目的〕 載荷試験を行わずに、 $P^0=160\text{t}$, 240t , 420t , 560t におけるくい頭沈下量 u_o を求める。

〔計算方法および結果〕

地盤の N 値などを資料として次の数値を仮定する。

$F_u=130\text{t}$, $P_{fu}=420\text{t}$, $K\gamma=0.00000194(\text{m}^{-2})$,

$K_s=100(\text{kg/cm}^2)$

くい先端の R , u_p を求めるまでを Table. 3 に示す。

Table. 3. Numerical Ex.-2

A) Determination of R and u_p

$P_o(\text{t})$	160	240	420	560
P_o/P_{fu}	0.381	0.571	1.000	—
F/F_u	0.617	0.816	1.000	1.000
$F(\text{t})$	80.2	106.0	130.0	130.0
$R(\text{t})$	79.8	134.0	290.0	430.0
$R/A(\text{t/m}^2)$	312	523	1129	1680
$u_p(\text{cm})$	0.312	0.523	1.129	1.680

次に δ , u_o を求める。その順序は Table. 4 に示す。

$P_o \geq 420\text{t}$ では $y=l$ とする。

Table. 4. Numerical Ex.-2

B) Determination of δ and u_o

$P_o(\text{t})$	160	240	420	560
$\varepsilon_o (\times 10^{-6})$	144	222	379	505
$y(\text{m})$	4.191	6.281	11.000	11.000
$K\gamma \left[\frac{y^3}{6} + \frac{yl(l-y)}{2} \right] (\text{cm})$	0.0328	0.0396	0.0430	0.0430
$\delta(\text{cm})$	0.1552	0.2046	0.4067	0.5115
$u_o(\text{cm})$	0.467	0.728	1.535	2.192

以上の計算による荷重—沈下曲線を実際の載荷試験結果と比較したものを Fig. 10 に示す。計算順序からも

わかるように、誤差を生ずる最大原因は地盤係数 K_s の仮定の困難さにある。これを地盤の N 値から推定することは現実的ではあるが、 N 値との関係は従来の浅い基礎における提案⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ は役に立たず、藤田の提案⁽¹⁰⁾ する

$$K_s = N \quad (\text{kg/cm}^2)$$

が比較的よい近似値が得られるように思われる。

本論の解析方法自体による誤差は僅かであり、摩擦力の分布に関する近似的な仮定は、実用上差支えないものであることがわかる。

7. 要約および結論

1) 砂質地盤におけるくい基礎の周面摩擦の最大値はおおよそ深さに比例するが、荷重により摩擦が最大値に達している部分（領域Ⅰ）と、最大値に達していない部分（領域Ⅱ）とがあり、後者における摩擦の値およびくい周面抵抗の値は、両領域境界深さの値をとるものと仮定することにより、くい軸に沿う歪、変位の分布およびくいの圧縮量を求める近似理論式を導びいた。

2) くい周面摩擦が荷重の増加に伴ない発展し最大値に達するまでの発展形態をモデル化し、これからくい頭荷重の増加に対応する全抵抗値を周面抵抗とくい先端地盤反力とに分離する方法について提案した。

3) 以上の理論の応用例として、任意の荷重に対応するくい体各部の沈下量、特にくい頭およびくい先端の荷重—沈下曲線を求める方法について述べ、計算例をあげ、実験の結果と対比した。

4) 実験的な手段を用いられない場合、従来の静力学的支持力公式および地盤反力係数を用いるが、後者のデータが深い基礎については現在では乏しく、今後統計的資料の蓄積が望まれる。

文 献

- (1) H.B. Seed and L.C. Reese : The Action of Soft Clay along Friction Piles. ASCE, vol 81, 1955.
- (2) A. Kézdi : Bearing Capacity of Piles and Pile Groups. 4th Intern. Conf. on SMFE.
- (3) 山肩邦界 : 支持杭の沈下に関する理論的考察。日本建築学会論文集, 昭和36. 6
- (4) 佐藤悟 : 基礎杭の支持力機構。土木技術, 昭和40. 1~5.
- (5) Ir A.F. von Weele : A Method of Separating the Bearing Capacity of a Test Pile into Skin-friction and Point-resistance. 4th Intern. Conf. on SMFE.
- (6) 橋本敏秀 : くい基礎の載荷試験に関する研究。中部工業大学紀要, 昭和42. 11.
- (7) G.G. Meyerhof : Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. Proceeding of ASCE., SM1, 1956.
- (8) 日本建築学会 : 建築鋼くい基礎設計施工基準同解説, 昭和38年6月。
- (9) Karl Terzaghi : Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction. Géotechnique, Dec., 1955.
- (10) G.G. Meyerhof : Shallow Foundations. Proceeding of ASCE., SM2, 1965.
- (11) 藤田圭一 : 鋼ぐいの沈下量とその推定について。第3回土質工学会研究発表会講演集, 昭和43年6月。