

実作用荷重下の杭の非線形沈下挙動

横山幸満*

数多くの杭の鉛直載荷試験データの解析から、いわゆる降伏荷重以下の実作用荷重レベルでは、ほとんどの杭が摩擦杭的な沈下挙動をし、周面摩擦力度はその点での杭の変位と非線形関係にあることを確かめた。非線形の支配方程式の次元解析と数値計算によって、荷重-沈下曲線、軸力分布などの無次元表示を行い、実測結果と比較した。1パラメータの簡略な沈下計算法を提案して設計の便を図った。

Keywords : pile, non-linear, friction, subgrade constants, design

1. 序 論

杭の軸方向の極限支持力の評価については既に数多くの研究がなされており、設計実務に有用な設計基準類も各方面で整備されている。この場合の杭の支持力の基本的な考え方は、杭の極限支持力が杭先端地盤によって決まる先端支持力と、杭周面と地盤との間の摩擦力または付着力による周面支持力との代数和であるとするものである。ここでは杭の変形は考慮されず、ケーソンなどと同様に剛体と仮定されるのと等価である。

しかし実際の杭の載荷試験で、杭体にひずみゲージを貼付して杭の軸力分布を求めると、極限状態でも杭先端に伝達される軸力は、極限解析による推定値よりも一般的にかなり小さいことが経験される。後述するように降伏荷重時の杭先端に伝達される軸力は、打込み杭の場合に杭頭荷重の20%程度である。また、BCP委員会の報告¹⁾によれば、先端支持力が完全に発揮されるためには杭径の1~1.5倍程度の沈下量が必要であるとしている。降伏荷重時の沈下量が杭径の5%程度であることを考えると、作用荷重に対して打込み杭はほとんどが摩擦杭として挙動しているものと云える。わが国の従来の杭の支持力評価法が「力」によるものであるのに対して、AASHTOやNew York City Codeに代表される欧米のそれは、全沈下量、塑性沈下量、沈下増分、または沈下量/荷重比など沈下量に基づくものが支配的である²⁾。杭が支持する構造物の機能を考えると、杭径以上の沈下を前提とする極限状態の「力」による評価とは別に、構造物の使用状態に対応した変位による支持力評価も必要である。限界状態設計法が世界的な趨勢であることから、わが国でもそのような研究が盛んになりつつあり³⁾、沈下量/杭径比を基にした設計法も検討されている。

このような考察から、本論文では降伏荷重以下の実作用レベルでの杭の沈下予測を論じることにした。沈下量予測のためには杭体の変形・変位と周面摩擦の発揮度との関係を導入する必要がある、これは通常「伝達関数法」といわれて多くの研究や提案がなされている^{4)~9)}。それらの多くは周面摩擦力度と杭変位との関係が線形弾性または弾-完全塑性を仮定するもので、前者は微小沈下に限定され、後者は2つのパラメータを必要とする。多くの実測ひずみから、これらは明かに非線形関係にあり、設計実務の上からは1つのパラメータでこれまで蓄積された膨大なデータを評価できるのが望ましい。

本文は先に発表した論文¹⁰⁾に解析的考察を付加するとともに、約150個の実測データを統計処理して、実用的な非線形沈下予測法を提案し、地盤常数を統計的に求めたものである。

2. 杭載荷試験の実測例

日本道路公団では湖沼性堆積層が200~400mにわたる山形盆地で表-1に示す杭の短期及び長期載荷試験を実施した¹¹⁾。ひずみ計測から得られた軸力分布の1例としてSP-1杭の結果は図-1に示すようになり、杭先端荷重伝達率は最大荷重時でも9%であった。降伏荷重時の杭頭沈下量は杭種・杭径によらず約10mmであった。軸ひずみを積分して杭体の変位を、軸力を微分して摩擦力度を求めてプロットすると図-2のようになる。図中の曲線は摩擦力度 f_s を

$$f_s = k_s \cdot v^n \dots \dots \dots (1)$$

なる変位 v のべき関数で最良近似したものである。ここに、 k_s は摩擦に関する地盤常数で、 $[tf/m^{2+n}]$ の次元をもつ。この例では $n=0.5$ で最良近似が得られ、 k_s は図-3に示すようにほぼ深さに比例して、 $k_s=5 \cdot x$ であった。ここに x は地表面からの深さ(m)である。

後出の非線形微分方程式(3)を有限要素法による数

*正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科
(〒321 宇都宮市石井町 2753)

表-1 山形杭載荷試験諸元¹¹⁾

Pile No.	SP-1	SP-2	CCP-1	CCP-2
杭種	鋼管杭	鋼管杭	場所打ち	場所打ち
外径 (mm)	812.8	812.8	1,200	1,200
板厚 (mm)	14	12		
根入長 (m)	30.0	22.5	22.5	30.0
軸剛性 (tf)	8.70×10^5	7.25×10^5	2.99×10^6	2.99×10^6
降伏荷重 (tf)	330	200	310	400
伏沈下 (mm)	9.7	9.3	9.0	7.3
極限荷重 (tf)	581	305	550	750
極限沈下 (mm)	43.8	35.5	68.4	61.2

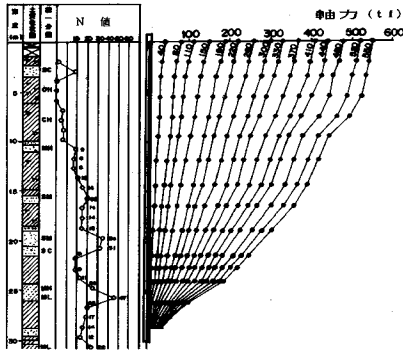


図-1 軸力分布 (SP-1 杭)¹¹⁾

値解析によって杭頭の荷重-沈下曲線を描いた結果が図-4であり、降伏荷重までは実測値と比較的よく合致している。

3. 解 析

摩擦力度 f_s が一般に深さ x と変位 v のべき関数として

$$f_s = k_s(m, n) \cdot x^m \cdot v^n \dots\dots\dots (2)$$

で表されるものと仮定すると、杭の軸方向変位に関する微分方程式は次式で与えられる¹²⁾：

$$(EA)d^2v/dx^2 - Uk_s(m, n) \cdot x^m \cdot v^n = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 EA は杭の軸剛性 (tf) U は周長 (m)、 m と n はともにべき指数、 $k_s(m, n)$ は新たに定義した地盤常数 (tf/m^{1+m+n})である。ただし杭体の断面は一定とした。この方程式の解 v が求めれば、軸力 N_x は次式で計算できる：

$$N_x = -(EA)dv/dx \dots\dots\dots (4)$$

(1) 次元解析

久保¹³⁾が杭の横抵抗で行ったのと同様な次元解析を式(3)及び(4)に適用する。2つの系を添字 p 及び s で表し、長さ x 、変位 v 、軸剛性 EA 及び地盤常数 $U \cdot k_s$ に関する比 R を

$$R_x = x_p/x_s, \quad R_v = v_p/v_s, \\ R_{EA} = EA_p/EA_s, \quad R_{Uk} = (Uk_s)_p/(Uk_s)_s \dots\dots\dots (5)$$

として、それぞれ一定とする。

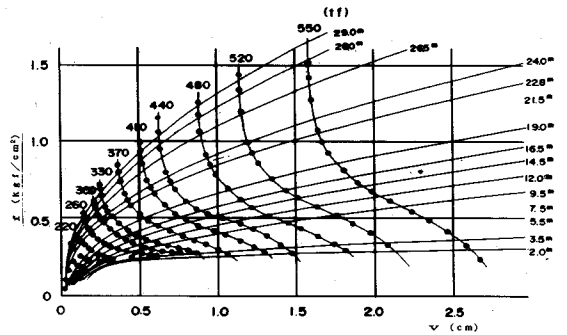


図-2 変位と摩擦力度 (SP-1 杭)

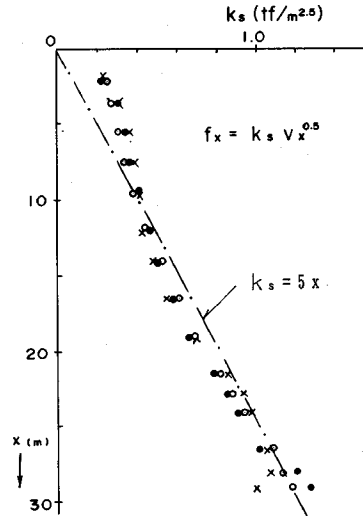


図-3 地盤常数 k_s の深さ分布 (SP-1 杭: $n=0.5$)

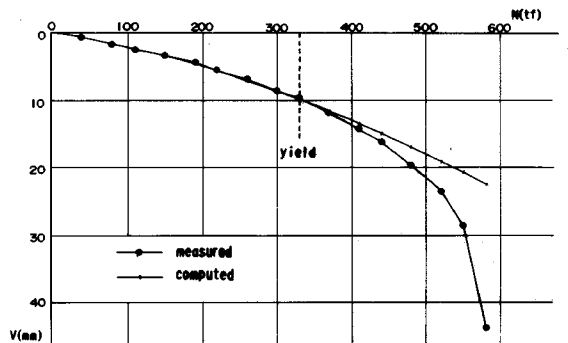


図-4 荷重-沈下曲線 (SP-1 杭)

$$F = U \cdot f_s = U \cdot k_s(m, n) \cdot x^m \cdot v^n \dots\dots\dots (6)$$

と置けば、式(3)と(6)より

$$R_p = F_p/F_s = R_{EA}R_v(R_x)^{-2} = (R_{Uk})(R_x)^m(R_v)^n \dots\dots\dots (7)$$

である。軸力比 $R_N = N_p/N_s$ は式(4)より

$$R_N = R_{EA}R_v/R_x \dots\dots\dots (8)$$

で表されるから、式(7)と(8)より R_x を消去する

表-2 次元解析

m = 0			m = 1	
n = 0	n = 0.5	n = 1	n = 0.5	n = 1
$R_N = (R_{EA} \cdot R_{UK})^{1/2} R_V^{1/2}$	$R_N = (R_{EA} \cdot R_{UK})^{1/2} R_V^{3/4}$	$R_N = (R_{EA} \cdot R_{UK})^{1/2} R_V$	$R_N = (R_{EA}^2 \cdot R_{UK})^{1/3} R_V^{5/6}$	$R_N = (R_{EA}^2 \cdot R_{UK})^{1/3} R_V$
$R_F = R_{UK}$	$R_F = R_{UK} \cdot R_V^{1/2}$	$R_F = R_{UK} \cdot R_V$	$R_F = (R_{EA} \cdot R_{UK}^2)^{1/3} R_V^{2/3}$	$R_F = (R_{EA} \cdot R_{UK}^2)^{1/3} R_V$
$N_0 = \alpha_0^0 / EA U k_s \sqrt{v_0}$	$N_0 = \alpha_0^0 / 5 \sqrt{EA U k_s} v_0^{3/4}$	$N_0 = \alpha_0^0 / EA U k_s v_0$	$N_0 = \alpha_0^1 / 5 [(EA)^2 U k_s]^{1/3} v_0^{5/6}$	$N_0 = \alpha_0^1 [(EA)^2 U k_s]^{1/3} v_0$

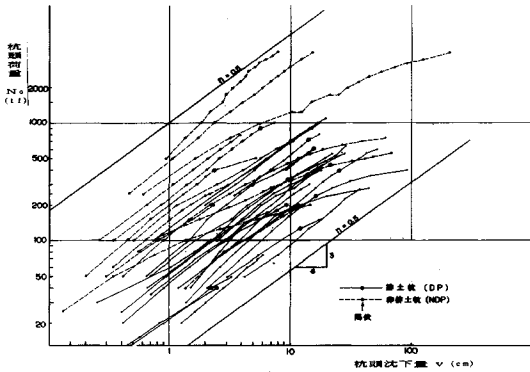


図-5 荷重-沈下曲線の実例

と

$$R_N = (R_{EA})^{(1+m)/(2+m)} (R_{UK})^{1/(2+m)} (R_V)^{(1+m+n)/(2+m)} \dots (9)$$

が得られる。mとnの代表的な値に対するRNを表-2に示す。系sの全ての量を単位1にとって、杭頭(地表面にあるものとする)の荷重N0と沈下v0との関係式を表すと表の下欄のようになる。式中のαmは比例係数である。N0とv0を両対数紙上にプロットすると、m=0及びn=0.5の場合にその勾配は3/4に、m=1及びn=0.5の場合には5/6になる。図-5は幾つかの載荷試験データの荷重-沈下曲線を両対数紙上にプロットしたものである。若干の非排土杭(場所打ち杭)を除いて、降伏荷重以下では概ね3/4の勾配であることが注目される。藤田6)も杭載荷試験のデータを処理して、この勾配が0.71であるとしている。これは式(9)よりm=0としたときのn=0.42に対応する。

(2) 無次元解析

長さの次元をもつTを

$$T = (EA/Uk_s)^{1/(1+m+n)} \dots (10)$$

と定義して

$$z = x/T, w = v/T \dots (11)$$

なる無次元量z,wを導入すると、式(3)と(4)は次のように無次元化される:

$$d^2w/dz^2 - z^m \cdot v^n = 0 \dots (12)$$

$$N/EA = -dw/dz \dots (13)$$

根入れ長をLとしてzmax=L/Tとしたとき、

$$z=0 \text{ で } N/EA = N_0/EA \dots (14)$$

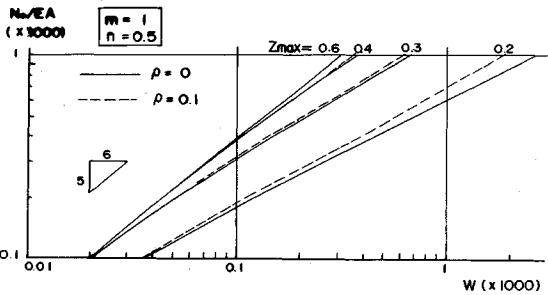
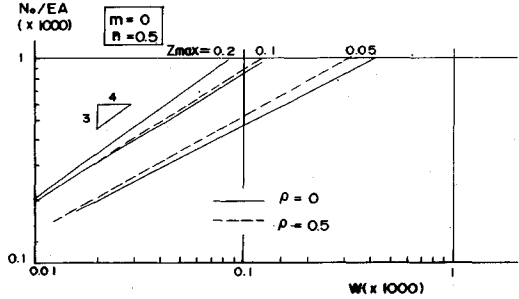


図-6 無次元荷重-沈下曲線

$$z = z_{max} \text{ で } N/EA = \rho \quad (\rho = k_v A_L T^n / EA) \dots (15)$$

の境界条件のもとで式(12)を有限要素解析により繰返し収束計算すればよい。ここに、kv:杭先端地盤の反力係数(tf/m²⁺ⁿ)、AL:杭先端面積(m²)で、ρは無次元である。N0/EAの最大値は降伏荷重に対して実測データから0.001程度である。kvとして藤田6)による最大値100kgf/cm^{2.5}を用いると、m=0, n=0.5のときρ=0~0.5、及びm=1, n=0.5のときρ=0~0.1の範囲である。図-6に無次元荷重-沈下曲線を、図-7に無次元軸力分布を示す。図-4はこれと同様の方法で式(3)と式(4)から計算したものである。

4. 杭の鉛直載荷試験データの統計的性質

1960年代以降、杭の載荷試験に投入された費用と時間は膨大なものであり、蓄積されたデータはわが国の貴重な情報資源といってよい。初期のデータは土質工学会鋼グイ委員会のカードに177件収録され、これらも含めて720件のデータが建設省土木研究所によって整理されている14)。これらの基礎となった載荷試験報告書の中で利用可能な154件のデータを基に、主として沈下に関する項目について統計処理を行った。これらの杭は全て洪

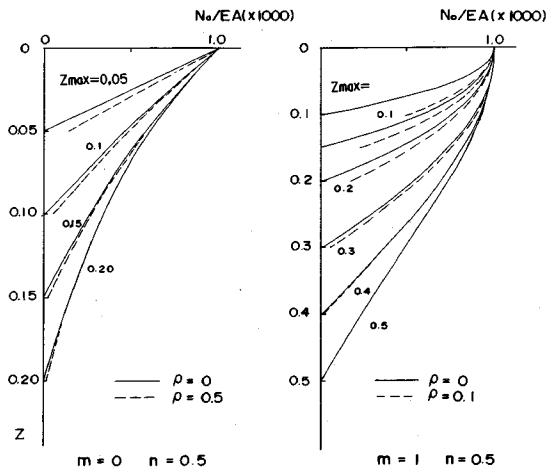


図-7 無次元軸力分布 ($N_0/EA=0.001$)

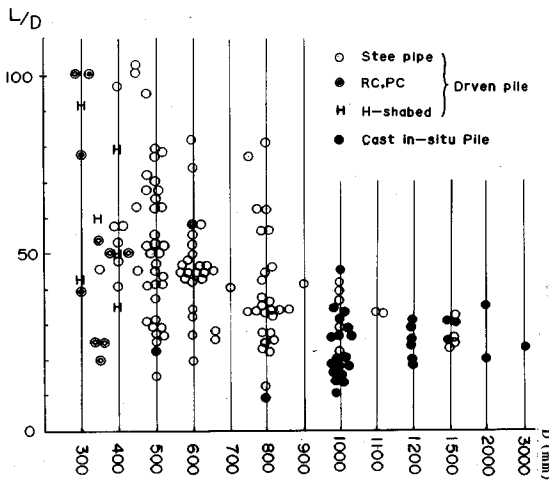


図-8 杭の種別と根入れ長-杭径比 (L/D)

積層またはそれより古い地層に根入れされている。対象とした杭径と種別、及び根入れ長杭径比 L/D を図-8 に示す。

(1) 杭頭荷重の杭先端伝達率

杭体にひずみゲージまたは鉄筋計を装着して杭の軸力分布を求めた載荷試験から、代表的な 23 例について杭頭荷重と杭先端伝達力とを対比して図-9 に示す。最下端のゲージは杭先端から上方 0.5~1 m にセットされるから、図中の先端軸力は必ずしも杭最下端の軸力、すなわち先端支持力を意味するものではない。極限荷重または最大載荷重のもとでの杭先端伝達率は 30% 程度、場所打ち杭の最大で 40% である。降伏荷重に対しては概ね 20% 程度である。摩擦杭として設計された山形の 4 例を除いて、全て支持杭として設計されたものである。最下端のゲージは場所打ち杭の場合にはほぼ先端地盤の反力を表すのに対して、開端の打込み杭の場合は、杭体実質断面の先端反力と杭内外周面の摩擦力による軸力が測

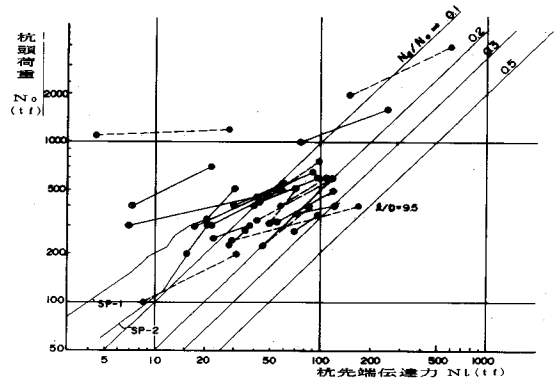


図-9 杭頭荷重と杭先端伝達力

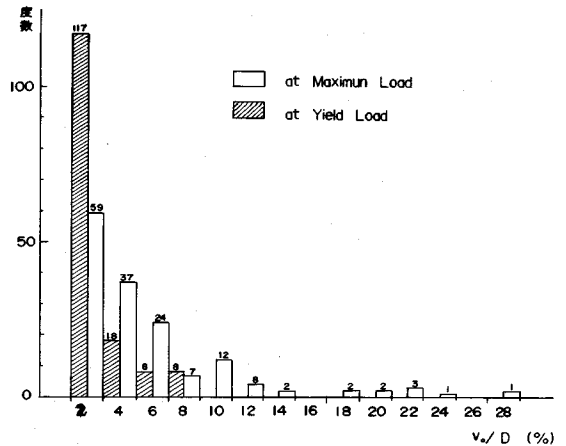


図-10 杭頭沈下量-杭径比 (v_0/D)

定される。この図から降伏荷重以下では、たとえ支持杭とされたものでも摩擦杭の挙動をすることがわかる。

(2) 杭頭の沈下量

図-10 は 154 例についての最大荷重時（極限荷重を含む）と降伏荷重時の杭頭沈下量と杭径比 v/D を整理したものであり、表-3 はそれらの統計値である。実際の載荷試験で v_u/D の最大値は 30% 程度であり、降伏荷重に対しては v_y/D が 8% 以下である。

5. 杭頭沈下量の簡略計算法

(1) 簡略計算式

図-5 から両対数紙上の杭頭荷重-沈下曲線が降伏荷重以下で勾配 0.75 の直線にはほぼ平行なこと、すなわち式 (2) で $m=0, n=0.5$ の関係で近似されること、図-9 から支持杭であっても摩擦杭の挙動が卓越すること、及び降伏荷重での沈下量がおおむね 30 mm 以下であることを考慮して、次の仮定のもとに杭頭沈下量の 1 パラメータによる簡略計算式を導いた。

仮定① 荷重は降伏荷重以下であるとする。現行の設計基準等で予測される極限支持力の 2/3 以下を

表—3 杭頭沈下量

杭種		鋼杭	RC/PC杭	場所打杭
標本数		110	13	31
降伏荷重時	平均 v_p (mm)	13.9	9.9	13.1
	偏差 σ (mm)	6.0	6.1	12.0
最大荷重時	平均 v_k (mm)	35.0	15.2	38.6
	偏差 σ (mm)	22.9	10.0	43.7
v_p/β (%)	平均	2.30	2.77	1.07
	標準偏差	1.26	1.91	0.93
v_k/β (%)	平均	6.22	4.35	3.26
	標準偏差	5.45	3.41	3.37

対象とする。

- ② 杭体は弾性的であり、軸剛性 EA は一定とする。
- ③ 摩擦に関する地盤常数 k_s は深さによらず一定であり、 $k_s(0, n)$ をあらためて k_s とする。すなわち $f_s = k_s \cdot v^n$ が成立つものとする。
- ④ 杭の根入れ長は充分に長く、先端地盤の影響を無視できるものとする。

第3の仮定は $m=1, n=1$ のときの線形解が Airy の関数といわれる変形ベッセル関数解(または無限級数解)となつて、その取扱いが困難であるのに対して、 $m=0, n=1$ のときの線形解が初等関数で表わせることを利用するためである。第4の仮定は半無限長の杭を想定したものであり、杭先端反力がある場合にもその下方に仮定の根入れがあるものとする。

仮定③から式(3)は次のように書ける：

$$(EA)d^2v/dx^2 - Uk_s v^n = 0 \dots\dots\dots (16)$$

ここで $n=1$ の場合の線形方程式の解： $v = C_1 \exp(\alpha_1 x) + C_2 \exp(-\alpha_1 x)$ の第1項は発散解であり、第2項は収束解である。ここに $\alpha_1 = (Uk_s/EA)^{1/2}$ である。収束解は1階の微分方程式： $dv/dx + \alpha_1 v = 0$ を満足する。これとのアナロジーから、式(16)と等価になる1階の非線形方程式を

$$dv/dx + \alpha_n v^{(1+n)/2} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

と仮定すると、これを x で微分したものが式(16)と一致するためには、

$$\alpha_n = (2Uk_s / (1+n)EA)^{1/2} \dots\dots\dots (18)$$

と置けばよいことがわかる。軸力は式(4)より

$$N_x = EA \alpha_n v^{(1+n)/2} \dots\dots\dots (19)$$

で与えられるから、杭頭での荷重-沈下関係は次式で表される：

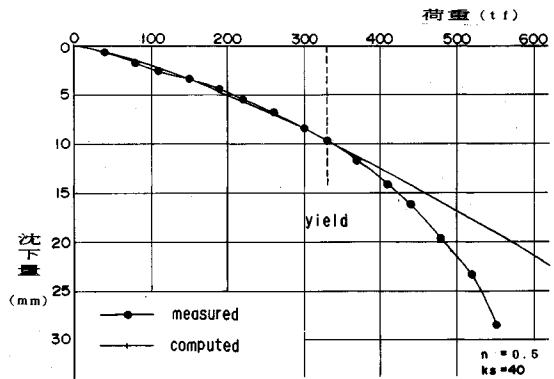
$$v_0 = (N_0 / K_v)^{2/(1+n)} \dots\dots\dots (20)$$

$$K_v = \{ (2 / (1+n)) \cdot EA U k_s \}^{1/2} \dots\dots\dots (21)$$

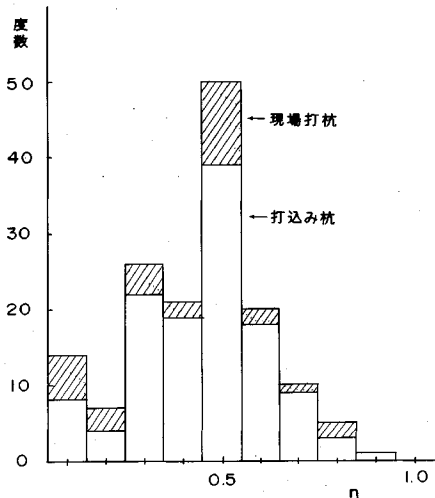
式(17)を $x=0$ で $v=v_0$ の条件のもとに積分すると

$$v = \{ v_0^{(1-n)/2} - (1-n)/2 \cdot \alpha_n x \}^{2/(1-n)} \dots\dots\dots (22)$$

が得られる。したがって、摩擦力度は $f_s = k_s v^n$ で求めら



図—11 簡略計算値と実測値の比較 (SP-1 杭)



図—12 ベキ指数 n の分布

れる。

(2) 簡略計算式の検証と地盤常数 k_s

荷重-沈下曲線の降伏荷重までの実測値を用いて、まづ n を仮定して式(20)、(21)から k_s を逆算し、実測値と計算値の残差平方和が最小になるように n と k_s を定めれば、これが最良近似を与える。この方法を図-1のSP-1杭に適用し、降伏荷重 $P_p = 330$ tf までの9組の (N_0, v_0) に対して残差平方和が最小になる値を求めると $n=0.5$ 及び $k_s = 40 \text{ tf/m}^{2.5}$ が得られた。図-11に実線で示すように降伏荷重までの実測値と簡略計算値とはよく一致している。

$n=0.5$ のとき式(20)から $N_0 = K_v \cdot v_0^{0.75}$ となり、図-5に太実線で示すように降伏荷重以下では勾配は3/4の直線に平行になっている。

前述の154の载荷試験データについて同様の最良近似を行った結果、図-12に示すような n の頻度分布を得た。 $n=0.1$ の14例は沈下量が他よりも大きいのが特徴的で、藤田⁹⁾が指摘しているように沈下計測の問題なの

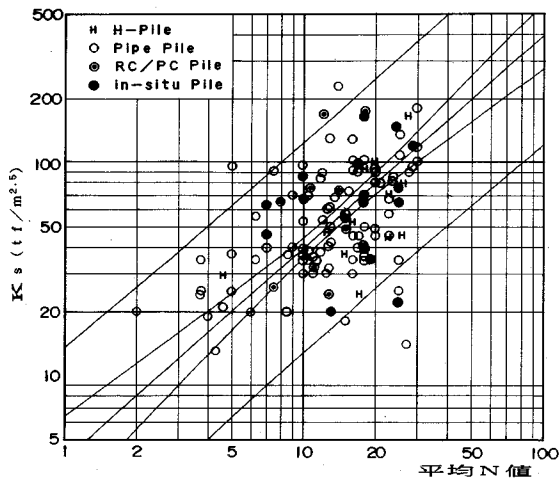


図-13 平均N値と k_s の関係

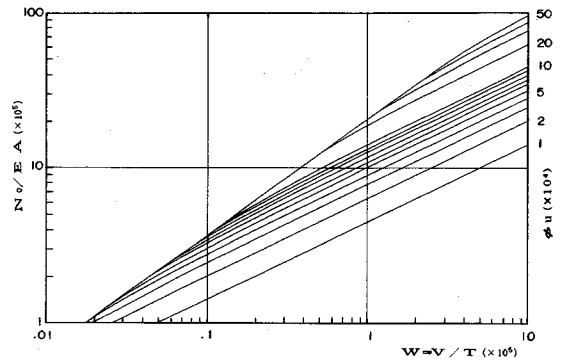


図-15 部分降伏杭の無次元表示

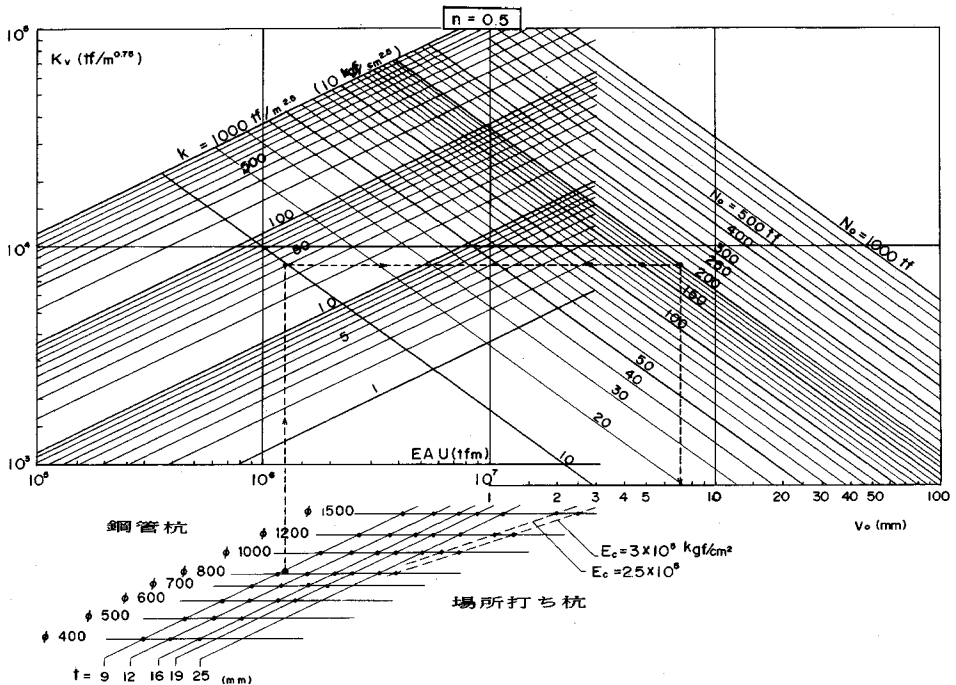


図-14 簡略計算図表

か、杭体の異常なのか明確ではないが、非排土杭の場合には孔壁の応力解放による杭周面摩擦の低下が考えられる。これについては後で考察する。この14例を除いた140例の n の平均値は0.47である($n=0.2$ の7例も除いた平均は0.49)。

設計の便宜上、これを $n=0.5$ として改めて k_s を求め、杭根入れ長にわたる N 値の平均値との関係を示したのが図-13である。これより $k_s=4N$ の関係がえられた。図の内側の双曲線は母平均の95%信頼限界、外側の曲線はサンプルの95%信頼限界である。

式(20)、(21)で $n=0.5$ と置いた式： $v_0=(N_0/K_v)^{4/3}$ ；

$K_v=(4EAUk_s/3)^{1/2}$ の計算図表を図-14に示す。沈下計算のほか、荷重-沈下の実測値をプロットして水平な線上に並べば、 $n=0.5$ に相当する k_s を逆算することもできる。

(3) ベキ指数 n が小さい場合の解釈

設計実務に便利なように1パラメータの非線形計算を採用するために、地盤常数 k_s を深さによらず一定とした。これは通常の正規圧密または軽過圧密地盤で、地表近傍の浅い部分の杭周面摩擦力を過大評価することになる。ここで摩擦力度 f_s が極限強度 f_u に達して行く過程を考察する。無次元パラメータ：

表-4 部分降伏の無次元解析

	非線形弾性	部分降伏 $N_0/EA > 2/\sqrt{3}\phi_u^{3/2}$	
		$0 < Z < Z_y$	$Z_y < Z < Z_{max}$
Z_y	0	$\frac{1}{\phi_u} \frac{N_0}{EA} - \frac{2}{\sqrt{3}} \phi_u^{1/2}$	$(\phi_u = \frac{f_y}{k_s T^{0.5}})$
w_0	$(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_0}{EA})^{4/3}$	$\phi_u^{2/3} Z_y - \frac{1}{2} \phi_u Z_y^2$	$w_y = \phi_u^2$
w	$(w_0^{1/4} - \frac{Z}{2\sqrt{3}})^4$	$w_0 - \frac{N_0}{EA} Z + \frac{1}{2} \phi_u Z^2$	$(w_y^{1/4} - \frac{Z-Z_y}{2\sqrt{3}})^4$
$\frac{N}{EA}$	$\frac{2}{\sqrt{3}} w^{3/4}$	$\frac{N_0}{EA} - \phi_u Z$	$\frac{2}{\sqrt{3}} w^{3/4}$
ϕ	$w^{1/2}$	ϕ_u	$w^{1/2}$

$(Z=x/T \quad W=w/T \quad \phi=f/k_s T^{0.5})$

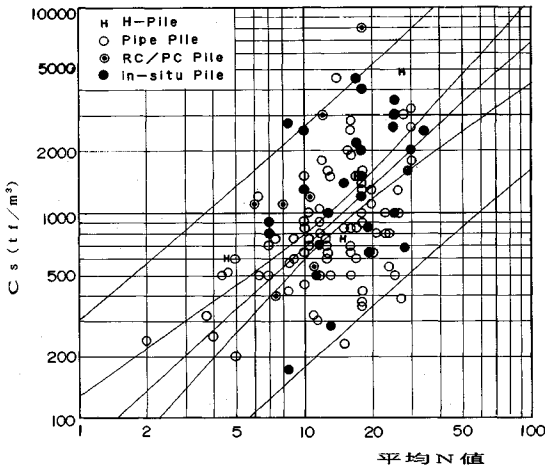


図-16 平均N値とc_sの関係

$\phi_u = f_u / (k_s \cdot T^{0.5}) \dots\dots\dots (23)$

を導入して、式(10)~(13)と同様な無次元解析を $m=0, n=0.5$ の簡略式に適用すると、表-4が得られる。ここに $z_y = L_y/T$ は無次元降伏深さである。荷重-沈下関係を図-15に示す。荷重 N_0/EA が小さい場合の勾配は $3/4$ であるが、荷重の増大につれて部分的降伏が生じてその勾配はほぼ $1/2$ になり、これは $n=0$ に対応する。実際の杭では先端支持力の影響によって $n=0.1$ 程度になったものと考えられる。

(4) 残留沈下量の予測

基礎の室内模型載荷試験で、任意の荷重レベルでの除荷・再載荷曲線が平行で、地盤の初期弾性を表すことはよく知られているが、杭の載荷試験の場合も同様に除荷・再載荷曲線は降伏荷重を越えた荷重レベルでもほぼ平行である。

除荷曲線が杭周面摩擦の弾性挙動を表すものとする、除荷時の杭頭の戻り量 v_0' は式(20)、(21)で $n=1$ と置いて、

$v_0' = N_0 / (EA \cdot U \cdot c_s)^{1/2} \dots\dots\dots (24)$

となる。ここに c_s の次元は $[tf/m^3]$ である。よって残

留沈下量 v_r は $v_0 - v_0'$ で予測できる。図-14と同様な計算図表を作り、除荷曲線の利用可能な123例について c_s を求め、平均 N 値と対比したのが図-16である。載荷試験の途中で除荷は放置時間が短いので、最大荷重からの除荷曲線の弾性戻り量を用いた。

6. まとめ

杭の鉛直載荷試験で、降伏荷重を推定するのに用いられる両対数の荷重-沈下曲線の折れ曲がり部以下の直線部の勾配がほぼ $3/4$ であることに着目して、実作用荷重下での沈下を予測する非線形計算法を提案した。

杭の水平抵抗に関する1パラメータの非線形計算は既に港研方式¹³⁾として実用に供されており、それについて本稿と同様な近似計算法も筆者により提案されている¹⁵⁾。杭の振りの問題も軸方向変位と同じ微分方程式で表わされ、せん断の地盤常数も同じである^{16)~18)}。これによって杭頭の軸方向、軸直角方向、及び振りに関する6自由度の非線形ばね係数が評価できるから、杭基礎、栈橋、ドルフィンなどの杭構造物の3次元非線形解析が可能になる。杭の長期載荷及び群杭効果については別の機会に譲りたい。

終りに杭載荷試験報告書を提供して下さった方々、特に貴重な総合データを御提供頂いた建設省土木研究所基礎研究室の岡原室長と福井主任研究員に謝意を表す。

参考文献

- 1) B.C.P. Committee : Field Tests on Piles in Sand, Soils and Foundations, Vol.11, No.2, p.47, 1971.
- 2) Vesic, A.S. : Design of Pile Foundations, National Cooperative Highway Reserch Program Synthesis of Higway Practice 42, Transportation Research Board, pp.8~12, 1977.
- 3) 岡原美知夫・中谷昌一・田口敬二・松井謙二 : 軸方向押込み力に対する杭の支持特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 418/III-3, pp.257~266, 1990.
- 4) Seed, H.B. & Reese, L.C. : Action of Soft Clay along Friction Piles, Proc. ASCE, Vol.81, No.842, pp.1~28.

- 1955.
- 5) 山肩邦男：支持グイの沈下に関する理論的考察，日本建築学会論文報告集，第 68 号，pp. 89～97，1961.
 - 6) 藤田圭一：くいの荷重-沈下量関係の予測方法に関する研究，(株) 間組特定研究報告，第 1 号，1979.
 - 7) Randolph, M.F. & Worth, C.P. : Analisis of Deformation of Vertically Loaded Piles, ASCE, Vol.104, 1978.No. GT12, pp.1465～1488, 1978.
 - 8) Kraft, L.M., Ray, R.P. & Kagawa, T. : Theoretical t-z Curves, ASCE, Vol.107, No. GT-11, pp.1543～1561, 1981.
 - 9) 桑原文夫：Settlement Behaviour of Non-Linear Single Piles Subjected to Vertical Loads, Soils and Foundations, Vol.31, No.1, pp.39～46. 1991.
 - 10) 横山幸満・堀越豊司・日下部治・前田良刀：摩擦杭（単杭）の沈下予測，第 32 回土質工学シンポジウム-支持杭に頼らない基礎工法-，昭和 62 年度発表論文集，土質工学会，pp. 23～28，1987.
 - 11) (財) 高速道路技術センター：東北横断自動車道酒田線地盤沈下性状および短期載荷試験解析報告書，1982.
 - 12) 横山幸満：沈下特性を考慮した摩擦杭の設計法に関する研究，昭和 61 年度科学研究費補助金研究成果報告書，1987.
 - 13) 久保浩一：杭の横抵抗の新しい計算法，港湾技術研究所報告，Vol. 2, No. 3, pp. 15～22，1964.
 - 14) 建設省土木研究所，(株)建設技術研究所：杭の鉛直支持力に関する安全係数の検討，別冊載荷試験データ集，1988.
 - 15) Yokoyama, Y. : A Non-linear Analysis of Pile Structures, Soils and Foundations, Vol.25, No.4, pp.92～102, 1985.
 - 16) Poulos, H.G. : Torsional Response of Piles, ASCE, Vol.101, No. GT-8, pp.1019～1035, 1975.
 - 17) Randolph, M.F. : Piles Subjected to Torsion, ASCE, Vol.107, No. GT-8, pp.1095～1111, 1981.
 - 18) 横山幸満：杭の振り抵抗の一非線形解析，第 39 回土木学会年講，Ⅲ-165, pp. 329～330，1985.

(1992. 5. 14 受付)

NON-LINEAR BEHAVIOR OF AXIALLY LOADED PILE UNDER WORKING LOAD

Yukimitsu YOKOYAMA

Non-linear settlement behaviour of axially loaded pile under actual working load is studied in this paper based on many loading test data accumulated in our country for these 30 years. Almost all of piles designed as a bearing pile are confirmed to behave as a friction pile due to the finite axial rigidity of pile.

Non-dimensional and numerical analysis of non-linear differential equation governing the frictional behaviour are discussed and compared with test results. Constant of frictional subgrade reaction for the analysis is presented by using SPT-value N. An approximating procedure and a chart for estimating pile settlement are proposed.