

沖積シラス地盤に埋設された杭基礎の支持力と変形に関する研究

安部 洋人*・花園 祐二**・徳富 久二***・徳廣 育夫***

Bearing Capacity and Settlement of Piles in Alluvial "SHIRASU" Soils

"SHIRASU" is a volcanic deposit and is distributed widely in South Kyushu. Plains such as that on which Kagoshima is built have had their natural soil deposits brought by running water. These soil deposits, composed of "SHIRASU" components, are therefore called alluvial "SHIRASU" soil. According to our experience, piles in alluvial "SHIRASU" soils show special skin friction (shaft resistance) characteristics. In this paper, the bearing capacity and settlement of piles in soil are investigated from the results of experiments involving loading tests on the piles. The skin friction of the piles is compared with results derived from calculations based on the architectural code for foundation design.

The results show that the skin friction of the piles in the alluvial "SHIRASU" soil is greater than the value calculated based on the code. Further, it is shown that the skin friction can be estimated from the N-values of the standard penetration test.

1. 序

南九州を中心に広く分布する洪積シラスは、土質工学上特異な性質を有する。またこれがいわゆる沖積シラスとなって運積するとき、他の沖積土層と異なる特性を有する地盤として構成される。洪積シラスの土質力学的特性は弱固結していることと粒子のかみ合わせによって粒状体の性状とは大きく異なることがよく知られるところであり、これらが運積された沖積シラス地盤も特異な力学的性質を有するであろうことが予測される。

沖積シラス地盤における杭の挙動が、種々の杭の載荷試験結果と比較して、通常的设计手法によって判断される挙動とは異なる傾向を示すことからこのことを伺うことができる。

これは、設計手法の要因であるN値が地盤を評価する直接的要因でないことを意味し、その結果として地盤の種類・状態によっては実際の支持力と算定した支持力間に差異が生じるものである。しかしながら杭の設計に用いられる支持力算定においては、バックデータが豊富である理由から、N値を有効な値として用い地盤を評価することが常套手段である。そのため、沖積シラス地盤のような特殊な地盤では、実際の杭の挙動と支持力算定の結果とに差異が生じるものと考えられる。南九州、鹿児

島を中心とする沖積シラス地盤では、安全側にはあるがこの傾向が現れる。

このことを、基礎構造設計の実際から考えるとき、特性が異なっても、現行設計手法による結果と載荷試験による結果とが符合すれば一般に問題にはならないが、載荷試験のそれが大きく出る傾向を示すため、過剰設計を行う。過剰設計によるコストが載荷試験のコストを上回るとき、杭の載荷試験が行われる。したがって、鹿児島市内に建設される建築物の規模が大きくなるにしたがって載荷試験が行われることが多く、それらの資料が多く存在することになる。これらの事実が合理的設計手法で行われていない証左でもある。

本研究は、このように多く存在する杭の載荷試験結果の資料を収集し、これらを解析することによって、沖積シラス地盤の杭の挙動を把握し、基礎構造設計の合理的設計法の確立に寄与することを目的とするものである。

2. 研究目的

本研究は、鹿児島を中心として存在する沖積シラス地盤中の杭の挙動を現行の設計手法が合理的に評価しているものでないとする立場から、杭の載荷試験結果を解析し、妥当な設計手法を統計的に確立することを目的とする研究である。

本報告では、多くの実杭の載荷試験結果を収集し、支持力と変形の関係を整理し、設計手法と比較検討することによって、どの程度の非合理性が存在するかを検討するとともに新しい提案の基礎的問題について検討する。

具体的に述べると、日本建築学会による実用算定法で

平成10年5月31日受理

*博士後期課程物質生産工学専攻

**博士前期課程建築学専攻

***建築学科

ある建設省告示式に対して、沖積シラス地盤における杭の挙動が地盤特性としてのN値に基づく挙動と異なることが種々の載荷試験の結果と比較して考えられる。杭の載荷試験における降伏点および極限支持力とN値から算出される設計値を比較し、その背景について検討するとともにこれらを整理して、沖積シラス地盤における杭基礎の設計案を試算・吟味することで、合理的基礎構造設計の基礎資料の一助となることを期待するものである。

3. 資料収集と整理およびその分類

ここ10年来、鹿児島市内に建設された建築物の規模の増大にともなって試験データが豊富になっていることは先述のとおりである。これらのデータを収集することが第一の目的である。各杭施工および杭試験を行う会社および鹿児島県、鹿児島市からできるだけ多くのデータを収集する。これらのデータは各企業にとって貴重な財産であり、快くデータを提供いただいたことは、学術研究のためとは云え、深く感謝する次第である。

資料はできるだけ多く収集することに努めた。当面の研究目的は、杭先端の地盤が洪積シラスのような比較的支持力のある層に存在する杭を対象とするものではないが、各資料は極めて貴重なものであることから、それらのデータをも併せて収集するものである。

収集されたデータは、基礎形式、杭の施工法、杭材料種類、杭の形状、設計耐力、杭の諸元、標準貫入試験の結果、載荷試験における時間、荷重、杭頭変位の計測結果、杭の各部の摩擦力を計測した測定深さにおける軸力の関係などを載荷試験データから読みとり、データファイルとして保存する。また、このデータファイルは、杭の載荷試験のみならず、平板載荷試験のデータも記録できるように、また標準貫入試験のみのデータも記録できるように整理されている。

収集した資料は98資料であり、そのうち杭先端が洪積シラスなど先端支持抵抗として発揮される杭を除いた52資料を本報告の解析に採用した。

載荷試験の資料を整理する過程において、杭の種類を施工法によって、当面以下のように分類することにした。あまり細かく分類することは各分類に属する資料数が極端に少なくなると、大局が見えなくなることを恐れることによる。

施工種別による分類は

- (1) 打込み杭 (2) 場所打ち杭
- (3) 埋め込み (3.1) 拡底した杭 (3.2) 拡底しない杭
- (4) 中堀杭

の打込み杭、場所打ち杭、埋込み杭と中堀杭の4種類である。埋込み杭は種類が多く、その中を、拡底されたものと拡底されていないものに分けた。

収集された資料には、杭深さ方向の各部にストレインゲージを貼り付け、各部の歪みとコンクリートのヤング係数から各部分が負担する軸力を求める、いわゆる杭周各部の摩擦抵抗を計測した資料も存在するが、その全資料数は少なく、別の機会に解析・報告することとし、本報告では杭頭の荷重と杭頭の変位のみに着目して述べるものである。

4. 杭頭荷重—杭頭変位の関係

収集した資料のうち、先端の支持が沖積シラス地盤であると推定される52資料について、杭の施工種別別に杭頭荷重と杭頭変位の関係を検討する。杭の載荷試験における最大荷重は所定の支持力が得られるときに終了することが多い。そのため後述する極限最大荷重はもとより、降伏荷重までも荷重を作用させないで試験が終了される場合がある。したがって、最大荷重が相当小さい場合や極限荷重まで作用させた相当大きい荷重のものまで存在する。これらを同時に比較するため、荷重を自然対数表示で表すものである。

図1.1は打込み杭の結果である。打込み杭の資料は3例であり、全資料数に占める割合は極めて少なく、近年には施工されていない。ばらつきは小さく、ある種の傾向を示していることが判る。

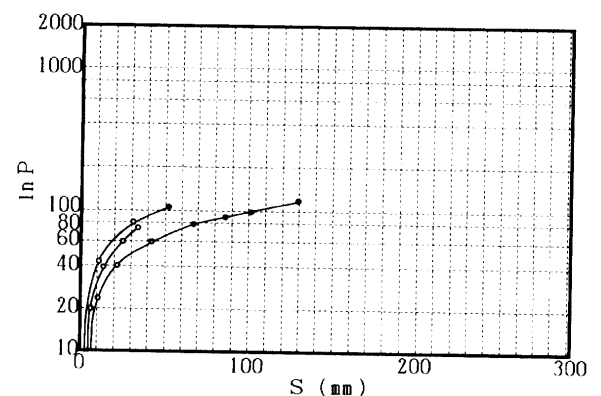


図1.1 打込み杭の杭頭荷重(Pt)－杭頭変位(Smm)関係

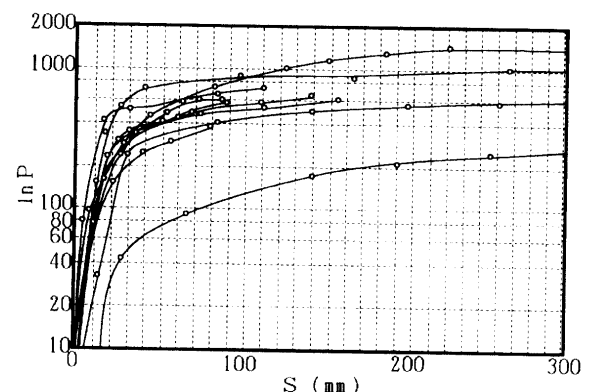


図1.2 場所打ち杭の杭頭荷重(Pt)－杭頭変位(Smm)関係

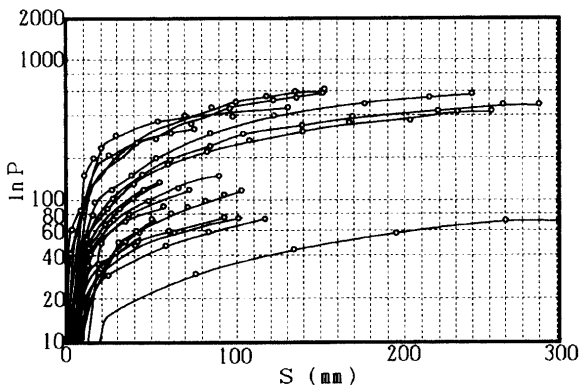


図1.3 埋込み杭の杭頭荷重(Pt)－杭頭変位(Smm)関係

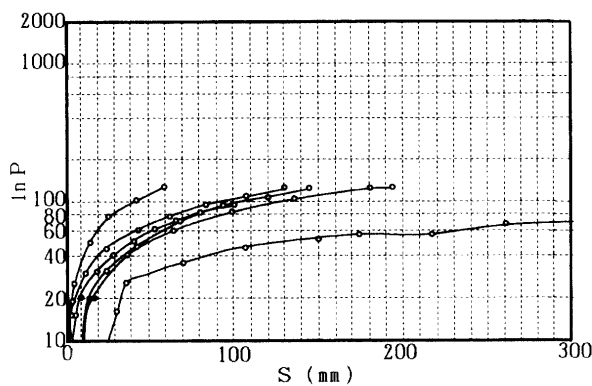


図1.4 中掘杭の杭頭荷重(Pt)－杭頭変位(Smm)関係

図1.2は場所打ち杭の場合である。場所打ち杭は全般に建物規模が大きい、載荷荷重は大きく、また極限荷重付近まで作用させた試験が行われる。他の杭施工法に比べて降伏荷重が明確である。

図1.3は埋込み杭である。埋込み杭の施工例が最も多く、全体の約7割が埋込み杭である。杭径、杭長の種類が多く、施工法の精度、絶対数の多さにもよるが、ばらつきが大きい。図1.4は中掘杭の場合であり、この結果は、他の施工の場合より杭頭荷重と杭頭変位の関係は同一荷重に対する変位が大きく出現する傾向にある。

全体として、杭頭荷重－杭頭変位の関係は場所打ち杭の場合が他の杭より全般破壊型の傾向を示すものの、ある一定の形状（関数関係に整序できる）を呈することが見える。一般に杭先端における支持力は小さいので、中掘杭がその他の杭に比較して、同一荷重に対する杭頭変位が大きく、杭周面摩擦が小さいことを窺わせる。

5. 設計値と載荷実験値の比較および摩擦強度とN値

前述のように、沖積シラス地盤における杭では、載荷試験結果と設計に使用される支持力算出値とは異なり、設計値が小さく見積られることを述べた。このように現れる原因を、摩擦力を計測した載荷試験の結果から想

定すると、杭先端での支持力は小さく、大部分の杭が杭周面摩擦力によって支持されていることを知る事ができる。このことは摩擦力の算出において一般の地盤の杭と沖積シラス地盤の杭とに差異があることを示すものである。現行、設計法による杭支持力算出式は、摩擦抵抗が標準貫入試験のN値によって算出される。沖積シラス地盤においては、土性がシルト質砂に分類されることから、すべての層で砂として分類され、N値によって評価される。

支持力算出式は、公的には建設省告示式が採用される。ここでは粘性土部分はないのでこれを除いて、一般に

打込み杭では、

$$Ra = 1/3 \times [30 \cdot \bar{N} \cdot Ap + 1/5 \cdot \bar{Ns} \cdot Ls \cdot \psi] - W$$

場所打ち杭では、

$$Ra = 1/3 \times [15 \cdot \alpha \cdot \bar{N} \cdot Ap + 1/5 \cdot \bar{Ns} \cdot Ls \cdot \psi] - W$$

埋込み杭では、

$$Ra = 1/3 \times [20 \cdot \bar{N} \cdot Ap + 1/5 \cdot \bar{Ns} \cdot Ls \cdot \psi] - W$$

ここに、

- Ra: 杭の長期許容支持力 (t)
- N : 杭先端支持力を代表する平均N値
- Ns: 砂質層のN値の平均
- Ap: 杭先端の面積 (m²)
- Ls: 砂質地盤中の杭の長さ (m)
- ψ : 杭周面の長さ (m)
- W : 杭の自重（浮力を考慮した） (t)

である。つまり、この算出式では杭周面の摩擦応力度はN値の1/5で評価される。このような評価に対し、建築学会による設計指針では、この評価に1/3を使用することができるとするものであり、告示式より大きく見積られる。また、その他、阪口の提案式 $1/5N + 3$ もある。このように種々の算定式が存在することは、杭周面摩擦応力度が地盤の種類によって異なることを意味するものである。沖積シラス地盤における杭の試験結果と算定式による結果が大きく異なることはこの差異が大きいことを意味し、合理的設計を志向する立場からはこの杭周面摩擦力の評価を確立する必要がある。

ここでは、支持力算定式と載荷試験結果の比較を行い、N値から沖積シラス地盤の摩擦応力度を算定することを目的として、その評価について述べる。

実験値には、降伏荷重、極限荷重に関する結果は表されていない。とくに極限荷重まで実験が行われていることが少ない。したがって、降伏荷重や極限荷重は推定に

よって求める。降伏荷重の推定には、 $\log P - \log S$ 曲線上に表した直線の交点から求めた。極限荷重の推定には、van der Veen による極限荷重の推定法によって求めた。

降伏荷重を推定した例を図2に示す。これは、降伏点付近の荷重-変位関係が指数関数から他の指数関数に変化すると考えられる荷重点を見いだそうとするものである。

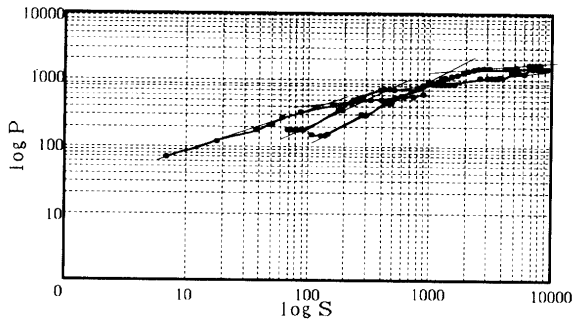


図2 降伏荷重の推定(例)

極限荷重の推定法である van der Veen の方法は、荷重-変位関係全体の形状が次式のように e 関数であると仮定し、

$$P = Pu (1 - \exp(-\alpha \cdot S))$$

$1 - P/Pu = \exp(-\alpha \cdot S)$ から対数を取るとき、縦軸に $\ln(1 - P/Pu)$ 、横軸に S をとるとき直線となるので、 Pu を適当に変化させて、直線とみられる Pu を極限荷重とするものである。図3は極限荷重を求めた例である。

このような方法で降伏荷重の推定と極限荷重の推定を行って、現行設計法および地盤の摩擦力の評価として提案されている算定値について比較検討する。ただし、降伏荷重の推定にあっては、明確な降伏値が上記方法で求

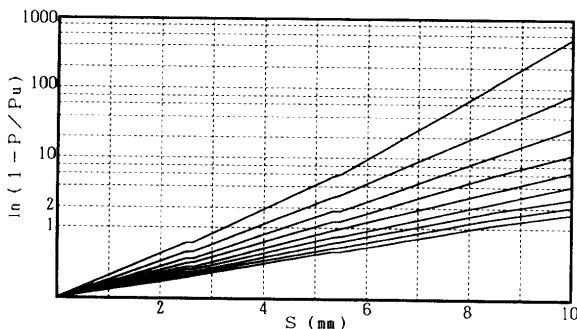


図3 極限荷重の推定(例)

められない場合も多い。このような場合は作用させた最大荷重を降伏値として取り扱い、推定された極限荷重と降伏荷重の 3/2 倍とを比較して小さい荷重を極限值として、算定値と比較することとした。

極限荷重の推定および図1の形状から判断して、杭の載荷試験における杭頭と杭頭変位の挙動は、場所打ち杭

が降伏荷重より比較的急に変位が進行するいわゆる全般的破壊の傾向を示すものの、概して、仮定した e 関数による表現で表すことができることが判る。このことは今後変形過程にある杭の挙動も含めた設計式確立のための方向性を示すものであることが判る。

表1に各杭ごとのそれらの値と設計算定式から求められる値を示す。算定式は、前述の算定式の 1/3 を 3/3 として推定極限荷重による値と比較するものである。表1に現行、杭の載荷試験を行わない場合の、支持力算定式および阪口¹⁾による杭周面摩擦の提案式 ($1/5 \cdot N + 3$)、学会設計指針による算定式 ($1/3 \cdot N$)、およびかつて鹿児島島の地盤について調査した 2/5 N) によるそれぞれの算定値と載荷試験による極限值の比を示す。現行支持力算定値が実験値と異なることを示す。また、阪口式と 2/5 N による式が平均的にはもっともらしい支持力の推定を与えることが判る。しかしながら、この算定式では 1.0 より小さい、つまり算定値が載荷試験の荷重より大きい値をとる場合が出現し、危険側の設計になる事例がある。今後これらの統計量を解析し、最適解を求めることが必要となるが、およそこれらの付近であることが考えられる。

沖積シラス地盤の設計算定式と載荷試験結果の相違が杭周面摩擦力の評価として現れてくるものと考えるとき、地盤の N 値と摩擦力度の関係に相関が存在することが考えられる。これらを検証するために、極めて大略的にはあるが、推定極限荷重における摩擦強度の次元と N 値の関係について考察する。

図5は施工法毎の $\ln(P/(D \cdot L))$ と S の関係である。つまり、平均的摩擦応力度 (τf) と杭頭変位 (S) の関係について求めるものである。

これらの摩擦応力度の極限值を極限荷重を推定する同一の方法で推定し、杭頭から杭長の上部 2/3 の N 値の平均との関係をプロットすると図6に示す関係となる。上部 2/3 の N 値の平均を採る意味は、摩擦強度に影響されると考えられる地盤の範囲が杭先端部の地盤の締めり方より若干上部の地盤に影響すると考えられることによる。

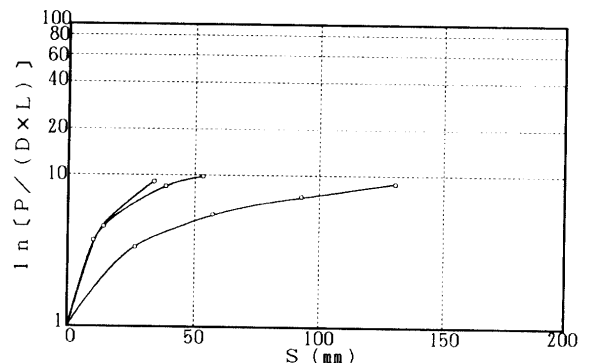


図5.1 打込み杭の $\ln(P/(D \cdot L)) (t/m^2) - S(mm)$ 関係

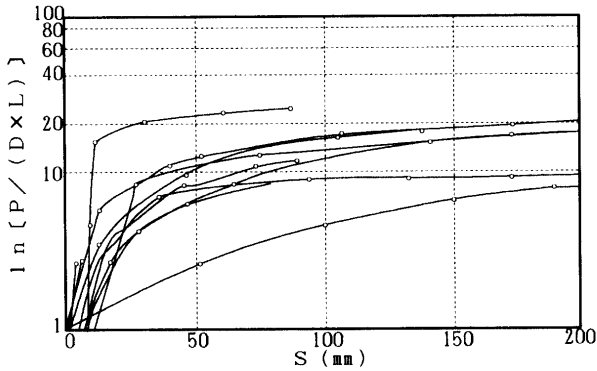


図5.2 場所打ち杭の $\ln(P/(D \cdot L))(t/m^2) - S(mm)$ 関係

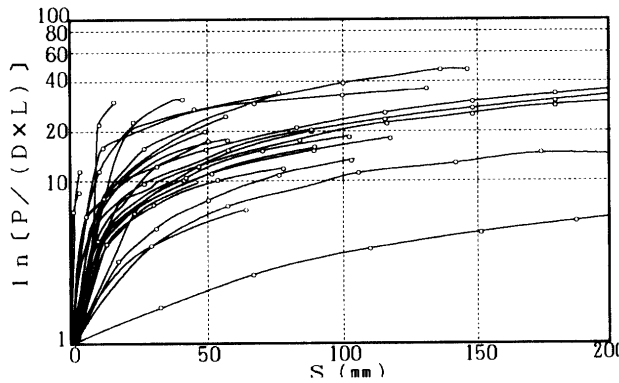


図5.3 埋込み杭の $\ln(P/(D \cdot L))(t/m^2) - S(mm)$ 関係

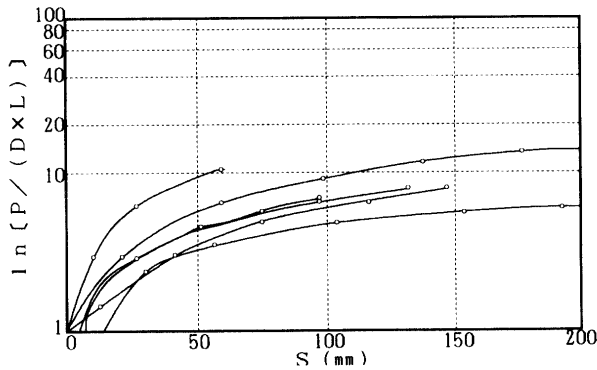


図5.4 中掘杭の $\ln(P/(D \cdot L))(t/m^2) - S(mm)$ 関係

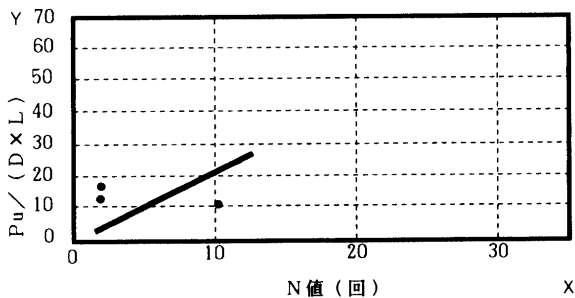


図6.1 打込み杭の摩擦強度とN値の関係

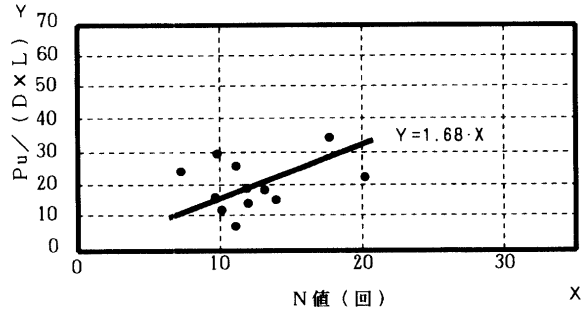


図6.2 場所打ち杭の摩擦強度とN値の関係

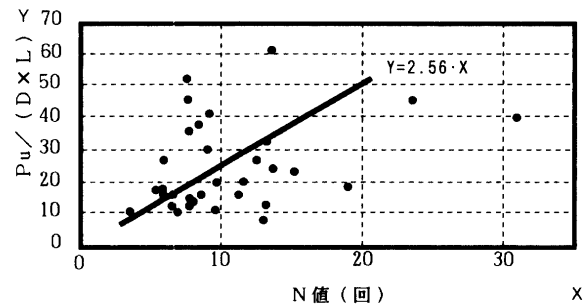


図6.3 埋込み杭の摩擦強度とN値の関係

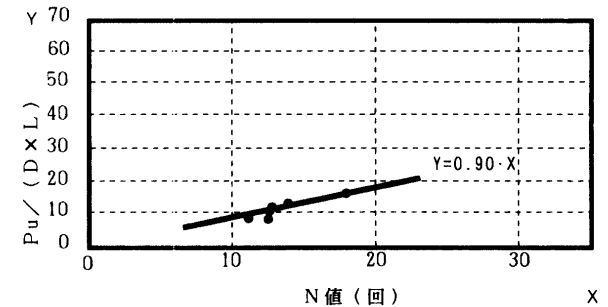


図6.4 中掘杭の摩擦強度とN値の関係

ばらつきはあるものの相関性を見ることができ、原点を通る最小自乗による実験式を図中に示す。打込み杭はデータ数が少ないものの、全般的に摩擦強度がN値に比例することが判る。また中掘杭は他の種類の杭に比較して摩擦強度が少ないことが判る。

6. 結論

沖積シラス地盤中に埋設された杭の載荷試験の資料をできるだけ多く収集し、それらの杭頭と杭頭変位の結果のみに限定して、荷重度と変位の関係、試験による推定極限荷重と現行設計式および摩擦応力にたいする提案式などの比較を行った。摩擦強度とN値の関係などについて検討した。それらの結果、以下のようなことが云える。

- (1) 杭頭の荷重度と変位の関係は、極限荷重によって決まるe関数によって表すことができる。
- (2) 推定される極限荷重を直径 $(D \times L)$ で除した、いわゆる摩擦強度は、杭施工法による杭頭上部から

- 杭長の2/3における平均N値に比例する。
- (3) 上記の(1), (2)によって, N値の異なる沖積地盤における設計値を推定することが可能となる。
- (4) 現行の載荷試験を行わないときの杭支持力算定式は, 沖積シラス地盤にこれを適用するとき, 過剰設計となる。これに対して, 摩擦強度とN値に関する算定式について検討すると, 阪口式, $2/5 \cdot N$ であらわす式が合理的であるが, 今後さらにより良い算定式について検討する必要がある。

富: 鹿児島市内の地盤における杭の周面摩擦力について, 日本建築学会中国・九州支部研究報告, 第7号, 昭和62年3月

謝辞

本研究は, 鹿児島県, 鹿児島市, および杭基礎工事試験関係の企業の方々から貴重な資料の提供をいただいた。コーアツ工業(株), 大洋基礎(株)南九州営業所には各種の便宜をはかっていただいた。ここに記して謝意を申し上げる。また, 本学, 博士前期課程の森貴久君には資料整理にあたり助力を得たことを感謝する。

参考文献

- 1) 大崎順彦: 建築基礎構造, 技報堂出版 2) 徳廣, 徳

表-1 杭載荷試験の種類, 諸元, 推定降伏値, 極限荷重, 平均N値, 算定支持力と試験結果の比

NO	施工法	降伏値 Py (t)	極限值 Pu (t)	N値の平均	杭上部2/3のN値	杭径 (mm)	杭長 (mm)	各種算定式による支持力(t)				Pu/ 告示式による算定値	Pu/ 阪口式による算定値	Pu/ 設計指針による算定値	Pu/ (2/5)Nによる算定値	備考
								告示式	阪口式	設計指針	2/5N					
1	埋込	330	500	9.2	10.3	0.55	22	83	197	129	153	6.0	2.5	3.8	3.3	節杭
2	埋込	120	250	6	6.3	0.55	17	43	131	67	79	5.7	1.9	3.7	3.2	
3	埋込	240	550	10.1	6.5	1	44.9	385	809	575	669	1.4	0.7	1.0	0.8	
4	打込	120	140	10.2	7.9	0.4	32	107	228	162	189	1.3	0.6	0.9	0.7	
5	中堀	95	120	13.9	15.8	0.5	18.6									
6	埋込	135	300	23.6	19.4	0.6	11	184	247	249	282	1.6	1.2	1.2	1.1	掘底掘底
7	埋込	340	465	9.0	7.4	0.5	31	88	235	147	176	5.2	2.0	3.2	2.6	
8	埋込	90	550	7.8	7.5	0.55	28	85	230	135	160	6.4	2.4	4.1	3.4	
9	埋込	150	240	11.6	7	0.45	27	159	274	218	248	1.5	0.9	1.1	1.0	
10	埋込	300	900	13.6	13.9	0.7	21	176	314	260	301	5.1	2.9	3.5	3.0	
11	埋込	70	180	8.4	3.8	0.6	8	59	104	77	85	3.0	1.7	2.4	2.1	節杭掘底
12	埋込	120	200	13.2	11.3	0.5	32	164	315	253	297	1.2	0.6	0.8	0.7	
13	埋込	30	90	13.0	12.5	0.45	26	113	224	177	209	0.8	0.4	0.5	0.4	
14	場所	500	1000	20.1	16.8	1	45	845	1269	1222	1413	1.2	0.8	0.7	0.7	
15	中堀	80	170	9	6.2	0.45	27									
16	場所	570	650	11.0	10.3	1	25	279	515	395	452	2.3	1.3	1.6	1.4	節杭節杭節杭
17	埋込	78	110	6.9	5	0.45	23	62	159	92	107	1.8	0.7	1.2	1.0	
18	埋込	45	70	3.5	2.4	0.55	12	27	89	36	41	2.6	0.8	1.9	1.7	
19	埋込	55	90	8	1.9	0.55	12	48	111	71	82	1.8	0.8	1.3	1.1	
20	埋込	30	80	6.5	3.6	0.55	12	55	118	73	82	1.4	0.7	1.1	1.0	
21	埋込	35	80	7.7	5.7	0.55	10	57	110	75	84	1.4	0.7	1.1	0.9	節杭カット
22	場所	1300	2200	9.4	6.2	1.2	62	534	1066	755	866	4.1	2.1	2.9	2.5	
23	埋込	81	145	10.3	8.1	0.4	27	30	76	51	61	4.7	1.9	2.8	2.3	
24	埋込	55	105	5.4	2	0.6	10	50	107	63	70	2.1	1.0	1.6	1.5	
25	場所	350	770	13.9	12.8	1	50	754	1226	1045	1191	1.0	0.6	0.7	0.6	
26	埋込	260	500	13.2	10.0	0.55	28	164	310	249	292	3.0	1.6	2.0	1.7	掘底
27	埋込	120	180	8.6	6.7	0.55	21	91	200	132	153	2.0	0.9	1.4	1.2	
28	場所	410	655	11.8	10.7	1	34.8	364	694	538	625	1.8	0.9	1.2	1.0	掘底
29	埋込	45	140	9.7	9.9	0.5	14	61	126	89	103	2.3	1.1	1.6	1.4	
30	場所	410	660	7.3	5.9	1	27	240	494	322	363	2.7	1.3	2.0	1.8	
31	埋込	120	150	7.8	5.6	0.6	20	88	200	126	146	1.7	0.7	1.2	1.0	
32	埋込	120	260	15.2	10.4	0.45	25	148	254	219	255	1.8	1.0	1.2	1.0	
33	打込	40	130	1.9	1.8	0.4	26	8	106	16	20	16.0	1.2	8.0	6.4	
34	打込	40	130	2.0	2.5	0.4	19.5	6	81	12	16	21.8	1.6	10.4	8.3	
35	埋込	50	210	19	10.4	0.5	23	196	284	267	313	1.1	0.7	0.8	0.7	
36	埋込	80	240	30.9	24.1	0.5	12	201	257	279	317	1.2	0.9	0.9	0.8	
37	中堀	90	140	12.6	8.1	0.4	33									
38	中堀	60	180	12.8	9	0.4	38									
39	中堀	45	120	12.6	8.4	0.4	38									
40	中堀	45	120	11.1	7.0	0.4	38									
41	場所	700	1800	14.4	14	1.8	55	1124	1734	1515	1711	1.6	1.0	1.2	1.1	カット
42	場所	100	140	17.9	14.6	0.4	22									
43	埋込	300	500	11.3	10.5	0.7	45	256	553	404	478	2.0	0.9	1.2	1.0	
44	場所	370	630	9.6	8.2	1.1	35	314	677	469	547	2.0	0.9	1.3	1.1	
45	埋込	340	900	7.6	6.3	0.7	24.6	112	277	168	196	8.0	3.2	5.3	4.6	
46	埋込	90	650	12.4	11.3	0.7	35	233	464	361	426	2.8	1.4	1.8	1.5	掘底掘底
47	埋込	210	800	7.6	6.4	0.7	25	112	277	168	196	7.1	2.9	4.7	4.1	
48	場所	210	450	11.9	9.7	0.9	35	269	533	409	479	1.7	0.8	1.1	0.9	
49	埋込	20	75	5.9	5.4	0.6	7	27	69	40	45	2.7	1.1	1.9	1.7	
50	埋込	20	75	5.9	5.6	0.6	8	31	77	43	49	2.4	1.0	1.7	1.5	
51	埋込	20	75	6.6	6.6	0.6	8	42	87	55	62	1.8	0.9	1.3	1.2	
52	埋込	25	150	13.7	5.4	0.6	10.5	123	186	161	180	1.2	0.8	0.9	0.8	
平均												3.4	1.2	2.1	1.8	