

沖積シラス地盤における杭の支持力に関する研究

—沖積シラス地盤における杭の鉛直積荷試験結果と弾塑性解析—

安部 洋人*・徳富 久二・東島 和裕**・徳廣 育夫

(受理 平成8年5月31日)

STUDIES ON BEARING CAPACITY OF PILES IN ALLUVIAL "SHIRASU" SOILS —RESULTS OF VERTICAL LOADING TESTS ON THE PILES AND ELASTO-PLASTIC ANALYSIS—

Hiroto ABE, Hisashi TOKUTOMI, Kazuhiro HIGASHIJIMA
and Ikuo TOKUHIRO

"SHIRASU" is a volcanic deposit and is distributed widely in South Kyushu. The natural deposits on plains of cities such as Kagoshima are transported by running water, therefore composed by the components of the "SHIRASU", and are called a alluvial "SHIRASU" soil. According to our experience, the piles in the alluvial "SHIRASU" soils show special characteristics in skin friction (shaft resistance). The skin friction of the piles was obtained from the results of the experiments of loading tests on the piles in the alluvial "SHIRASU" soil, and was compared with the results of the calculation by the Architectural code for the foundation design. Furthermore the relationship between load and subsidence of the piles was analysed by finite element method.

The results show that the skin friction of the piles in the alluvial "SHIRASU" soils is greater than the calculated value by the code. Also the behavior of these piles can be understood by calculation using numerical methods such as finite element method, as confirmed in the present study by relatively good agreement between experimental and numerical results.

1. 序

南九州を中心とする沖積シラス地盤における杭の挙動が、種々の載荷試験の結果と比較して、通常の設計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が伺える。

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の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道である。そのため、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とが予想される。

2. 研究目的

本研究では、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、実験された結果を解析し、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、設計手法と実杭の載荷試験の結果とを比較検討して、どの程度の非合理性が存在するかを検討し、さらにシラス地盤中の杭の挙動を表す解析的手法の妥当性について検討するものである。以上を具体的に述べると、日本建築学会による実用算定法に関して、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荷重試験の結果を比較して考えられる。荷重試験における降伏点と 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ことが一つの目的である。また、実験された結果を解析する手段として、有限要素法による弾塑性解析を行い、沖積シラス地盤の杭に関する荷重試験結果との対応を検討するものである。

3. 杭の荷重試験結果による杭周面摩擦力について

杭の設計は、先端支持力と杭周面の摩擦力の和として表され、杭周面摩擦力は標準貫入試験の N 値から評価する方法が通常採られている。その評価法は、以前は、砂質地盤については Meyerhof 等の資料から最低値に近い $1/5 \cdot N$ として採られた。この評価は小さすぎると判断され、現在では $1/3 \cdot N$ が採られている。

ここでは、杭の荷重試験が行われ、杭周面摩擦力が計測されている杭について、設計法と比較した。

図-1、図-2は比較した5本の結果である。図-1は杭頭の荷重と沈下量の関係、図-2はそれらの杭の地盤の N 値と杭施工位置である。それぞれ、杭径、杭長が異なるので同一レベルにおいての比較はできない。施工法はアースドリル工法掘削による場所打ちコンクリート杭である。その中で B は杭長 50 m であるが、地表から負荷さ 15 m は液状化を配慮して、杭外側にケーシングを挿入して周面摩擦力をカットされた杭である。

図-3は、杭の周面摩擦力を評価するために、標準貫入試験の N 値を α 倍と考えたときの各杭が存在する地盤条件によって算出される周面摩擦力が分担する支持力（荷重）と α (N 値の周面摩擦力への評価) の関係を示した。したがって、現行の評価は周面摩擦力を $1/3 \cdot N$ とされているので α は 0.33 である。各杭の周面摩擦力は現行設計上では α 軸上の各荷重値によって表される。これは試験結果、提案式によって算出される荷重をプロットしたものが図-3である。

ここに、大きい○印は実験値の最大荷重から杭先端支持力を差し引いた値を示し、実験における最大の杭周面摩擦力を意味する。また、阪口の提案する評価式 $(3+N/5)$ による算出結果を□印で示す。

これらの結果から、阪口の提案式がより実験結果に近いと判断されるが、危険側の結果もあることから、周面摩擦力に実験値の最大荷重時の周面摩擦力を採っても、 α は 0.4 程度であると理解できる。

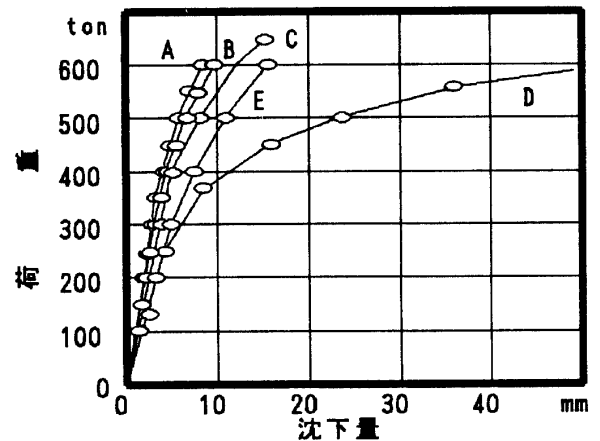


図-1 杭頭における荷重と沈下量の関係

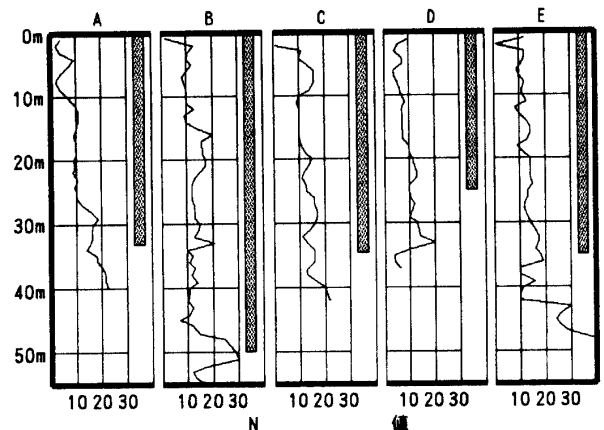


図-2 地盤の状態と杭位置

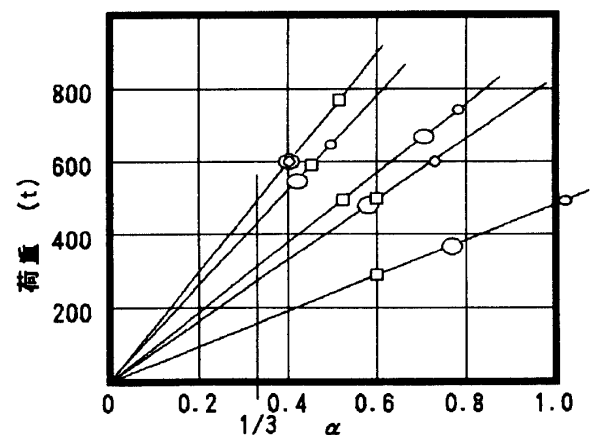


図-3 周面摩擦力の評価

このように、現行設計法による沖積シラス地盤中の杭の周面摩擦力は小さく見積もられているものであり、これを使用して設計することは合理的設計法であるとは云い難い。

4. 有限要素法による弾塑性解析

本研究では、地盤を有限要素法の軸対称問題として捉えて解析を行った。また、本解析では、有限要素法解析において地盤の塑性化判定を行う方法として新たに面濃度・塑性化度の概念¹⁾を導入し、弾塑性解析を行い、載荷試験結果との比較・検討を行う。

4.1 解析プログラムの精度検討

有限要素法 (FEM) による弾塑性解析を行うにあたって、FEM 解析プログラムの精度の検討を行った。FEM では要素分割の程度によって結果が大きく左右される。FEM の要素分割を図-4のように、半無限体地盤上に集中荷重が作用する場合の弾性解析を行って比較する。半無限体地盤に集中荷重が作用するときの解は、Boussinesq により求められているので、これと解析結果を比較・検討した。図のように、全節点数 $11 \times 14 = 154$ 、全要素数 130 の要素について、これを三角要素に分割して行うものである。

図-5は、計算された結果と Boussinesq の結果を図示したものである。図を見ると2つの結果は、ほぼ一致しているといえる。およそこれらの分割によって地盤内の応力と変位を表せるものといえる。

4.2 塑性化判定方法

地盤に限らず、一般に材料内部では、応力の増大にともなって塑性化し、その程度はその位置での応力状態に依存すると考えられる。要素ごとの応力状態を計算することができたとき、要素ごとに塑性化の程度を規定できる。塑性化の程度の判定方法として、面濃度・塑性化度の考えを導入した塑性化判定を行う基本については既に報告した¹⁾。以下に面濃度の定義と算出法ならびに塑性化度の算出方法について述べる。

4.2.1 面濃度と塑性化度の算出

要素内の応力を Mohr 応力円で表したとき、応力円内でその設定された条件を超過する応力状態を球面上に表現したとき境界条件が形成する部分の面積は $1/8$ 球面上にプロットするとき、ある面量を形成する。この面量の $1/8$ 球面の面量の割合を面濃度と定義するものである³⁾。

破壊過程における塑性化の進行の程度は、内部の応力状態によって決定される面濃度と関連づけられると

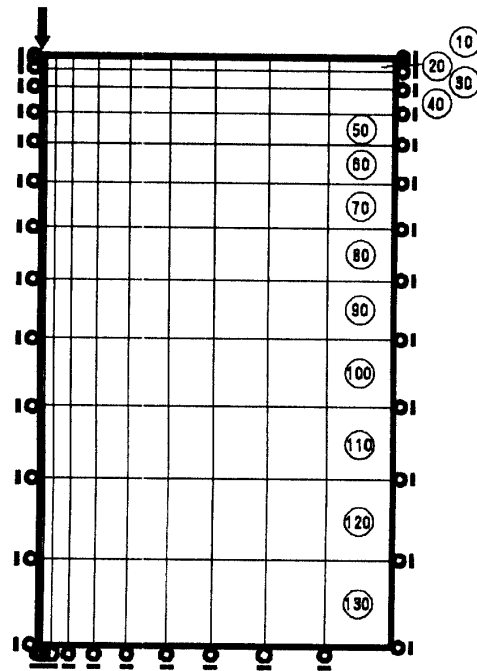


図-4 要素分割と荷重作用点

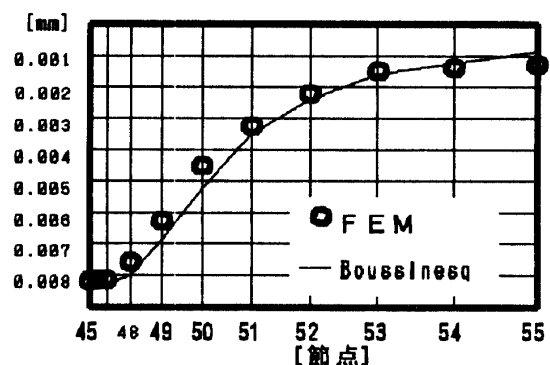


図-5 FEM と Boussinesq の解の比較

仮定し、このとき、面濃度は破壊の塑性化に寄与する物理性として考えられるものなので、有限要素弾塑性解析における塑性化判定の条件とした。

面濃度は、中間主応力の特定の位置によっては解析的に求めることができる。つまり、カーテシアン座標系の Z 軸を地盤の深さ方向と考えるとき、X 軸、Y 軸方向の応力は同一であり、中間主応力は決定される。垂直応力 (σ) - せん断応力 (τ) 平面上の Mohr 円が、ある条件を越える面の範囲は球面上で表現され、FEM によって求められる垂直・せん断応力によって Mohr 円を描くとき、この応力円が崩壊条件に達した場合にその材料は破壊する。この崩壊条件より下位の

段階に塑性化開始の条件が存在し、この条件に達するまでは、材は弾性的に挙動し、この条件を越えるとき材料の塑性化が開始・進行すると考えられる。図-6は Mohr 円と崩壊基準の図である。図の AB を塑性化開始条件とすると、図-6の斜線内の点 (P) は、図-7に示すように O 点を中心として単位長さの半径を有する球を描き、主応力軸を 1, 2, 3 とし、それらで作る座標面で区切られた第 1 象限の 1/8 球面を考えると、その球面に表すことができる。図-7の斜線部分は、図-6の AB 条件を越えた領域の範囲を示すものである。

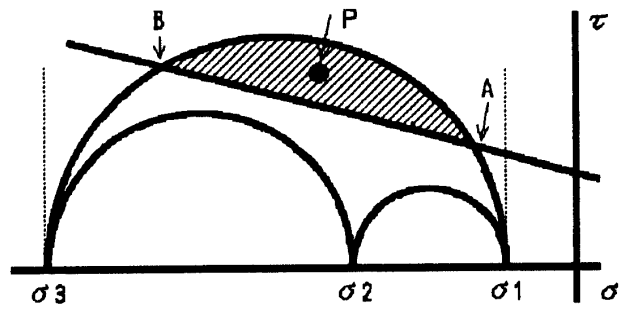


図-6 Mohr 円と崩壊基準

図-8の D 線を塑性化開始条件とすると、塑性化が始まる (Mohr 円が D 線に接する) までは、材は弾性的に挙動し、その条件を越えたところから塑性化・崩壊に至ると考える。また、塑性化が完全に進行した状態 (崩壊条件) は、せん断破壊の条件と一致すると考えるものである。図において、塑性化が完全に進行した状態を C 円、進行過程のそれを B 円と考えることにする。A 円に到達するまでは材は弾性的に挙動し、A 円を越えたところから塑性化が開始・進行する。その後、応力の増加とともに応力円が D 線を超過したとき材は破壊すると考える。塑性化の進行の程度を表すものとして塑性化度を定義し、これを次のように仮定した。

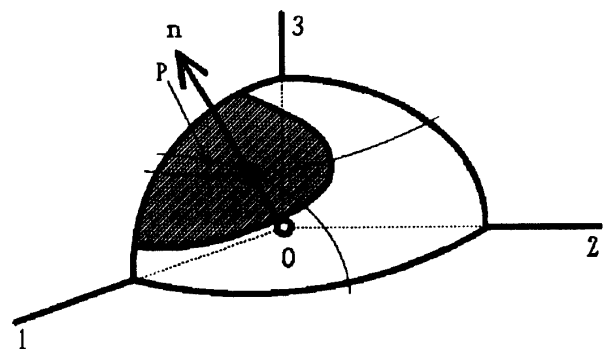


図-7 面濃度

塑性化開始の条件を越えた段階から破壊に至るまでの材の塑性化の程度 (塑性化度) は、塑性化が完全に進行した状態の面濃度と進行過程の面濃度の比として塑性化を定義する。

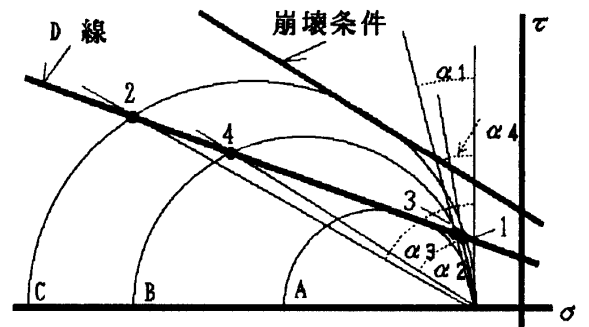


図-8 面濃度の計算と破壊過程

図-8の状態では応力が増加したとき、塑性化度 (S) は、図中の記号を用いて、

塑性化が完全に進行した状態の面濃度 : Men S₀

塑性化が進行程度である面濃度 : Men S_g

とすると、

$$\text{Men } S_0 = \sin \alpha_3 - \sin \alpha_4, \quad \text{Men } S_g = \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1$$

$$\text{塑性化度 (S)} = \frac{\text{Men } S_g}{\text{Men } S_0} \dots \dots \dots (1)$$

で表されるとする。

4. 2. 2 変形係数と塑性化度

FEM の弾塑性解析では、材料内の応力状態に材料定数が依存する解析を行う。材料定数の中にあつて大きい影響を与えるものは変形係数である。本報告では、この変形係数が応力状態に依存する量として取扱い、FEM に塑性化度の概念を導入するにあたって、変形係数が塑性化度の関数として与えられるとする。

変形係数をコンクリートの応力-歪曲線に用いられる Popovics 式によって表し、この式を変形して、変形係数と塑性化度の定式化を行った。Popovics 式は、

$$\frac{\sigma}{f_c} = n \cdot \frac{1}{n-1 + \frac{\epsilon_n}{\epsilon_c}} \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \dots \dots \dots (2)$$

$$n = \xi \cdot f_c + 1, \quad \epsilon_c = \eta \cdot (f_c)^{1/4}$$

であり、式(2)を無次元化式で表すと、

$$\sigma_0 = n \cdot \frac{\epsilon_0}{n-1 + \epsilon_0^n} \dots \dots \dots (3)$$

式(3)の σ_0 は応力レベル (S) と考えられ、変形して、

$$n-1+\varepsilon_0^n = n \cdot \frac{\varepsilon_0}{S} \dots\dots\dots (4)$$

また、式(2)を変形し、微分する。

$$\sigma' = \frac{(n-1)1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon C}\right)^n}{\left(n-1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon C}\right)^n\right)^2} \cdot f_c \cdot \frac{n}{\varepsilon C} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)において、 ε を 0 にすると、 σ' は初期接線変形係数とである。よって、接線変形係数と材料定数 n の関係は、

$$Ei = \frac{n}{n-1} Ec \dots\dots\dots (6)$$

$$\therefore Ec = \frac{f_c}{\varepsilon C}$$

である。接線変形係数と材料定数の関係は、

$$Es = \frac{(n-1)^2 1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon C}\right)^n}{\left(n-1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon C}\right)^n\right)^2} \times Ei \dots\dots\dots (7)$$

接線変形係数を塑性化度 (S) よって表すと、式(4)を使用して、次式となる。解析において要素が塑性した場合の接線変形係数である。

$$Es = \frac{(n-1)^2 \times (1 - \varepsilon_0^n)}{n^2 \times \varepsilon_0^2} \times S^2 \times Ei \dots\dots\dots (8)$$

また、ここで変形係数と N 値との関係について述べる。地盤の変形挙動は、その地盤に含まれる水の存在や組織によって様々に変化する。よって、地盤の解析においては、地盤の初期応力状態がその地盤の初期力学特性を規定し、その後の応力状態の変化に応じて応力-歪関係が変化する。実際には、解析しようとする領域に対する現場土質試験、土質試料による室内試験の結果から求められた土の強度や変形特性を、そのまま解析に導入すればよいが、必ずしも解析に十分な試験が行われているとは限らない。

そのため、大きくは砂あるいは砂質土・粘土・粘性土に分け、それらに対して一般的な変形挙動を想定して解析に用いる場合が多い。

基礎の解析に用いられる地盤各層の土質の変形係数は、平板載荷試験やボーリング孔における標準貫入試験、あるいはプレシオメーターによる水平載荷試験などにより求められることが多い。

変形係数と N 値の関係は、 $E=7 \times N$ (単位 kg/cm²) を中心に $E=4 \times N \sim 10 \times N$ の範囲に分布している²⁾。

本解析に用いた初期変形接線係数は、以下の二式について解析し、比較・検討した。

$$Ei = 70 \times N \text{ (単位 t/m}^3\text{)} \dots\dots\dots (9)$$

$$Ei = 80 \times N \dots\dots\dots (10)$$

一般的な地盤では、 $70 \times N$ が平均的値であり、実験結果とよく対応していることが判っている。また、沖積シラス地盤では通常の地盤よりも大きくなることも過去の実験より考えられる。

4.3 解析方法

弾塑性解析を行うに際し、各要素における応力から次荷重レベルの変形係数を求める方法について述べる。

地盤内部の応力は、その要素に存在する応力と杭からの荷重によって変化する応力の和となる。要素に存在する応力は、その要素より上部の地盤の重量であり、これを σ_0 とする。荷重による変化分は $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ であるので、それらの和をとって、その時の応力を $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ とする。さらに、この応力による主応力を σ_1, σ_2 ($\sigma_1 > \sigma_2$) とする。さらに、側圧 σ_1 によって崩壊するときの主応力を σ_r とする。このとき、崩壊の Mohr 円は式(11)、崩壊過程のそれは式(12)でそれぞれ与えられる。

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_r + \sigma_1}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_r}{2}\right)^2 \dots\dots\dots (11)$$

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 \dots\dots\dots (12)$$

いま、崩壊条件式を

$$\tau = C - \sigma \cdot \tan \phi \dots\dots\dots (13)$$

のように定め、崩壊荷重 σ_r を求める。式(11)に式(13)を代入して、接するときの σ_r を求めればよい。

面濃度・塑性化度を求めるには、塑性化開始条件と崩壊円、崩壊過程円との交点を求める必要があるため、それぞれの交点を求める。

塑性化開始条件を、

$$\tau = CS - \sigma \cdot TS \dots\dots\dots (14)$$

として、このとき、崩壊円と崩壊過程円との交点の座標を求める。前ページの図-5において、C 円は崩壊円、B 円は崩壊過程円である。求められた、座標をもとに塑性化度 (S) を求める。

4.5 解析結果および考察

沖積シラス地盤中の杭に関して載荷試験を行っている例について解析し、杭頭の荷重-沈下量曲線および摩擦力について比較・検討した。

図-9のように要素分割を行い、増分法による弾塑性解析を行った。図の塗りつぶした部分は杭を表している。各境界条件は、地表面と垂直方向は X 方向拘束・Y 方向自由で水平方向は X 方向自由・Y 方向拘束で

ある。また、荷重作用点は節目 1, 2, 3 の3点である。このような条件のもとで弾塑性解析を行った。

解析に用いたデータは、杭の載荷試験が行われている四例を採用した。解析データとして、実験された地盤の N 値を深さ方向に、また N 値から大崎の式を使用して推定した内部摩擦角、単位体積重量などを入力する。

図-10～図-13は杭頭の荷重と沈下量の関係を解析した結果と実験結果を比較したものである。全体を通じて解析結果は実験結果を代表していることが判る。

初期接線変形係数は、 $80 \times N$ とした結果である。

図-12は、他の結果と異なるものである。初期の接線変形係数からかなりのズレが見られる。全体的にも傾向が一致していない。この理由は、液状化対策として、地盤改良工事を行った後に杭が施工されたものであり、地盤データは改良工事を行う前に標準貫入試験をした結果である。

しかし、解析結果は載荷試験結果よりも小さく、明らかに異なっている。地盤改良の結果によってこのような結果になったと考えられる。地盤改良の効果を検証する結果となった。

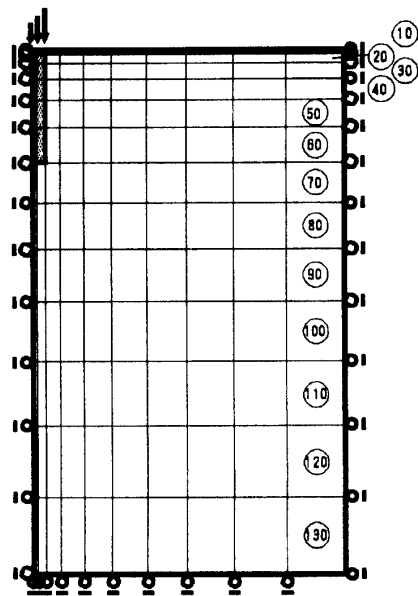


図-9 要素分割と荷重作用点

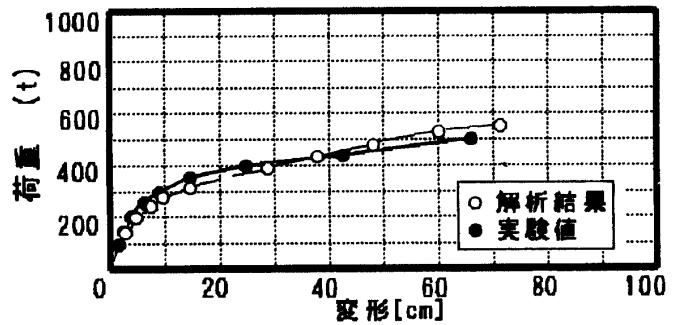


図-10 杭頭の荷重と沈下量の関係 (例1)

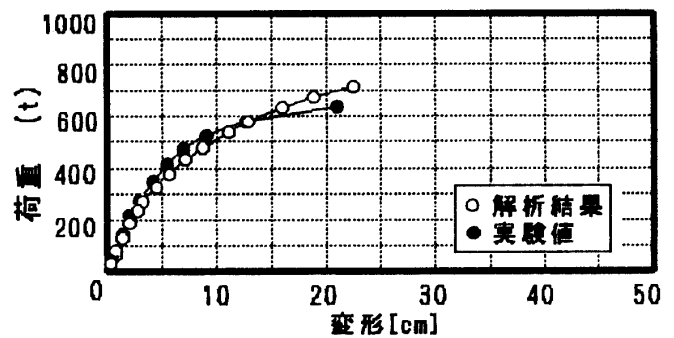


図-11 杭頭の荷重と沈下量の関係 (例2)

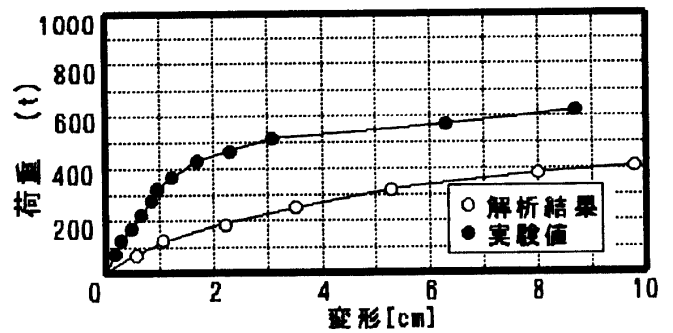


図-12 杭頭の荷重と沈下量の関係 (例3)

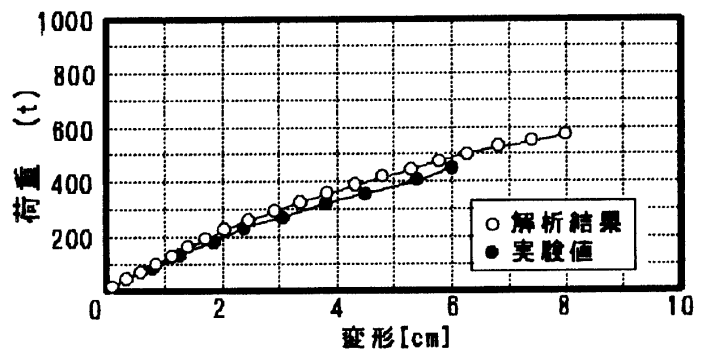


図-13 杭頭の荷重と沈下量の関係 (例4)

5. 結 論

本研究は沖積シラス地盤中の杭の挙動を把握することを目的に、杭載荷試験データを收拾して信頼性を考慮した設計を行うことを目標とした研究である。本報告では、沖積地盤中の杭の挙動における周面摩擦力と現行設計法との関係について述べ、数例の載荷試験データを使用して有限要素法による弾塑性解析を面濃度による地盤評価を行って解析して実験値との対応を検討した。

これらの結果から次のようにまとめることができる。

- 1) 杭周面摩擦力は現行設計法より大きく見積もることができる。
- 2) 有限要素法による弾塑性解析は比較的良好に実験結果を反映している。
- 3) これに使用した初期接線変形係数は通常の平均的係数に比較して大きく、 $80 \times N$ とした場合である。

4) 面濃度を定義して、これを塑性化の判定基準としたとき解析を実験結果に反映させることができる。今後の課題としては、資料数を増大させ、本報告で述べた解析を使用した結果を比較・検討することであり、統計的に沖積シラス地盤の地盤定数を評価することである。

[参考文献]

- 1) 徳富久二「脆性材料の破壊条件に関する面量とそれを適用したシラスの三軸圧縮試験」鹿児島大学工学部研究報告 第27号 昭和60年5月
- 2) 川本眺万 林正夫著、「地盤工学における有限要素解析」培風館
- 3) 藤松 進 徳富久二「コンクリートの破壊条件に関する位相化面モーメント仮説」日本建築学会論文報告集 第219号 昭和49年5月