

## 組み合わせ荷重下の単杭の支持力特性とその考察

## A STUDY OF THE BEARING CAPACITY OF SINGLE PILE UNDER COMBINED LOADS

坂田隆博\*、前田良刀\*\*、松井謙二\*\*\*、落合英俊\*\*\*\*  
 Takahiro SAKATA, Yoshito MAEDA, Kenji MATSUI, Hidetoshi OCHIAI

\* (株) 建設技術研究所福岡支社 (〒810 福岡市中央区渡辺通2-1-10、十八福岡ビル)

\*\* 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由が丘1-8)

\*\*\* 工博 (株) 建設技術研究所 技術・開発本部 (〒810 福岡市中央区渡辺通2-1-10、十八福岡ビル)

\*\*\*\* 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

This paper describes the characteristics of the bearing resistance of the flexible single pile under combined loads in Okagaki sand. Although the bearing resistance of pile has been conventionally evaluated dependently both in the horizontal direction and in the vertical direction, it is pointed out by Meyerhof et al(1972) that the vertical resistance of the rigid pile is reduced due to the horizontal load.

The flexible model piles tests under various kinds of combined load in the laboratory are performed and it is observed that the vertical and horizontal bearing resistance relations of the single piles are different from the results of Meyerhof et al..

key words : combined loads, model test, pile foundation

## 1. まえがき

基礎には、上部構造の自重などの鉛直荷重と土圧や地震時の慣性力などの水平荷重が作用する。このような組み合わせ荷重の影響は、特に浅い基礎の支持力に大きく影響すると考えられ、杭のような深い基礎の支持力特性には、あまり影響がないとされてきた。このため、浅い基礎には荷重の偏心と傾斜を考慮した支持力式が道路橋示方書などの設計基準に反映されている。

一方、杭のような深い基礎においては、研究事例はあまり多くなく、実際上は、鉛直荷重と水平荷重あるいはモーメントに対して、それぞれを独立で支持力特性が検討されている。組み合わせ荷重下の杭の支持力特性についての研究はMeyerhofら<sup>1)</sup>の研究がある程度である。Meyerhofらは、地盤を剛塑性体とし、力の釣り合い式から組み合わせ荷重下の深い基礎の支持力式を提案し、模型実験でその支持力特性を研究している。しかしながら、杭のような、たわみ性の基礎では杭の変形が杭の支持力特性に影響を与えると考えられる。

既存の剛塑性理論では力の釣り合いのみを考え、極限支持力の検討のみが可能である。すなわち、弾性状態とみなせる荷重の小さい段階から、極限状態にいたるまでの支持力特性には言及できない。

現在、構造物の設計法が許容応力度法から限界状態設計法へと移行しようとしているが、この限界状態設計法では着目する限界状態として、地盤と杭の弾性的挙動を示す限界の挙動と(本文では降伏荷重または、第一限界荷重と呼ぶ)、大変形時の終局的挙動(極限荷重、第二限界荷重)の合理的な評価法が求められている。

本研究は、以上のような現状のもとで、鉛直荷重と水平荷重の組み合わせ荷重下における模型の単杭の支持力特性を検討するために、支持力実験を行い、その挙動に

ついて考察を加えたものである。

2. 試験地盤とその物性および力学性状<sup>2)</sup>

## (1) 地盤材料の物理的性質

杭の支持力に大きく影響する試験地盤には、豊浦標準砂を用いるのが物理的性質および力学的性質が明確で好ましいが、入手が困難のため、豊浦標準砂に比較的近い性質のもので、入手容易な岡垣砂(福岡県遠賀郡岡垣町産)を用いた。この砂の作成方法は、まず、7号珪砂で水洗いして塩分や細粒分を除去し、約600度のバーナーで焼き、絶対乾燥状態にした砂を地盤材料とした。表-1、図-1は岡垣砂の物理的性質を豊浦標準砂などと比較して示したものである。岡垣砂は均等係数が、2.20となっており、1~3の間にあるため均一な砂と判定できる。図-1の粒径加積曲線を見ると、粒径は豊浦砂より大きい。

## (2) 地盤材料の力学的特性

側圧 $\sigma_3$ を1.0kgf/cm<sup>2</sup>に設定して初期間隙比を変化させ、砂の敷詰まり具合による内部摩擦角の変化を調べた結果を図-2に示した。これによると内部摩擦角は直線上に並び、豊浦標準砂と同様の性状を示すことが分かる。

三軸圧縮試験は初期間隙比と側圧を変化させて行い、豊浦標準砂での側圧と内部摩擦角の関係を比較する。なお図-4中の $e_{0.05}$ とは拘束圧 $\sigma_3=0.05$ kgf/cm<sup>2</sup>の時の初期間隙比のことである。内部摩擦角は(1)式によった。

$$\phi = \arcsin \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_{\text{MAX}} \quad \text{----- (1)}$$

表-1 砂の物理特性比較

|       |           | 岡垣砂  | 豊浦砂  |
|-------|-----------|------|------|
| 比重    | $G_s$     | 2.63 | 2.64 |
| 平均粒径  | $D_{50}$  | 0.26 | 0.16 |
| 有効粒径  | $D_{10}$  | 0.16 | 0.11 |
| 均等係数  | $U_c$     | 2.20 | 1.44 |
| 最大間隙比 | $e_{max}$ | 0.93 | 0.98 |
| 最少間隙比 | $e_{min}$ | 0.56 | 0.61 |

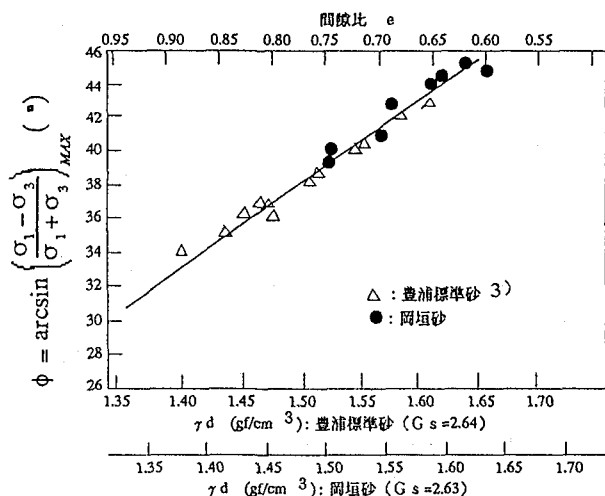


図-2 内部摩擦角と間隙比等

図-3は、側圧を変化させた時の内部摩擦角の変化をしめた。側圧が大きくなるにつれて、内部摩擦角が小さくなる。図-4は、これを豊浦標準砂の場合と比較したもので、側圧変化による内部摩擦角の移行が双方とも近似していることがわかる。

### (3) 試験地盤の作成

砂撒き装置は図-5 に示したような多重フルイ(3重：網目 1.68, 3.36, 3.36mm)を用いた空中落下方式とし、幅 40 cm、長さ 236 cm、深さ 70 cm の土槽に落下高  $H=105$  cm から 45 cm まで幅広く拡散させて造成した。地盤作成の確認は土槽中に配置したモールドによる確認試験と、杭による鉛直支持力試験により再現性を確認した。これは、再造成した試験地盤が前回の性状と変わっていないか確認するもので、後述の図-10の杭の載荷試験による地盤確認試験の結果に示したように、再造成した試験地盤での荷重・変位曲線はほぼ同じであり密度の均一性が確認された。なお作成した地盤は概ね地盤の密度  $\gamma_d = 1.63 \text{ t/m}^3$ 、間隙比  $e = 0.61$ 、相対密度  $D_r \approx 86\%$  である。

## 3. 実験方法

### 3.1 実験装置

図-6は杭と載荷装置の概要を示したものである。模型杭は直径 50 mm、厚さ  $T=6$  mm のアクリル製中空管を用い

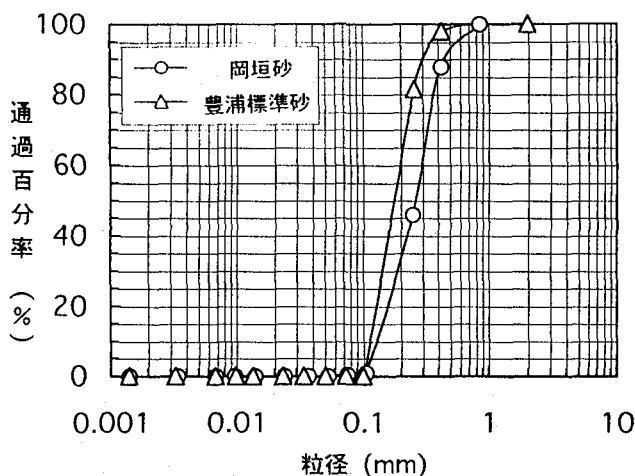


図-1 粒度分布図

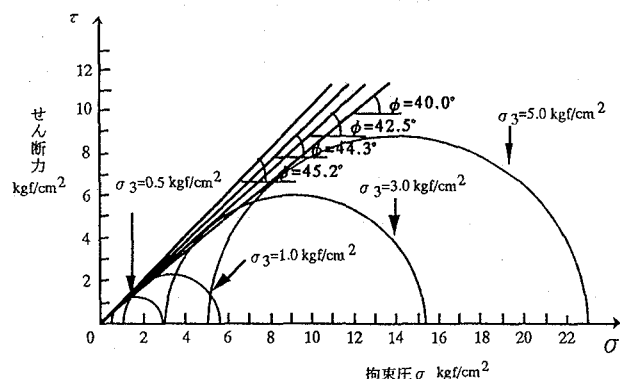


図-3 内部摩擦角と拘束圧の関係

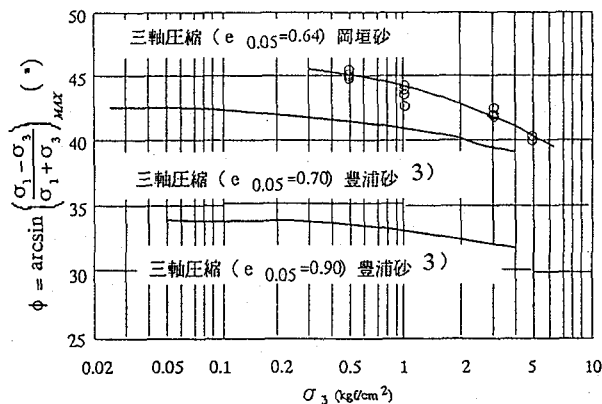


図-4 内部摩擦角と拘束圧の関係

た。杭は、根入れ長  $D_f = 440$  mm の長い杭と、根入れ長  $D_f = 200$  mm の短い杭の 2 種類とし、いずれも地上部の突き出し長は 95 mm である。

杭は試験地盤造成後、手動ジャッキにて平面位置、鉛直度に注意して埋め込む。なお三次元の応力空間では、鉛直力  $V$ 、水平力  $H$ 、モーメント  $M$  の組み合わせを考えるが、今回は、 $V$ 、 $H$  のみ、すなわち傾斜荷重のみを対象とした実験である。したがって、載荷装置自体は鉛直荷

重を偏心させることが可能になっているが、今回はモーメント荷重を作用させないため、杭軸と鉛直荷重軸を一致させている。

長い杭はアクリル製中空管を、縦方向に二分割し、ひずみゲージ張り付け後接着剤にて一体化し、先端部は真鍮製の先端広がり角60度のコーンヘッドを取り付け、杭頭は真鍮製のアダプターを取り付けて一体化したものである。二分割したためにつぎ手部分と、つなぎ目のない部分とは曲げ剛性に差が生じる危険性があり、また、製品の寸法および材料性状の製造誤差等を確認するため継ぎ目方向を変化させた曲げ試験を行い、曲げ方向の違いによる荷重と変位の相違が無いことを確認した上で、アクリル管の剛性は、 $EI = 6.74 \times 10^5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^2$ とした。曲げ試験の結果、継ぎ目の影響はほとんどないことが分かった。なお、安全のため、水平荷重載荷方向は継ぎ目直角方向とした。曲げ応力は、アクリル管内面にひずみゲージを取り付け、荷重方向のひずみ値より計算により求めることとした。このため、ひずみゲージを杭軸方向に5cm間隔に9ポイント、杭周りに4ポイント（荷重載荷方向および荷重載荷直角方向のそれぞれ2点）貼り付け、杭体のひずみを測定した（図-7）。

また、短い杭については、杭頭変位のみを調べるため、アクリル製中空管の先端に真鍮製の先端広がり角60度のコーンヘッドを取り付け、ひずみゲージは省略した。

### 3.2 試験での荷重ケース

荷重載荷は、鉛直荷重のみ、水平荷重のみのケースと両者を組み合わせた傾斜荷重とする。傾斜荷重は、水平荷重載荷後、水平荷重を保持したままで鉛直荷重を増加させる方法（荷重ケースA）と、水平荷重と鉛直荷重を一定の増分で荷重増加させ、荷重の傾斜を一定に保つ方法（荷重ケースB）の2タイプの応力経路について実験を行った。

載荷方法は水平荷重のみ、鉛直荷重のみ、および荷重ケースAのケースは多サイクル方式、荷重ケースBは単サイクル方式とした。載荷は処女荷重は載荷時間1分、荷重保持時間5分とし、履歴荷重は載荷時間、荷重保持時間とも1分とした。なお、荷重除荷は載荷、除荷とも1分とした。

荷重ケースAの、水平荷重一定方式の場合の組み合わせ荷重の載荷方法は、まず、剛な載荷ロッドを組み込んだテーブルプレートを横移動し、載荷ロッドを介して杭頭に水平荷重を載荷する。所定の水平荷重を多サイクル方式で載荷し、荷重を保持した後、鉛直方向載荷ロッドにより鉛直荷重を多サイクル方式で最大まで載荷する。この場合、荷重傾斜は絶えず変化する。したがって、この方法では組み合わせ荷重において、鉛直荷重 $V=0$ の場合の水平支持力以上の水平荷重が存在しないことになり、限界がある。

荷重ケースBの、荷重傾斜一定方式の場合は、水平載荷ロッドと鉛直載荷ロッドを同時に作動させ、1分間でそれぞれの荷重増分を単サイクルで最大荷重まで載荷する。この方法では、その支持力特性の力学的意義は高いが、鉛直、水平それぞれの荷重・変位特性が同時に生じるため、その理論的考察が重要である。

### 3.3 計測

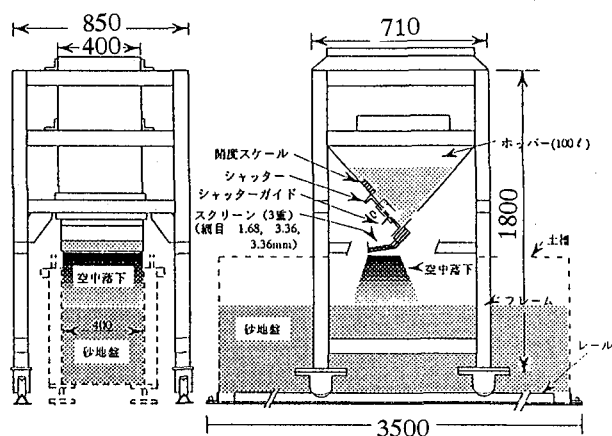


図-5 砂撒き装置

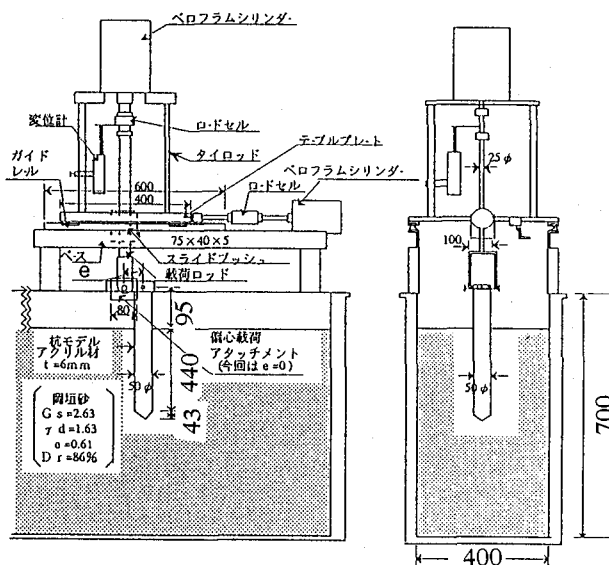


図-6 載荷装置の概要

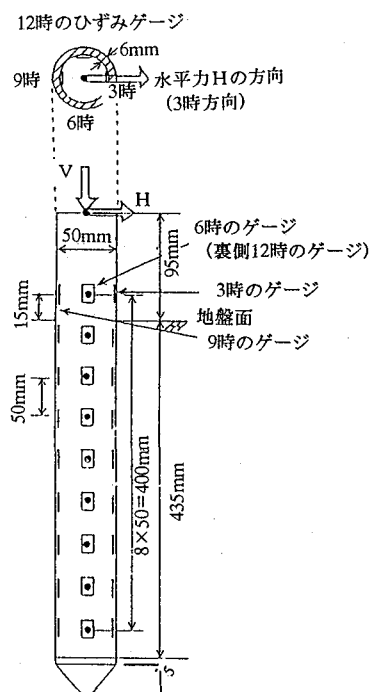


図-7 ゲージ取り付け位置

実験の主な計測項目は以下の通りである。

- ① 杭頭における荷重および変位
- ② 変位は鉛直変位および水平変位とする
- ③ 長杭の杭軸方向のひずみ分布

計測値は、すべて載荷装置に組み込んだロードセル、および変位計による自動計測とした。

なお、本文では杭の支持力特性の判定方法として、地盤工学会基準<sup>4)</sup>の第一限界荷重と、第二限界荷重を準用した。すなわち、 $\log p\text{-}\log s$ 法により、荷重と変位の関係より曲線の折れ点を求め、この点の荷重を第一限界点（降伏荷重）とする。第二限界荷重（極限荷重）は鉛直方向では杭径の10%とすると、図-10に示した鉛直荷重・沈下曲線から分かるように、5mm程度では弾性的挙動の範囲であり、杭径の50%、すなわち鉛直方向変位が25mmに達した時点で変位量が急増している。したがって、鉛直変位25mmを生じる鉛直荷重を第二限界荷重とする。また、水平方向には水平変位が保持できなくなり、転倒を生じる時点とする。

#### 4. 実験結果とその考察

##### (1) 水平荷重のみの載荷試験

図-8、図-9は水平荷重時の荷重～変位関係を示したものである。H=80kgfを除いてほぼ同じ荷重・変位関係となっており、均一な地盤が作成されていることがわかる。

##### (2) 鉛直荷重のみの載荷試験

図-10は地盤再造成時毎に行った鉛直載荷試験結果の荷重～変位関係を示したものである。各地盤ケースともほぼ同じ荷重・変位関係となっており、均一な地盤が作成されていることがわかる。

一般的に、変位量が杭径の10%程度を極限荷重としているが、本試験地盤では杭径の50%程度、25mmの鉛直変位付近を超過すると、変位が急増していることが分かる。先にも述べたように、この点を第二限界荷重と定義し、傾斜荷重による限界荷重の判定にも適用する。

##### (3) 荷重ケースAの載荷試験<sup>5)</sup>

図-11は長い杭の、図-12は短い杭の水平荷重を所定の値で保持した後に、鉛直荷重によって生じる荷重・変位関係を示したものである。長い杭では、第一限界付近では水平荷重の増加にともなって、鉛直荷重による変位が増加するが、第二限界ではH=60kgfのケースを除いて逆転する。一方、短い杭ではH=4kgfを除いて初期水平荷重による鉛直荷重の荷重・変位関係に明瞭な差はみられない。また第二限界荷重は杭が長い場合、組み合わせ荷重の影響をあまりうけていない。後述の、図-17は、組み合わせ荷重と杭の支持力の関係を一種の降伏曲線、破壊曲線として整理したものである。なお図-17中□■記号は荷重傾斜角一定で載荷したケースをプロットしたものである。これによると、組み合わせ荷重による降伏曲線は右肩にふくらみがみられ、Meyerhof (1972)らの提案している簡単な楕円形とはならない。また、第二限界荷重は、杭が長い場合、組み合わせ荷重の影響は少ない。

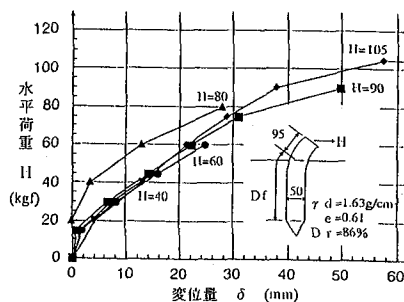


図-8 長い杭の水平荷重と水平変位の関係

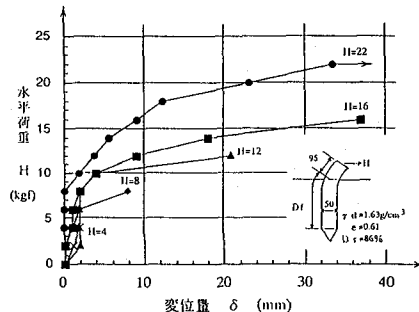


図-9 短い杭の水平荷重と水平変位の関係

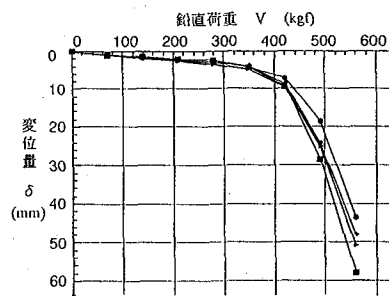


図-10 長い杭の鉛直荷重と鉛直変位の関係

図-13は杭体に貼り付けたひずみゲージにより測定した杭体のひずみから求めた曲げモーメントおよび地盤反力である(H=40kgfの場合)。ここで曲げモーメント曲線は実測値をスプライン関数によりスムージングしたもので、地盤反力はその2回微係数として求めたものである。これによると鉛直荷重の増加にともなって、地中部最大曲げモーメントが増加する。これは、先行水平荷重による杭頭水平変位による偏心荷重増加によると考えられる。また地盤反力も鉛直荷重の増加にともない増加していることがわかる。

##### (4) 荷重ケースBの傾斜荷重載荷試験

図-14～16は荷重傾斜一定方式の長杭の荷重・変位の一例を示したものである。図-14は鉛直荷重が支配的で、鉛直方向の荷重・変位関係から限界荷重が決まるケースを示し、図-16は水平荷重が支配的で、水平方向の荷重・変位関係から限界荷重が決まるケースの例を示す。また図-15は鉛直と水平がほぼ同時に極限に達する組み合わせ荷重ケースの例である。図-14～16に示した荷重ケースを含め、実験結果について図-17と同様に水平と鉛直の第一限界と第二限界を表すと図-18のようになる。長い杭では荷重傾斜角 $\tan \theta = 0.3 \sim 0.4$  ( $\theta$ : 縦軸よりの角度)を境にして、 $\tan \theta = 0$  (鉛直荷重のみ)の方向では鉛直荷重による荷重限界が卓越する領域である。

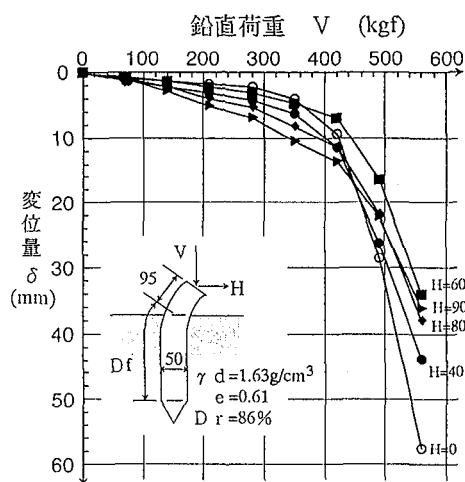


図-11 長い杭の荷重ケースAの荷重と変位の関係

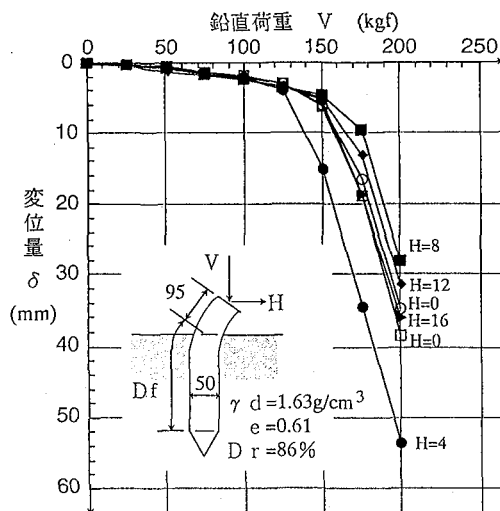
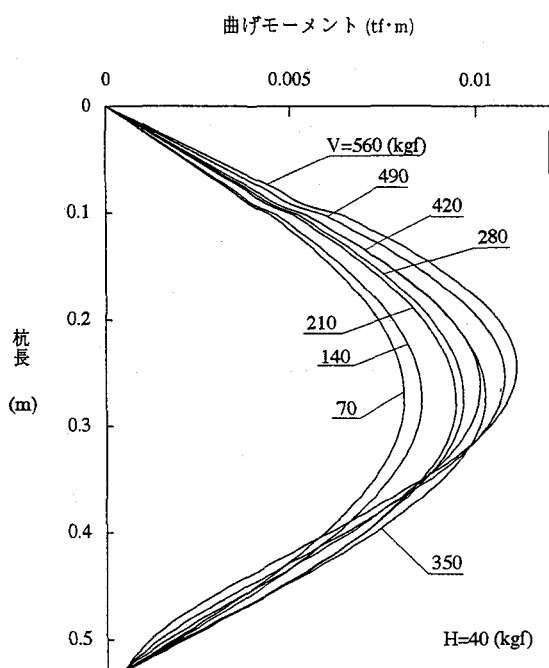
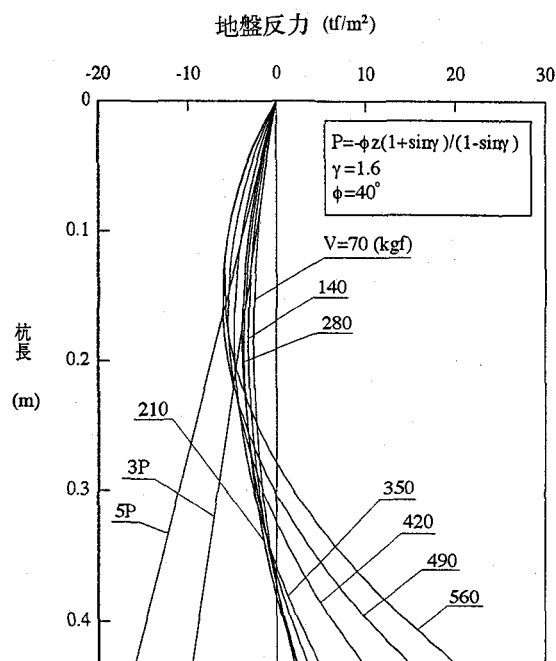


図-12 短い杭の荷重ケースAの荷重と変位の関係



(1) 杭体曲げモーメント (tf・m)



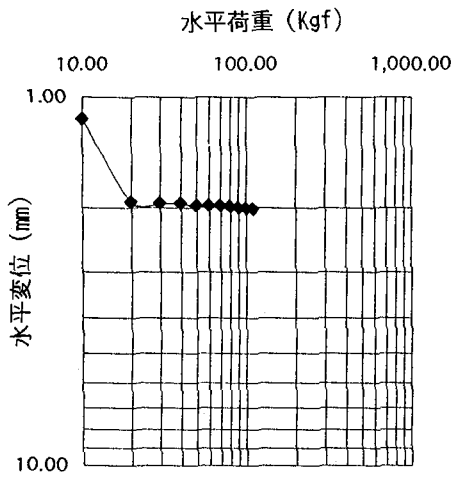
(2) 地盤反力 (tf/m²)

図-13 荷重ケースAの杭体応力と地盤反力例

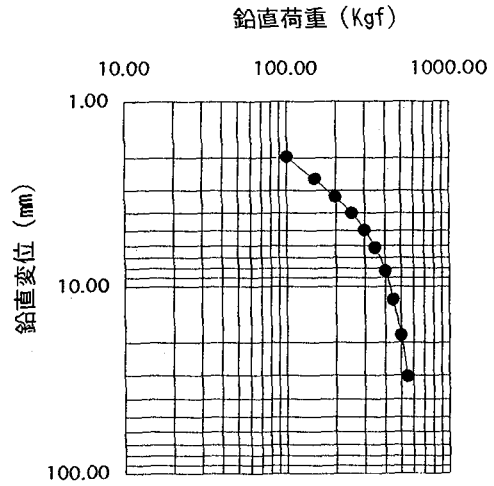
また、 $\tan \theta = \infty$  (水平荷重のみ) 側では水平荷重による荷重限界が卓越する領域である。したがって  $\tan \theta = 0.3 \sim 0.4$  付近は水平と鉛直が同時に決まる領域であることが分かる。図-15 (1) において水平方向荷重の第一限界荷重  $H_y = 150 \text{ kgf}$  および第二限界荷重  $H_u = 205 \text{ kgf}$  に対して荷重傾斜角から対応する鉛直荷重を求めると、それぞれ  $V_y = 375 \text{ kgf}$ 、 $V_u = 512 \text{ kgf}$  となる。図-15 (2) 鉛直荷重・変位関係図から求められる限界荷重はそれぞれ  $V_y = 340 \text{ kgf}$ 、 $V_u = 516 \text{ kgf}$  であり、鉛直、水平がほぼ同時に限界に達していることが分かる。

#### (5) 荷重経路と杭の支持力特性

荷重ケースAは最初に水平荷重のみを載荷するため第二限界荷重以上の荷重をあらかじめ載荷できないので、図-18に示したような曲線の右肩のふくらみが表現できない。荷重ケースBは、VとHを同時に載荷させるので、両荷重方向に変位を生じる。このため、降伏の判定が重要である。しかし、 $H < H_0$  (限界荷重) の範囲では、荷重ケースAと荷重ケースBの杭の支持力特性は図-17と図-18を比較して明らかなように、ほとんど同じであり、この範囲内では杭の支持力は荷重経路に依存しないといえる。

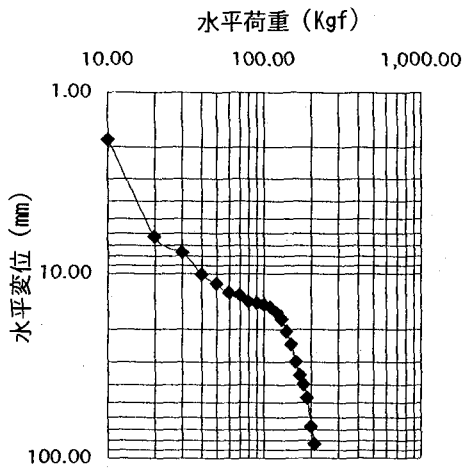


(1) 水平荷重と水平変位の関係

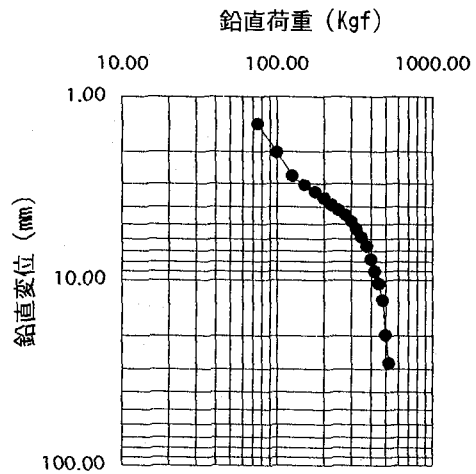


(2) 鉛直荷重と鉛直変位の関係

図-14 長い杭の荷重と変位の関係 ( $\tan \theta = 0.2$ )

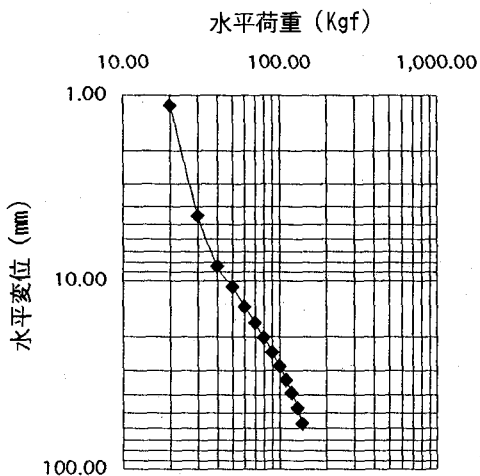


(1) 水平荷重と水平変位の関係

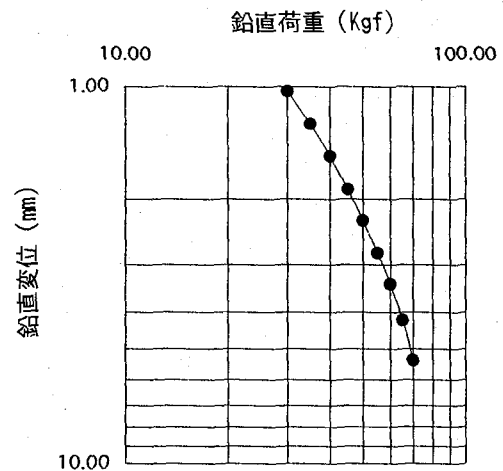


(2) 鉛直荷重と鉛直変位の関係

図-15 長い杭の荷重と変位の関係 ( $\tan \theta = 0.4$ )



(1) 水平荷重と水平変位の関係



(2) 鉛直荷重と鉛直変位の関係

図-16 長い杭の荷重と変位の関係 ( $\tan \theta = 2$ )

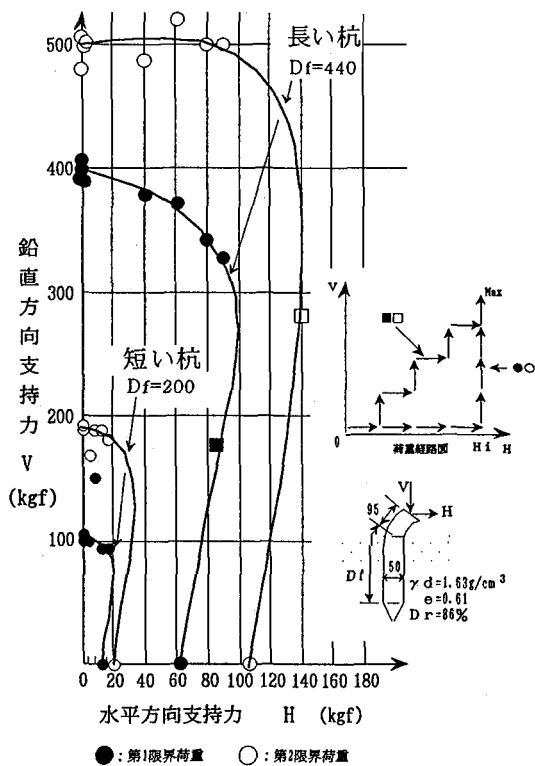


図-17 荷重ケースAの降伏・破壊曲線

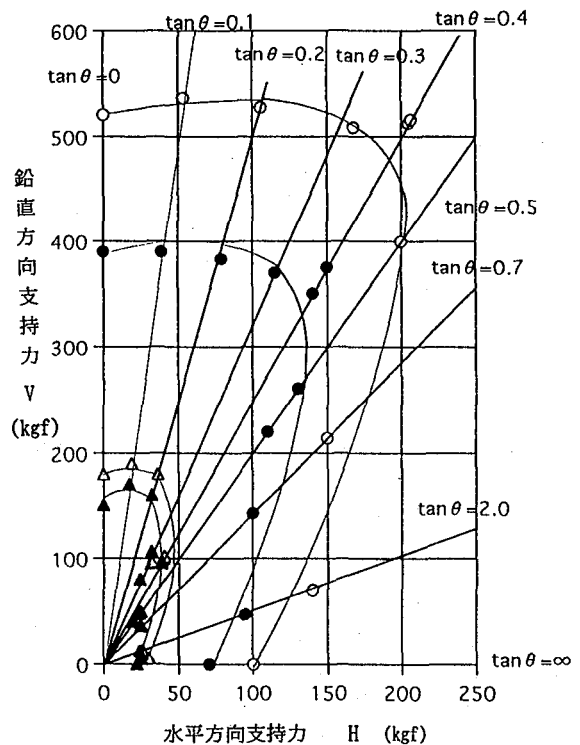


図-18 荷重ケースBの降伏・破壊曲線

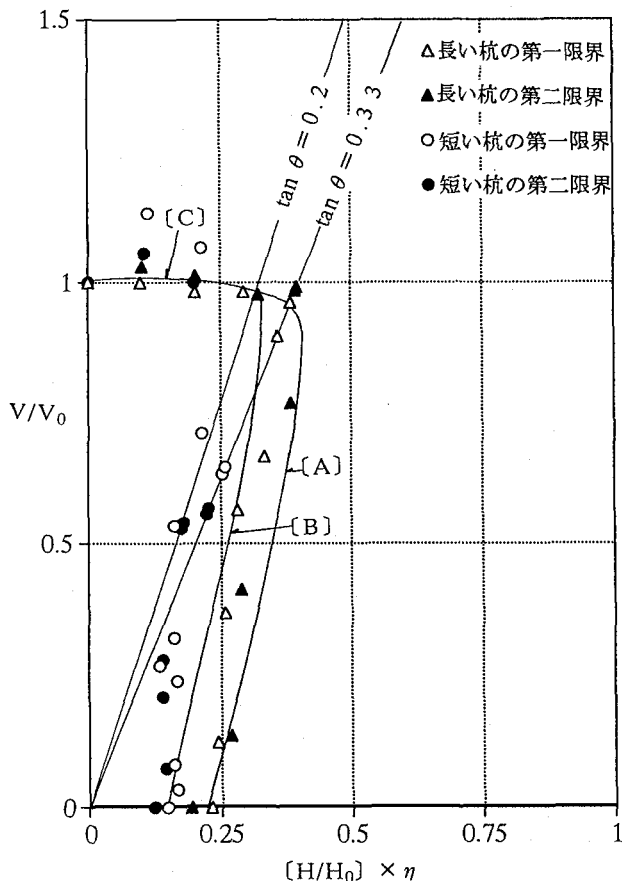


図-19 単杭の支持力の極限・降伏曲線の検討  
荷重ケースBの場合

#### (6) 極限および降伏曲線の考察

図-19は図-18を水平および鉛直の限界荷重を荷重傾斜 $\tan \theta = 0, \infty$ の場合の鉛直、水平方向の限界荷重( $H_0, V_0$ )で割ることで無次元化したものである。 $H/H_0$ はさらに $H_0/V_0 (= \eta)$ を係数として乗じ、限界荷重曲線のイメージで整理したものである。これによると、短い杭と長い杭で傾向は分かれるが、第一限界荷重と第二限界荷重はほぼ同じ曲線を示す傾向にある。また図-19において、長い杭と短い杭で生じる水平耐荷力成分の違い、および降伏曲線形状変化点は杭の根入れ効果によるものと考えられる。

実験結果からこれらの曲線について、実験式として近似的に二次曲線をあてはめてみる。ここで、長い杭は、 $\tan \theta = 0.33$ 、短い杭は、 $\tan \theta = 0.2$ 付近を境に曲線形状が変化することを考慮し、(A)、(B)、(C)の曲線で近似した。式(A)は、 $\tan \theta = 0.33$ 方向をY軸とし、式(C)とほぼ接する二次曲線で長い杭の支持力限界を近似的に表した。式(B)は、 $\tan \theta = 0.2$ 方向をY軸とし、式(C)とほぼ接する二次曲線で短い杭の支持力限界を近似的に表した。支持力限界が、鉛直支持力が卓越する範囲については、長い杭と短い杭で大きな差がないとして、一つの式で限界荷重曲線を近似的に表すこととした。すなわち、式(C)は、 $\tan \theta = 0.33$ 方向をY軸とし、 $\tan \theta = 0$ 側の支持力限界を二次式で近似したものである。また式(2)は、式(A)、式(B)、式(C)を図-19の座標軸に変換し、軸の傾きと二次曲線の係数を

パラメーターとして一つの式にまとめたものである。なおパラメーターの値は、表-2に示す。

参考文献

$$\xi \left( \eta \frac{H}{H_0} \right)^2 \cos^2 \beta + \xi \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \sin^2 \beta - 2 \xi \left( \eta \frac{H}{H_0} \right) \left( \frac{V}{V_0} \right) \sin \beta \cos \beta - \sin \beta \left( \eta \frac{H}{H_0} \right) - \cos \beta \left( \frac{V}{V_0} \right) - \frac{1}{\cos^2 (\tan^{-1} \theta)} = 0$$

----- (2)

表-2 実験式パラメーター

|       | $\xi$ | $\tan \theta$ |
|-------|-------|---------------|
| 式 (A) | 22    | 0.33          |
| 式 (B) | 54    | 0.2           |
| 式 (C) | 0.9   | 0.33          |

5. あとがき

模型杭による組み合わせ荷重 (HとVの傾斜荷重) に関する実験および考察を行い、以下の知見が得られた。

- ① 多重フルイを用いた空中落下方式による試験地盤作成法により、均一な試験地盤が作成された。
- ② 試験地盤の材料である岡垣砂の物理特性、力学特性は、豊浦標準砂と同等であることが確認された。
- ③ 水平方向の限界荷重内では杭の支持力特性は、荷重経路に依存しない。
- ④ 組み合わせ荷重下の支持力特性として、鉛直支持力破壊領域、水平支持力破壊領域、および両者がほぼ同時に限界荷重となるつり合い破壊領域が存在する。
- ⑤ 組み合わせ荷重下の杭の支持力に関して、極限、降伏曲線についての実験式が得られたが、今後、理論的検討を行う必要がある。

今後は、根入れ効果の影響を直接基礎から、長杭までを連続的に組み合わせ荷重下の特性を調査し理論的検証をすすめる必要があると考えている。また、本実験では地盤面に載荷重のない条件であったが、地表面荷重を考慮した実験的研究も重要と考えている。

なお、本文をまとめるにあたり、V.V.R.N.Sastry博士 (Technical University of Nova Scotia, Canada) には貴重な助言を得ました。また、M. Wilhelmy氏 (建設技術研究所実習生、University of Cincinnati, U.S.) と横田康行氏 (建設技術研究所) にはデータのとりまとめをお願いした。ここに記して感謝の意を表します。

1) 例えば、G.G.Meyerhof, Gopal Ranjai : The Bearing Capacity of Rigid Pile Under Inclined Load in Sand : Vertical Pile, Canadian Geotech. Journal, 9, pp430-439, 1972

2) 松井謙二, 前田良刀, 落合英, 李向新 : 岡垣砂を用いた支持力実験用地盤の作成とその力学特性, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 1995. 3, pp528-529

3) 龍岡文夫 : 土の強さと地盤の破壊入門, 第2章 土の要素のせん断強度, 地盤工学会, 1987

4) 地盤工学会 : 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 1993, pp79-84

5) 禿 和英, 前田良刀, 市川博康, 坂田隆博 : 組み合わせ荷重下の単杭の支持力特性に関する模型実験, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 1995. 3, pp530-531