

大変形繰返し水平荷重を受ける砂地盤中の杭の挙動

Lateral Resistance of Single Piles under Large Repeated Loads

菊池喜昭*・高橋邦夫*・鈴木 操**

Yoshiaki Kikuchi, Kunio Takahashi, Misao Suzuki

To evaluate the lateral resistance of single piles for dolphins under repeated loads and large deformations, lateral loading tests were carried out for model piles embedded in sandy soil in a laboratory. The model piles were made of high-tensile steel plates 2500 mm in length and 200 mm in width. The conclusions of this study are as follows: 1) the test results of the relationship between soil reaction p and pile deflection y show that Kubo's formula ($p \propto y^{0.5}$) is applicable to large deflection under the initial loading phase of each package of cycles. 2) the deflections and inclination angles of the pile increase with the loading cycles. Increasing ratios have linear relations to the logarithmic number of loading cycles when the magnitude of the load is kept constant.

Key words: (Pile, Horizontal Force, Single Pile Structures, High-Tensile Steel)

1. はじめに

鉛直に建て込んだ杭に水平力が作用する場合、杭は極めてたわみやすい。この性質を利用した単杭構造 (Single Pile Structure, SPS) を持つ接岸ドルフィンの設計法を検討してきた^{1), 2)} (図-1)。この構造物では、杭のたわみやすい性質を利用して、接岸時のエネルギー吸収の一部を杭に分担させており、杭は大変形するものとして設計することになる。

このように、大きなたわみを得ようとするSPSでは、地盤が広範囲に塑性化するような大変位の問題の検討が必要となる。篠原・久保³⁾は、処女載荷時には、地盤反力 p と杭の変位 y の間に $p \propto y^{0.5}$ という、一般に港研方式と呼ばれている関係があることを示した。しかし、この関係は無限の大変位に適用されるものではないとされ、彼らは、幅10cmの杭の場合には杭の変位が1.5cmを越えるあたりで地盤反力が受働抵抗の限界に達したと結論している。SPSではこの変位よりもはるかに大きなレベルの変位をしたときの杭の挙動が問題となる。

また、この構造物に作用する水平力は、ほぼ同等のレベルの荷重が繰返ししかかると考えられるため、繰返しによる杭の変形挙動を把握しておくことが重要である。

以上の理由から、砂地盤において、模型杭の大変形、繰返し水平載荷実験を実施し、①地盤が塑性化するような大変形時の単杭の挙動特性と②繰返し水平荷重を受けるの単杭の挙動について検討した。

なお、SPSでは大きなたわみを得るため、杭材として大きな降伏ひずみを有する、高張力鋼を利用することを考えている。

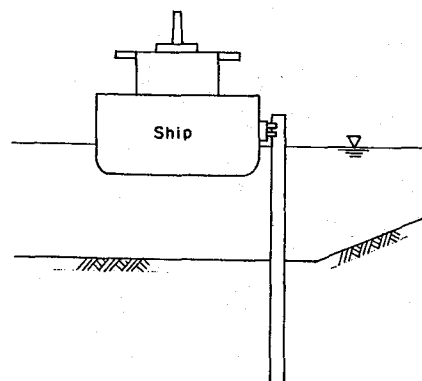


図-1 単杭構造 (SPS) の例

表-1 浅間山砂の物理特性

土粒子の密度(g/cm ³)	2.746
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.681
最小乾燥密度(g/cm ³)	1.336

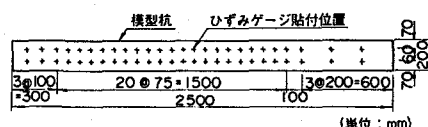


図-2 ひずみゲージ貼付位置

2. 実験の概要

実験はコンクリート製の大型土槽を用いて行った。土槽の内寸法は、長さ6m、幅3m、深さ3mである。実験に用いた砂は、千葉県富津市の浅間山から採取したもので、2mmのふるいを通過したものを用いている。物理定数を表-1に示す。三軸圧縮試験より求めた内部摩擦角 ϕ は今回用いた密度では、およそ39°である。実験にはこの砂を乾燥状態で使用している。

実験には高張力鋼板 (SHY685, 降伏点 σ_{sy} =70kgf/mm²) の杭を用いた。杭の長さは250cm、幅20cmであり、杭の剛性を変えるために3種類の板厚のものを用いた(t =6.7, 8.4, 10.6mm)。杭には、ひずみゲージを図-2に示すような点に貼りつけてあり、曲げひずみを測定している。

地盤は乾燥砂を空中落下させて作成した。地盤は普通の地盤とやや固い地盤の2種類作成した。それぞれの地盤の原位置乾燥密度 ρ_d は、普通の地盤で約1.459g/cm³ (相対密度41%)、やや固い地盤で約1.548g/cm³ (相対密度67%)であった。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所土質部 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 正会員 日本鋼管株式会社

模型杭は図-3に示すようにセットしている。地盤の層厚は2.25mとし、杭の根入れ長は2.1mとした。載荷高さは25cmである。

載荷は重錘を所定の荷重に見合う個数を載せて行い、水平荷重を変化させるごとに、時間、荷重、載荷点の杭の変位、杭頭変位、地表面での杭の変位、杭の曲げひずみを測定した。そのほか必要に応じて杭周辺の地盤の変形状態を観察した。

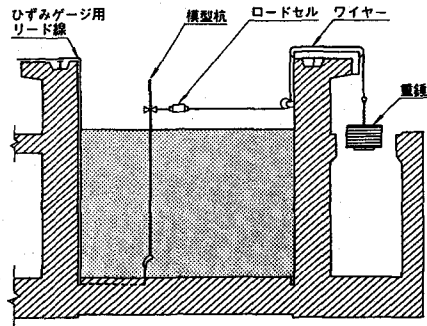


図-3 載荷の状況

3. スプライン関数による実験データ近似手法

測定された曲げモーメントから地盤反力を求めるためには、測定値を2回微分しなければならないが、通常は測定された曲げモーメント分布を最小自乗法により多項式（通常8次から16次）で近似し、2回微分して求めることがよく行われている。この方法では、2回微分による精度の低下などの多くの問題がある⁴⁾。

今回の解析では、3次の自然スプライン関数を用いて、曲げモーメントの近似を行っている。また、微分したときに、よりなめらかな曲線を得るために、ひとつの関数を2回微分することを避け、一度微分をした後にもう一度スプライン近似をやり直してから2回目の微分をしている。プログラミングについては、参考文献5)を参考にした。

多項式近似とスプライン近似の両者の特徴について以下検討する。

まず、港研方式のS型地盤を想定して、実験条件に近い杭と地盤の条件を想定し、杭に働く曲げひずみとせん断力、地盤反力を計算する。この計算結果から、既知の曲げモーメントの値として今回の実験で測定している深度でのデータを与え、多項式近似とスプライン近似し、さらに両者を微分した結果を比較する。図-4と図-5に結果を示す。ここで、○は曲げモーメントが与えられた深度での理論値であり、実線が近似曲線である。曲げモーメントの近似は両手法にあまり差がないが、図-4に示す多項式近似の場合には解析で重要な地表面付近の地盤反力の近似精度が極めて低い。このように、多項式近似の場合は、曲げモーメントの近似精度は問題がないが、2回微分した地盤反力の値は本来想定される値からかけ離れたものとなっており、データの安定性が悪いことがわかる。他方、スプライン関数による今回の近似手法は微分後の近似結果の安定性が良く、今回の実験データの解析に用いるのに適していると考えられる。

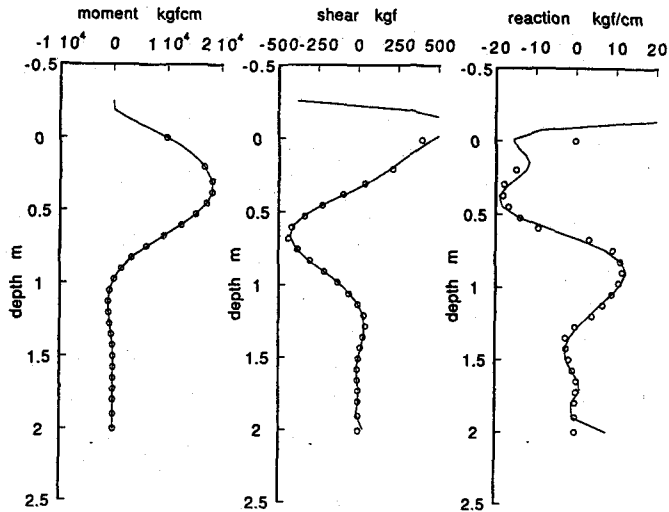


図-4 最小自乗法による多項式近似

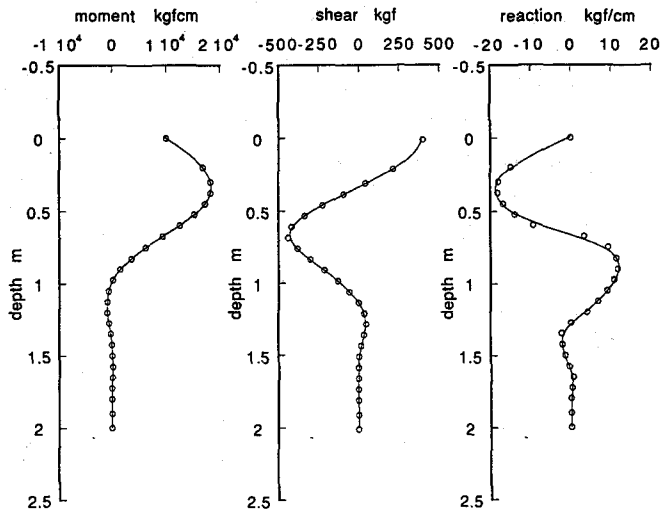


図-5 スプライン関数による近似

4. 実験結果及び考察

4. 1 大変形時の挙動

図-6に、地盤反力係数を求める方法としてよく用いられている、処女載荷状態での杭頭変位 y_{top} と杭頭荷重 T の関係を示す。図中で、○が実験結果である。この実験では、載荷装置の構造上、載荷点の高さが杭頭の変位が増えるとともに下がり、たわみ角が大きくなると変位を小さくする方向の曲げモーメントが作用するようになる。そこで、載荷点が下がる効果とたわみ角が微小でないことを考慮して港研方式の計算を補正した計算結果を図中に実線で示してある。上記の補正に加えて、杭頭に発生しているであろう曲げモーメントを加味して計算した結果を黒丸で示している。この点の場合には、杭頭に最大曲げモーメントの約5%の曲げモーメントを作用させている。

この図の比較よりわかるように、載荷点位置の補正を行った結果と実験結果は、変位がかなり大きくなるまでよく一致している。差が出てくるようになった場合には、実験結果は地盤反力係数 k_s が大きくなる方向にわずかにずれていき、これはおもに杭頭に働く曲げモーメントが原因であると考えられる。これらのことから、マクロにみた場合の地盤反力係数 k_s は載荷中ほぼ一定であったと考えられる。

曲げモーメントと杭頭変位の測定結果と、杭の変位、曲げモーメント、地盤反力の深度分布の近似計算結果の例を図-7に示す。図中の○が実測値であり、近似曲線は実線で示している。また、杭の挙動が港研方式(S型)に従うとしたときの変位、曲げモーメント、地盤反力の分布の計算結果は点線で示している。

図よりわかるように、近似計算の結果求められた杭頭変位量は実測値とよくあっている。また、今回の地盤は、港研方式のS型地盤とする仮定がよく合うことがすでに杭頭荷重と杭頭変位の関係から求められているが、曲げモーメント分布、地盤反力分布についても港研方式のS型地盤とする仮定と近似計算結果が比較的よく合い、特に杭の横抵抗で問題となる比較的浅い部分で、港研方式の仮定が実験結果とよく一致していることがわかる。

ただし、荷重が増えるにつれて、実験の近似結果と港研方式の計算結果がわずかつ異なっていく。つまり、計算結果に比べ、近似の地中部変位が小さく、浅部の地盤反力はほぼ同じかやや大きくなっている。一方深いところでは、逆に近似計算結果の地盤反力は少し小さくなっている。以上のことから、この地盤では、浅部では地盤反力係数が平均的な値よりやや大きく、深部では平均的な値よりやや小さくなっていることがわかる。篠原・久保³⁾は、このように深いところで港研方式が合わなくなるのは、地盤そのものの性質ではなく、杭が曲がるのが原因であるとしている。

より直接的に港研方式の適用性を見るために、杭の挙動に支配的な、曲げモーメントが最大を示す深さ $l_{m,max}$ より上の深度(深度30cm以浅)の杭の変位と地盤反力の関係を示したのが、図-8である。図よりわかるように、杭の変位が15cm程度になっても、地盤反力が飽和する様子があらわれない。また、対数で表したときの杭の変位と地盤反力の関係の平均的な勾配はほぼ0.5となっている。このことから、地盤反力 P/Bx を変位 y の平方根で割って、変位との関係を示したのが、図-9である。今回行ったすべての実験結果において、港研方式の地盤反力係数にあたる $P/Bxy^{0.5}=k_s$ は、広い範囲の変位に対してわずかに右上がりか、ほぼ一定の値となっている。また、図-7の比較から予想されるように、浅い部分の $P/Bxy^{0.5}=k_s$ の値は、杭頭の荷重と変位の関係より求めた地盤反力係数よりわずかに大きい。

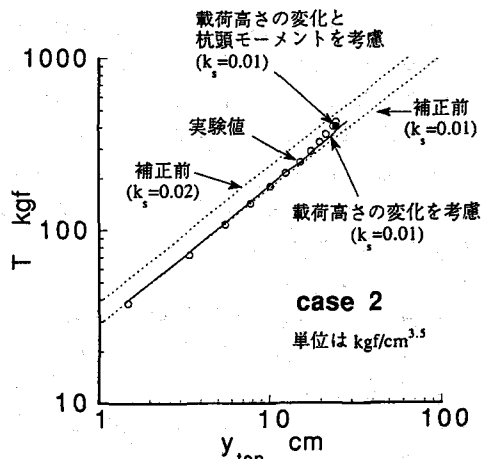


図-6 杭頭変位と杭頭荷重の関係

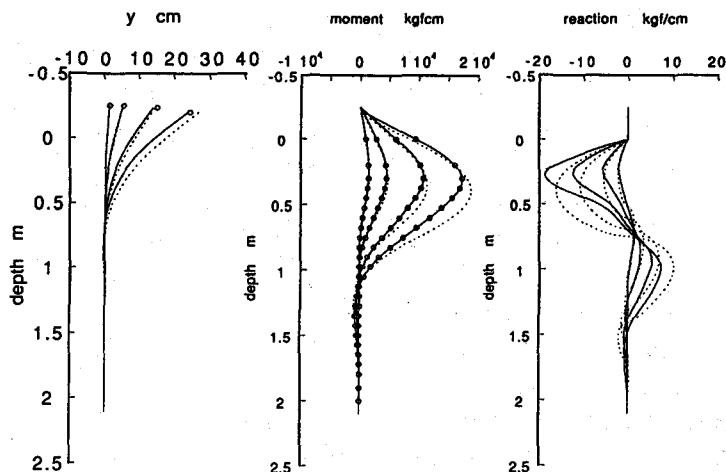


図-7 実験結果と港研方式の比較

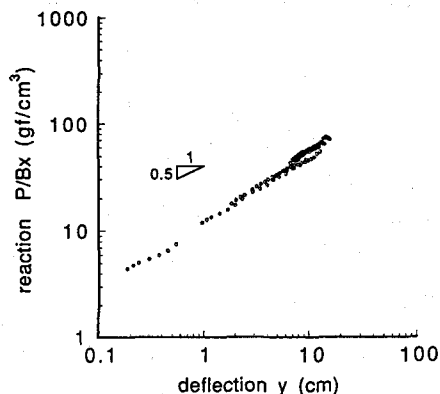


図-8 杭の変位と地盤反力の関係

このように、浅いところの地盤反力係数 k_s は杭頭の荷重変位関係から求められたものより大きく、しかも変位とともにわずかに大きくなる傾向にある。深いところの地盤反力係数 k_s は、杭頭の荷重変位関係から求めたものよりも小さめの値を取る。しかし、平均的な値として求められる杭頭変位から推定した地盤反力係数 k_s は一定であるといえる。また、地中部の地盤反力係数 k_s が深度によって違うことが最大曲げモーメントに及ぼす影響はほとんどない。

今回の実験の杭の幅は20cmと、篠原・久保³⁾が示した実験の時の杭の幅の倍になっているが、彼らが反力が飽和したとする変位の10倍以上になっても、今回の実験では反力は飽和していない。このように、地盤の反力は簡単には飽和しない。杭を水平方向に変位させた場合、あるところから上は地盤が塑性化する領域があらわれると考えられるが、その領域は載荷重が増えるにつれて深さ方向と水平方向に広がっていく。このため、地盤反力が飽和するまでに必要な変位量は塑性化する領域の広がり方に支配されていると考えられる。地盤の要素の応力ひずみ関係に単純な双曲線近似が適用したとしても、杭の変位と地盤反力の関係には、港研方式に似た、なかなか飽和しにくい関係がある。このため、杭の反力と変位の関係は双曲線式や弾塑性式では近似できないと考えられる。

4. 2 繰返し荷重を受けたときの挙動

図-10に繰返し載荷時の載荷重 T と杭頭変位 y_{top} の関係を示す。図を見ると、繰返し荷重のレベルが前のステップより高くなったときには繰返し回数が増えるにつれて杭頭変位が増えるが、荷重のレベルが前よりも下がったときには繰返し載荷をしても杭頭変位が増えないことが示されている。

実験の観察によれば、処女載荷時には、荷重を載荷すると杭前面の地盤が徐々に盛り上がり、杭の背面の地盤は杭が前方向に変位するに従って、背面の隙間を埋めるように砂が崩れ落ち、だんだんと大きな穴があいていく。こうして、安息角に相当する勾配を持つ斜面ができる。一方、荷重を除荷するときには、杭の前面側に斜面ができ前面側の砂が穴にすべりこんでくる。しかし、この量は背面から穴に落ちる量よりは少ない。このようにして、背面にできる穴に砂が落ち込むことにより、杭は荷重を繰返し受けるに従いわずかず杭頭変位が伸びていくように見える。このような考察はすでに沢口⁶⁾によりなされている。最終的には、砂の落ち込む量はだんだん少なくなっていく、杭頭変位の伸びはどこかで止まるか、一回ごとの変位の伸びが少なくなっていくものと考えられる。

杭頭変位はこのように少しずつ伸びて行くが、杭の繰返し挙動はだんだんと弾性的になり、さらにピーク荷重時と荷重がゼロの時の2点を結ぶ割線弾性係数が徐々に大きくなる傾向にある。

たわみ角についても、繰返し載荷につれて変位が増加し、繰返しとともに弾性的挙動を示すことについては、変位挙動と同様である⁴⁾。

繰返し荷重のレベルが既往最大の時に繰返し回数が、地表面変位 y_0 に与える影響について詳しくみる。ここでは、図-11に示すような諸量を定義する。図に示すように、1回目の載荷時の最大荷重時の地表面変位を y_n とし、2回目の載荷直前、つまり、1回目の載荷の残留地表面変位を y_{n-1} とする。このようにして、 n 回目の最大荷重時の地表面変位を y_m とし、 $n+1$ 回目の載荷サイクル直前の残留地表面変位を y_m とする。

このように定義した諸量の繰返し回数ごとの変化を図-12に示す。地表面での変位は測定した曲げモーメントを積分したものをを用いている。図-12(a)は地表面変位比 y_m/y_n の変化を示している。(b)は、各サイクルごとの、載荷過程での地表面変位の変化量 $y_m - y_{n-1}$ の第1回載荷時の変位 y_n に対する比であり、割線弾性係数の比の逆数である。

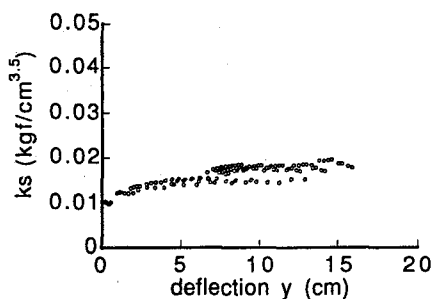


図-9 杭の変位と地盤反力係数の関係

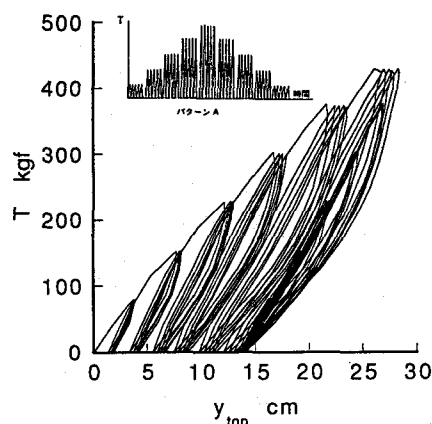


図-10 杭頭変位と杭頭荷重の関係

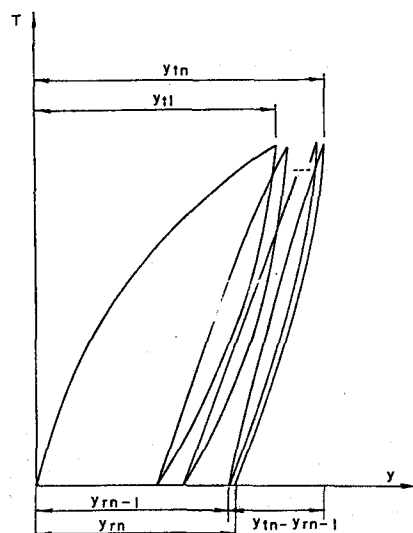


図-11 繰返しによる変位の諸量の定義

図-12(a)からわかるように、地表面変位は繰返し回数が増えるにつれて増加する。30回の繰返しで最大1.4倍程度杭頭変位量が増えることがわかる。図-12(b)の縦軸にとっている割線弾性係数の逆数はすぐに0.4~0.6の間に収束する傾向を示しており、割線弾性係数は初期載荷時のほぼ2倍となって安定する。

地表面たわみ角についても、30回の繰返しで最大1.2倍程度増加する傾向にあり、繰返し回数の対数に比例してほぼ直線的に伸びる傾向があった⁴⁾。

図-13に、今回の実験結果と篠原・久保の実験結果と、現場実験の結果を同時に示した⁴⁾。篠原・久保の実験は、飽和砂地盤中で実施されており、板杭と管杭を用いている。現地での実験はN値が深度方向にほぼ一定の砂地盤で管杭を用いて行われたものである。杭の形状が異なる場合には、周辺の地盤の動きが異なると考えられ、繰返し挙動に影響がある可能性があるが、篠原・久保の報告では杭の形状の違いによる変位の伸びの差はなかったとされている。

いずれの結果からでも、繰返し回数が少ないときには変位比 y_m/y_n の伸びが大きく、繰返し回数が増えるにつれて、変位比 y_m/y_n は一定値に漸近する挙動を示す。ただし、今回の実験結果は既往の実験結果に比べると変位の伸びはやや小さめであり、既往の結果は今回の実験結果のばらつきのほぼ上限に位置している。

図-14は横軸に繰返し回数の対数を取って杭頭変位の伸びを示したものである。同図にも、久保の実験結果と、現場実験の結果も同時に示してある⁴⁾。これらの結果からは、杭頭変位は繰返し回数が増えるにつれて増加する傾向がみられ、実験で用いた繰返し回数の範囲では、杭頭変位量の伸びは、繰返し回数の対数にほぼ比例した傾向にある。この傾向が続くものと仮定すると、100回程度の繰返し荷重が作用したときで、繰返しによる杭頭変位量は処女荷重時に比べて1.4から1.6倍に達する。

杭形状による変位の伸びに差がないとすると、今回の実験と既往の実験の結果の差は地盤中の水の有無の影響が無視しえないと可能性がある。地盤中の水の存在の有無によって実験結果が異なることについて、Barton⁷⁾は、砂地盤中の水の有無が杭の繰返し挙動におよぼす影響として、水がある場合の方が水がない場合よりも変位の伸びが早く収束すると報告している。しかし、今回の比較では、Bartonが観察しているような、杭の変位の伸びが収束するのに必要な繰返し回数が異なるような挙動は示していない。ただし、実験データにはばらつきが大きく、水の存在する状態での繰返し実験のデータが少ないので、今回の比較だけでは明確な結論が得られないと考えられる。

繰返し載荷による杭頭部の変位の伸びについては、根入れ比 E_p/I_{m1} が影響することが考えられる。特に長杭と考えられない時にはその影響が大であると思われる。今回の実験では、根入れ比 E_p はどの荷重レベルでも長杭の範疇にはいる1.8よりも大きかった。荷重レベルごとに実験結果を平均し、杭頭変位の伸び特性を検討したが、荷重レベルが異なっても杭の変位の伸びの傾向はほとんど同じであった。このように、今回の実験範囲のように長杭であれば、変位の伸びに対する荷重レベルの影響はないようである。この傾向は、杭頭たわみ角についても同様であった。

繰返し載荷による杭の変位と曲げモーメントの変化を示したのが図-15である。図中の矢印は、繰返し載荷によってどのように挙動が変化したかを示す。ただし、変位は曲げモーメントを2回積分して求めたものである。図よりわかるように、杭に繰返しの最大荷重が作用しているときには、ほぼ曲げモーメントの第一ゼロ点の深さ I_{m1} のあたりから変位が増え(図-15(a))、最大曲げモーメントの値はほとんど変化しないが、 I_{m1} がやや深くなる傾向にある(図-15(b))。

杭の変位と地盤反力の関係がどのように変化するか、代表的な深度での結果を図-16と図-17に示す。

図-16は比較的浅い深度での挙動であるが、荷重の増加と共に杭の変位と地盤反力が増加し、この部分では、港研方式の仮定する変位と地盤反力の関係が成立している。ただし、繰返しによる最大荷重作用時の地盤反力係数は処女載荷時よりも大きくなる傾向がみられる。

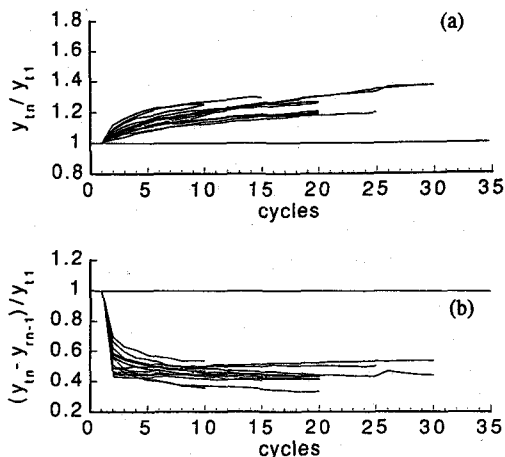


図-12 繰返し回数と変位比の関係

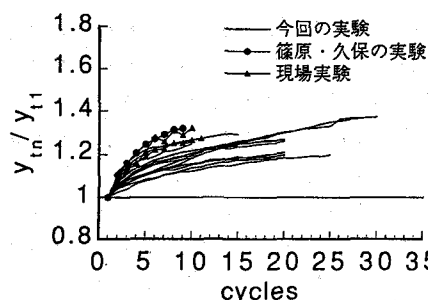


図-13 繰返し回数と地表面変位比の関係

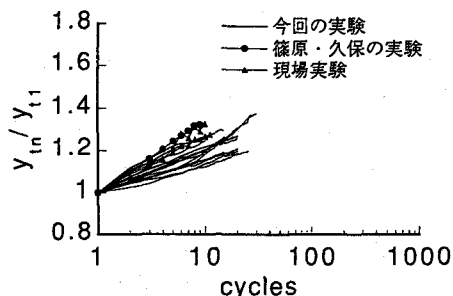


図-14 繰返し回数と地表面変位比の関係

一方、図-17にはやや深いところの挙動を示す。この部分では、処女載荷時には、アーチングの影響を受け、十分な地盤反力を発揮しないが、除荷過程で、杭の上部が戻り出すと、十分な地盤反力を発揮するようになる。しかし、この深さでは、最大荷重載荷時の変位はこの部分の最大変位よりも小さくなるため、大きな地盤反力を発揮しなくなる挙動を示す。

このような挙動を示す原因として以下のことが考えられる。

荷重の増加過程では、杭の浅い部分の変位が増加し、おもに $I_{m, max}$ より浅い部分の背後の砂が杭の深い部分に滑り落ちる。一方、除荷過程では、杭の深い部分($I_{m, max}$ から I_{m1} 付近)が先方に変位し、杭背面のその周辺の砂が、滑り落ちる。このように、載荷過程では杭背面の比較的浅部に砂が供給され、除荷過程ではより深いところに砂が供給されるといふ二段階の過程を経ながら上部の砂が杭の背面に落ち込んでくることによって残留変位が蓄積されていく。

また、曲げモーメントが最大となる深度より上方では、最大荷重作用時に最大変位が生じ、繰返しによって地盤がやや密度化して地盤反力が増加する。下方の I_{m1} 付近までは、最大荷重作用時には最大変位が生じず、十分な地盤反力を発揮しなくなり、曲げモーメントの第一ゼロ点の深さは深くなる傾向にある。このような変化は、周辺の砂の移動を少なからず受けると考えられ、収束には多数の繰返しを必要とする。

一方、弾性荷重レベルの繰返し載荷では、比較的深部(最大荷重時の I_{m1} 前後の深度)の挙動は、既往の最大荷重の載荷除荷でほとんど決定され、 $I_{m, max}$ から I_{m1} 付近の挙動もほとんど弾性的になり、繰返しによってたわみが変化するような挙動はしない。

5. 結論

以上の結果から以下の結論を得る。

- ① スプライン関数を用いたデータ近似手法を用いることによって地盤反力の深度分布の推定精度を向上させることができた。
- ② 処女載荷時には、かなりの大変形に対しても港研方式の仮定が成立する。このことは、地盤反力がなかなか上限に達しないことを意味する。
- ③ 同一荷重を繰返しして受けた場合、変位の増加は、繰返し回数のほぼ対数に比例して大きくなる。このとき、杭の変位は、 $I_{m, max}$ から I_{m1} あたりの比較的深いところから増大する。また、砂地盤では杭の最大曲げモーメントは増加しない。

参考文献

1) 木内里美・松下基也・高橋正美・掛江正紀・磯崎総一郎・鈴木操：砂地盤に打ち込まれた水平荷重を受ける単杭構造物の挙動に関する実大載荷実験，第15回海洋開発シンポジウム，1990，pp.107-112. 2) Takahashi K., Kikuchi Y., Suzuki M.: Lateral Resistance of Single Pile under Large Repeated Load, Proc. of the Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development, Vol.1, 1991, pp.753-758. 3) 篠原登美雄・久保浩一：杭の横抵抗に関する実験的研究(その1) - 垂直自由単杭の横抵抗 -，運輸技術研究所報告，第11巻第6号，1961，pp.169-242. 4) 菊池喜昭・高橋邦夫・鈴木操：繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動，港研報告第31巻第4号，1992，pp.33-60. 5) 吉村和美・高山文雄：パソコンによるスプライン関数，東京電機大学出版局，1988，p.217. 6) 沢口正俊：杭の横抵抗における地盤常数に関する研究，港研報告第7巻第2号，1968，pp.65-94. 7) Barton Y.: Response of Pile Groups to Lateral Loading in the Centrifuge, Proc. of Symp. on the Application of Centrifuge Modeling to Geotechnical Design, 1984, pp.456-472.

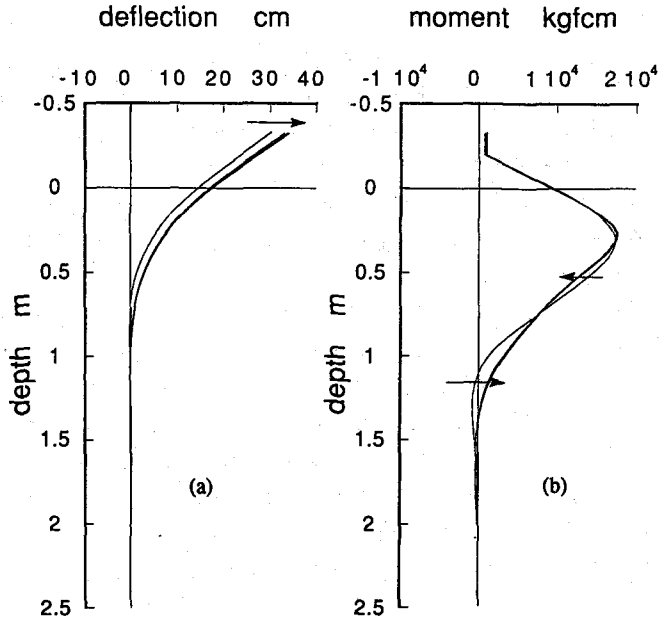


図-15 繰返し載荷による杭挙動の変化

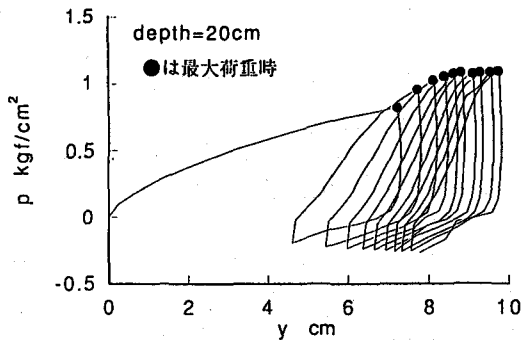


図-16 浅い部分の変位と地盤反力の関係

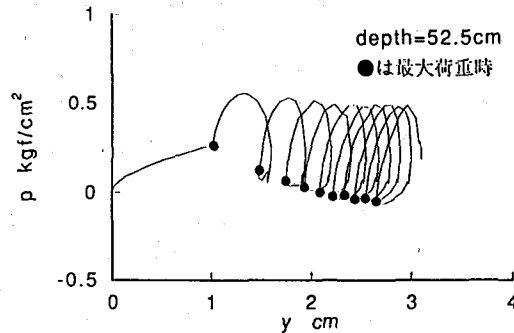


図-17 浅い部分の変位と地盤反力の関係