

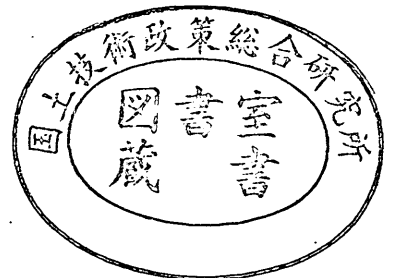
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 31 NO. 4 DEC 1992

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第31巻 第4号 (Vol. 31, No. 4) 1992年12月 (Dec. 1992)

目 次 (CONTENTS)

1. 越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究
— 親水性港湾構造物に関する水工的研究 (第2報) —
..... 高橋重雄・遠藤仁彦・室 善一郎 3
(Experimental Study on People's Safety Against Overtopping
Waves on Breakwaters
— A study on Amenity-oriented Port Structures (2nd Rept.) —
..... Shigeo TAKAHASHI, Kimihiko ENDOH, and Zen-ichiro MURO)
2. 繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動
..... 菊池喜昭・高橋邦夫・鈴木 操 33
(Lateral Resistance of Single Piles under Large Repeated Loads
..... Yoshiaki KIKUCHI, Kunio TAKAHASHI, and Misao SUZUKI)
3. 我が国の正規圧密された海成粘性土の静的コーン貫入試験から得られる特性
..... 田中洋行・榊原基生・後藤健二・鈴木耕司・深沢 健 61
(Properties of Japanese Normally Consolidated Marine Clays
Obtained from Static Piezocone Penetration Test.
..... Hiroyuki TANAKA, Motoo SAKAKIBARA, Kenji GOTO, Kouji SUZUKI
and Takeshi FUKAZAWA.)

2. 繰返し水平荷重下で大変形する 砂地盤中の杭の挙動

菊池 喜昭*
高橋 邦夫**
鈴木 操***

要 旨

本研究では、乾燥した砂地盤中に建て込んだ幅20cmの板状の模型杭に水平方向繰返し荷重を行い大きな変形を与え、大変形時の杭の挙動と繰返し荷重に対する杭の挙動について検討した。

その結果、処女荷重時には、大変形時(今回の模型実験のレベルで変位 $y > 15\text{cm}$)においても港研方式($p \propto y^{0.5}$)が適用できることがわかった。このことは、地盤反力がなかなか上限値に達しないことを意味する。また、同じ荷重を繰返し荷重した場合には、杭の変位及びたわみ角は次第に増えていく。その伸びは、繰返し回数の対数にほぼ比例する。繰返し荷重時に杭背面に砂が上部から供給されるため、杭の変位が増えていく。砂の供給はなくならないため、変位は繰返し回数とともに増加する。このとき、最大曲げモーメントの発生する深さ l_{max} から曲げモーメント第一ゼロ点の深さ l_{m1} の地盤反力の発生仕方が変化し、杭の変位の伸びは曲げモーメント第一ゼロ点の深さ l_{m1} あたりから顕著となる。

キーワード：砂地盤、杭、室内実験、水平荷重、大変形、接岸ドルフィン、SPS、高張力鋼

* 土質部主任研究官
** 土質部基礎工研究室長
*** 日本鋼管株式会社

2. Lateral Resistance of Single Piles under Large Repeated Loads

Yoshiaki KIKUCHI^{*}
Kunio TAKAHASHI^{**}
Misao SUZUKI^{***}

Synopsis

To evaluate the lateral resistance of single piles for dolphins under repeated loads and large deformations, lateral loading tests are carried out for model piles embedded in sandy soil in a laboratory. The model piles are 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. 3) the method for estimating the pile behavior under repeated loads is presented.

Key Words : Sandy Ground, Pile, Laboratory Test, Horizontal Force, Breasting Dolphin, Single Pile Structure, High-Tensile Steel.

^{*} Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division.
^{**} Chief of Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division.
^{***} NKK Corporation.

目 次

1. ま え が き	37
2. 模 型 実 験	37
2.1 実験装置及び試料	37
2.2 模型杭の検定	38
2.3 実験方法	39
2.4 スプライン関数による実験データ近似法	41
3. 実験結果及び考察	43
3.1 予備実験	44
3.2 大変形時の挙動	46
3.3 繰返し荷重を受けたときの挙動	50
4. 大変形繰返し荷重を受けた単杭の挙動の推定	58
5. 結 論	59
6. あ と が き	59
参 考 文 献	60
記 号 一 覧 表	60

1. まえがき

鉛直に建て込んだ杭に水平力が作用する場合には、杭は極めてたわみやすく、通常の構造物では不利な性質と考えられている。ところが、この性質を利用したものとして単杭構造 (Single Pile Structure) が考えられている^{1)~7)} (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。

通常用いられている杭では普通鋼 (降伏応力 $\sigma_{sy} = 24 \text{ kgf/mm}^2$) を利用しているが、単杭構造として考えている杭では高張力鋼 (降伏応力 $\sigma_{sy} = 32 \sim 70 \text{ kgf/mm}^2$) を利用することを考えており、今回の実験でも高張力鋼を用いている。高張力鋼は普通鋼の1.3倍から3倍の降伏応力を有しており、従って通常の1.3倍から3倍の曲げひずみを許容できる。これまでの杭構造物では、このような材料の利用はほとんど考えられなかったため、地盤の変形の小さいところでの研究しか必要でなかったが、高張力鋼を用いて大きなたわみを得ようとする単杭構造では、新たに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った。

特に砂地盤では、繰返し載荷によって杭の変位が無限に大きくなっていくことが考えにくいため、繰返し載荷そのものについても余り研究がなされていない。しかし、今回対象とするような大変位を許容する構造物では、繰返しによる杭の変形挙動を把握しておくことは重要である。

このため、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、以下の項目について単杭の水平抵抗特性を明らかにした。

- ① 繰返し水平荷重を受けたときの単杭の挙動
 - ② 地盤が塑性化するような大変形時の単杭の挙動
- なお、本論文では、長杭と考えられる範囲内での実験を実施した結果をとりまとめている。

2. 模型実験

2.1 実験装置及び試料

実験は基礎工研究室の大型土槽を用いて行った。土槽の内寸法は、図-2に示すように、長さ6m、幅3m、深さ3mである。土槽は2/3だけ地中にあり、長手方向と幅方向の各一辺ずつの外側に、載荷のための空間をとってある。土槽の内壁には、実験用の器具や計測機器などが容易に取り付けられるようにインサートボルトが深さ方向に20cm間隔、長さ方向に1m間隔 (ただし、上部は20cm間隔) で埋め込まれている。

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を用いている。その粒径加積曲線を図-3に、物理定数を表-1に、三軸圧縮試験より求めた内部摩擦角 ϕ_d ($\sin \phi_d = (\sigma'_1 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 + \sigma'_3)$) を図-4に示す。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 $\sigma_{sy} = 70 \text{ kgf/mm}^2$) の杭を用いた。ここでの実験では、杭に大変形を与え、かつ杭を繰返し利用することを前提にしたので、大変形時でも杭が降伏しないような材質のものを選んでいく。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 (図-5)。この模型杭は、1524×3048×12mmの板を所定の寸法に切削、加工して製作した。製作した模型杭の諸

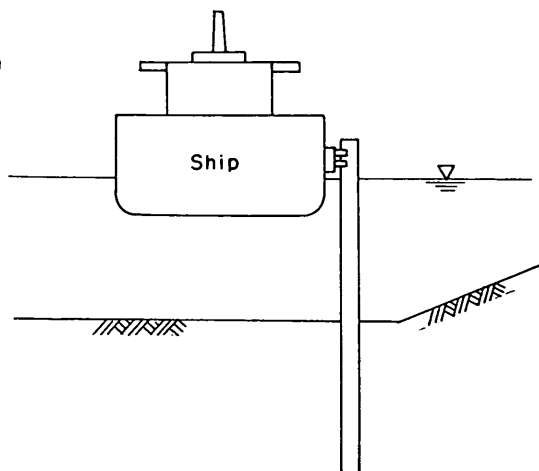


図-1 単杭ドルフィン例

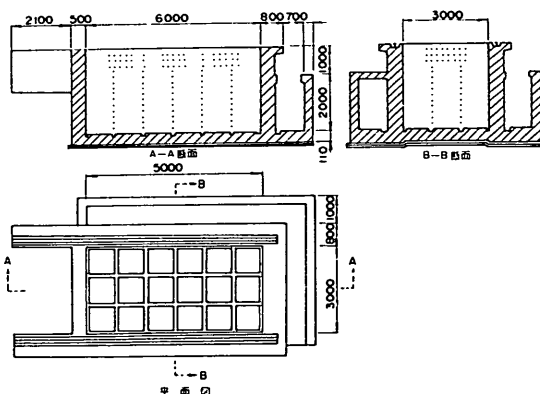


図-2 大型土槽

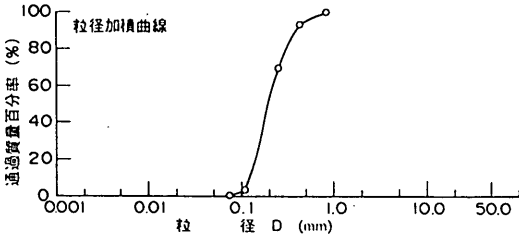


図-3 粒径過積曲線

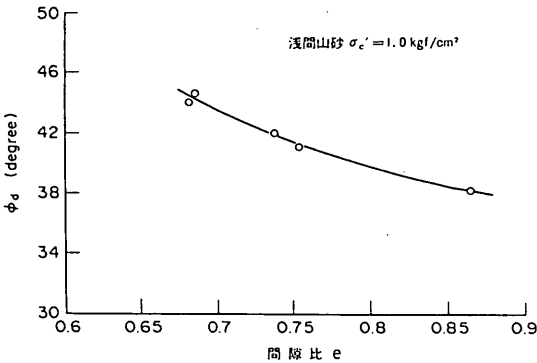


図-4 内部摩擦角

表-1 浅間山砂の物理特性

土粒子密度 ρ_s	(g/cm^3)	2.746
最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$	(g/cm^3)	1.681
最小乾燥密度 $\rho_{d,min}$	(g/cm^3)	1.336

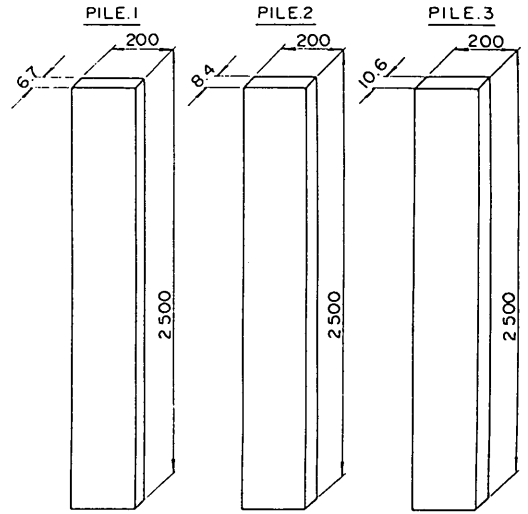


図-5 模型杭

表-2 模型杭の諸定数

	板厚 (mm)	EI ($kgfcm^2$)	EZ ($kgfcm$)
杭1	6.7	1.05×10^6	3.13×10^6
杭2	8.4	2.10×10^6	5.00×10^6
杭3	10.6	4.20×10^6	7.92×10^6

表-1 浅間山砂の物理特性

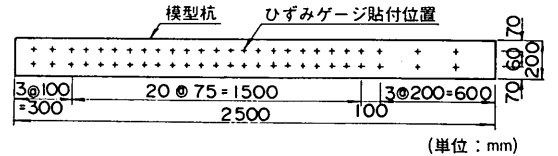


図-6 ひずみゲージ添付位置

定数を表-2に示す。

ひずみゲージは図-6に示すように1測定点あたり片面2枚×2面=4枚、26測定点あるので、杭1本あたり計104枚貼りつけてある。測定にあたっては4枚でブリッジを組み、曲げひずみを測定している。コーティングに際して、1次コーティングとしてひずみゲージ部分をネオプレンゴムでコーティングし、2次コーティングとして杭全体をポリエステル樹脂でコーティングした。

2.2 模型杭の検定

製作した杭すべてについて、水平載荷実験の前にキャリブレーションを行った。キャリブレーションは、図-7に示すように、単純梁のモデルとし、重錘を乗せることにより荷重を加えて行った。

検定試験での測定項目は、載荷重、杭に生じる曲げ、

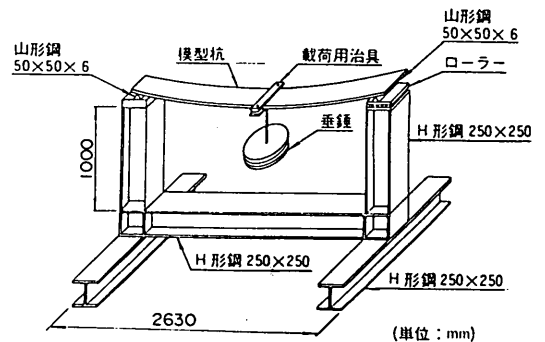


図-7 模型杭のキャリブレーション

表-3 コーティングを含む杭の剛性

	EI (kgfcm ²)	EZ' (kgfcm)
杭 1	1.50×10^6	4.10×10^6
杭 2	3.00×10^6	6.30×10^6
杭 3	5.00×10^6	9.20×10^6

杭の鉛直変位, 支点の水平, 鉛直変位である。

検定試験の結果から, コーティングを含めた杭全体の曲げ剛性 EI と測定した曲げびずみに対する曲げモーメントの換算係数 EZ' を求めた ($M = EZ' \varepsilon$)。検定結果を表-3に示す。

2.3 実験方法

模型杭は図-8に示すように1回の地盤作成時に3本セットしている。今回の実験では, 隣合う杭の間の距離が杭幅の8倍となっており, 十分に離れているので, 模型杭の変形による地盤の変形の影響が隣の模型杭の変形に及ぼす影響はないと考えられる。

地盤の層厚は2.25mとし, 杭の根入れ長は2.1mとした。載荷中に杭先端が変位しないように図-9に示す装置を杭下端に取り付けている。

地盤作成時に杭の位置がずれないようにするため, 写

真-1に示すように土槽の内部に山形鋼を2段に渡し, 杭を固定している。下段の固定治具の撤去は下段の固定治具のすぐ下まで地盤面が作成された時に行っている。また, 計画地盤まで地盤が作成されたあとで上段の治具を撤去した。

地盤の作成は乾燥砂を空中落下させて行った。地盤は普通の地盤とやや固い地盤の2種類作成した。普通の地盤を作成する際には, 図-10に示すようにバケットの砂の吐き出し口から作成地盤面までの距離が20cmになるようにして砂を自然落下させた。このとき, 作成している地盤面に大きな山谷ができないように注意した。やや固い地盤を作成する際には, 作成した地盤高さ約20cmごとに約9kgfの重錘を約10cmの高さから落下させて突き固めている。これらの2種類の地盤作成方法により作成された地盤の原位置乾燥密度 ρ_d は, 普通の地盤で約1.459 g/cm³ (相対密度41%), やや固い地盤で約1.548 g/cm³ (相対密度67%)であった。

載荷は, 約20kgfの重錘を所定の荷重に見合う個数を載せて行った。載荷の状況を図-11と写真-2に示す。

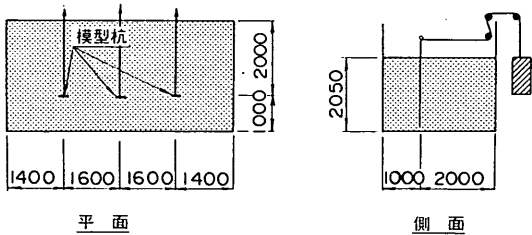


図-8 模型杭のセット

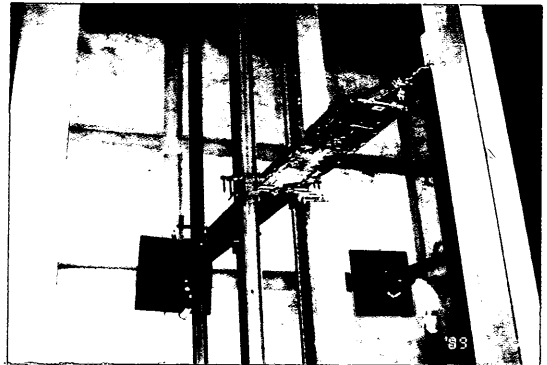


写真-1 土槽への杭の建て込み

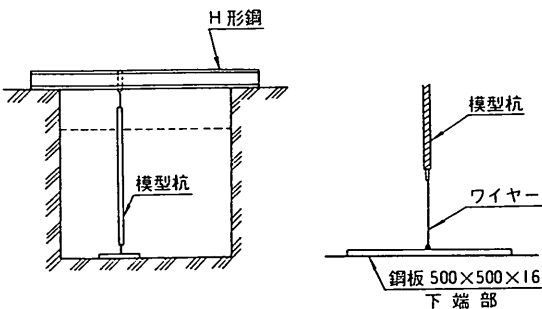


図-9 杭の引き抜け対策

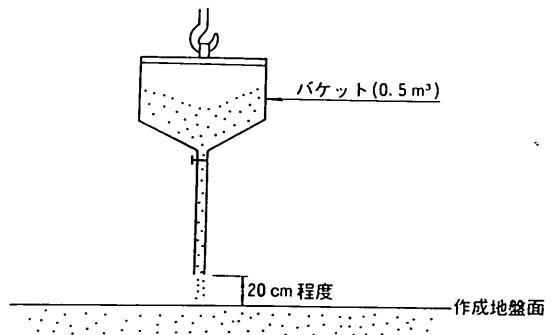


図-10 地盤の作成

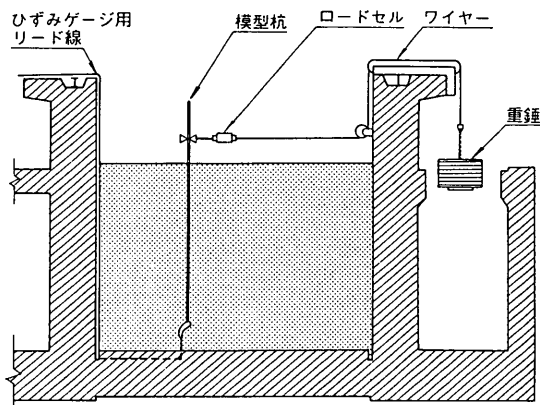


図-11 荷荷の状況

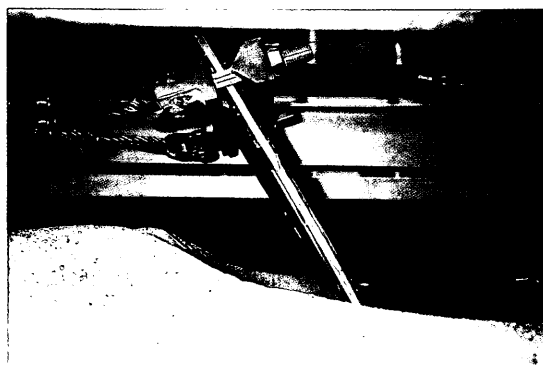


写真-2 水平荷重作用時の状況

模型杭への荷荷は、図-12 に示すような治具を用いた。この治具では、たわみ量が大きくなったときには杭の荷荷点が下がり、杭頭部に杭が変位しにくくなる方向に曲げモーメントが発生する恐れがある。

荷重が荷荷されているときの荷荷時間によって杭の変位が伸びる影響は小さいと判断されたので、荷重の保持は計測に必要な時間だけとした。

測定項目は、水平荷重を変化させるごとに、時間、荷重、荷荷点の杭の変位、杭頭変位、地表面での杭の変位、杭の曲げひずみであり、そのほか必要に応じて杭周辺の地盤の変形状態をスケッチした。

荷荷点と杭頭の変位については、図-13 に示すように巻き込み型の変位計の4つの測定値を用いて計測している。

この原理について簡単に説明する。

図-14 の実線で示すように、杭の荷荷点より上の2点についてそれぞれ異なる2点からの初期状態における

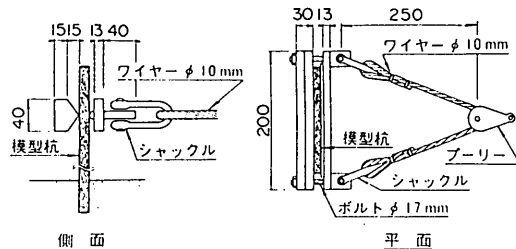


図-12 模型杭の荷荷治具

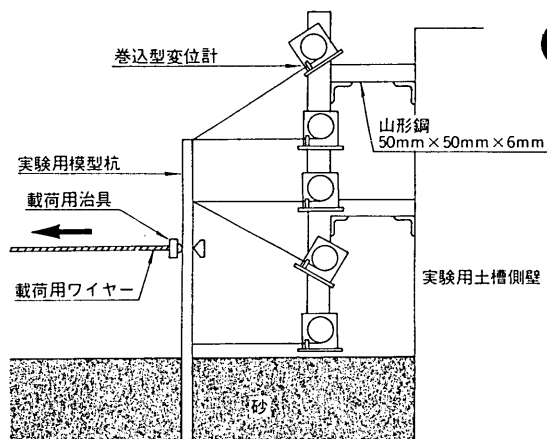


図-13 杭頭部の変位計の取付

距離を求めておく。このとき、4つの変位計は、荷荷軸をとる鉛直平面上に固定されていなければならない。このとき、図-15 に示す測定点Cの座標は以下のようにして求める。2つの変位計取付点をそれぞれA、Bとし、測定点をCとしたときに、それらの座標を以下のように表す。

$$\begin{aligned} A(0, a) \\ B(0, b) \\ C(c_1, c_2) \end{aligned}$$

このときACとBCの長さは以下のように表される。

$$\begin{aligned} AC &= \sqrt{c_1^2 + (a - c_2)^2} = l_1 \\ BC &= \sqrt{c_1^2 + (b - c_2)^2} = l_2 \end{aligned}$$

C点の座標はA点を中心とする半径ACの円とB点を中心とする半径BCの円の交点である。つまり、次の連立方程式を解けば良い。

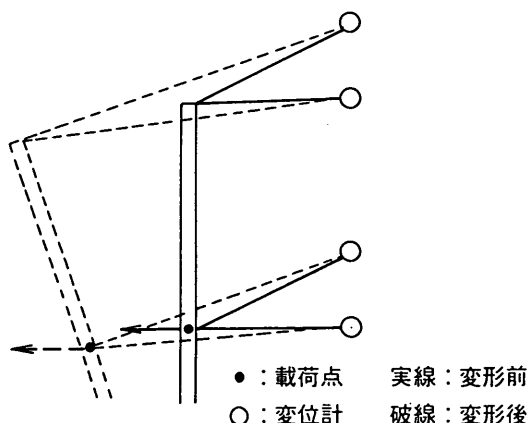


図-14 杭頭部の変位測定原理

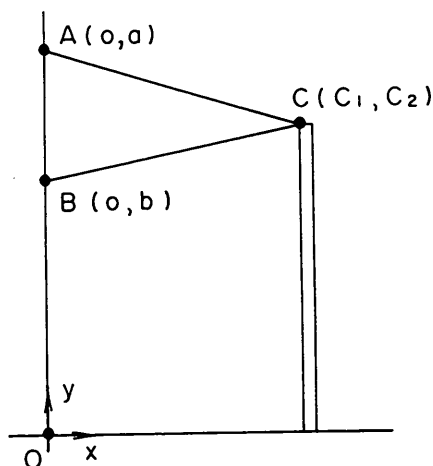


図-15 A, B, C の座標

$$x^2 + (y - a)^2 = l_1^2$$

$$x^2 + (y - b)^2 = l_2^2$$

その結果、C 点の座標は次のように表される。

$$c_1 = \sqrt{l_1^2 - (c_2 - a)^2}$$

$$c_2 = (l_1^2 - l_2^2 - a^2 + b^2) / 2(b - a)$$

図-14 の点線のように杭が変位したときには、 l_1 が $l_1 + \alpha$ 、 l_2 が $l_2 + \beta$ になったとして式に代入すれば、新しい C 点の座標が求められる。

このようにして载荷点より上の 2 点の座標を求め、载荷点より上のたわみ角を求めることにより、载荷点の変位と杭頭部の変位を計算している。

2.4 スプライン関数による実験データ近似手法

杭の深度方向のモーメント分布を調べるために、この実験では曲げひずみを 26 点で測定している。曲げひずみに係数 EZ をかけることによって、各点の曲げモーメントが知られる。梁の方程式で示されるように、曲げモーメント分布を積分もしくは微分することにより、変位、たわみ角、せん断力、地盤反力を求めることができる。

これまで、基礎工研究室では、測定された曲げモーメントを最小自乗法により多項式（通常 8 次から 16 次）で近似して、曲げモーメントの分布関数を求めてきた⁹⁾。この関数を変位であれば 2 回積分し、地盤の反力の場合には 2 回微分して求めることになる。しかし、この方法では以下に示すような問題点が存在する。

- ①杭の全領域で等しく近似することは困難である。このため、解析に重要な、曲げモーメントが大きくなる点を中心に近似精度を高めてきた。
- ②多項式の次数によって曲線の特性が異なり、微分時に杭端部での近似の信頼性が低くなる。
- ③微分をしたときに近似精度が低下する。地盤反力のように 2 回微分が必要なときには特に精度が低くなる。

このような問題に対処するため、様々な工夫をしながら多項式近似をしてきた⁹⁾。

今回は、近似手法としてより優れていると考えられる、スプライン関数⁹⁾を用いて解析を行っている。スプライン関数は、与えられたデータ点を滑らかな曲線でつなぐ補間曲線の一つである。一つの節点間では一つの多項式が与えられ、異なった節点間にはそれぞれ異なった多項式が対応し、多項式の結び目である節点では、滑らかな性質を持った関数である。このような特性を持つことから、「区分的多項式曲線」とも呼ばれるものである。スプライン関数は多項式の集まりであるため、微分積分が容易であると言うメリットがある。このような補間曲線はコンピュータの発達とともにさまざまな分野で広く用いられてきているが、土質関係でスプライン関数を用いた解析の一例としては、 e - $\log p$ 曲線から圧密降伏応力を求めるのに用いられた例¹⁰⁾があげられる。

今回の解析では、3 次の自然スプライン関数を用いており、曲げモーメントの近似には平滑化を行っている。また、よりなめらかな曲線を得るために、微分を 2 回することを避け、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。積分側についてはこのような問題は少ないと考えられるが、積分側についても同様のやり方によっている。計算には、パーソナルコンピュータを用いており、プログラミング

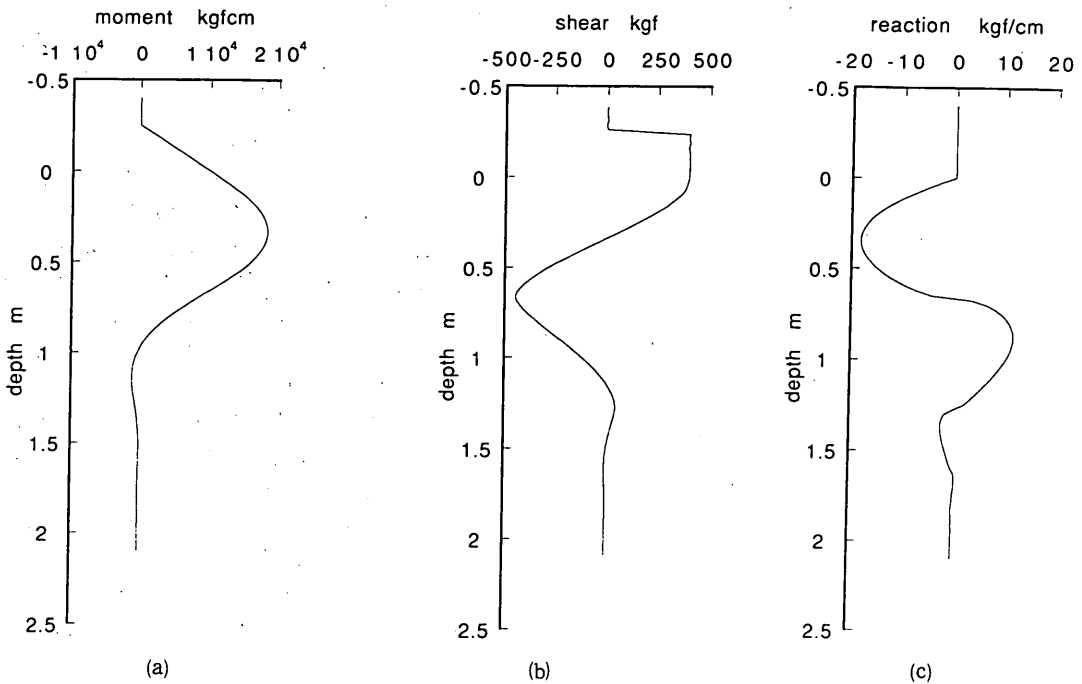


図-16 港研方式に従う杭の挙動

については、参考文献11)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。

図-16は港研方式のS型地盤を想定して、実験に用いた杭と同等の諸元を持つ杭が同等の地盤条件の地盤に建て込まれているものとして、杭に働く曲げひずみとせん断力、地盤反力を計算したものである。この計算には、基礎工研究室で開発した非線形ばねと杭の曲げ理論によるFEMプログラム⁸⁾を用いている。

この計算結果をもとに、既知の曲げモーメントの値の与え方として次の2つのケースを考え、それぞれのケースについて多項式近似法とスプライン近似法とを比較してみる。

ケースA：深度-10cm（深度は地盤面から下向きが正）より210cmまで10cm間隔

ケースB：今回の実験で測定している深度（上から、0, 20, 30, 37.5, 45, 52.5, 60, 67.5, 75, 82.5, 90, 97.5, 105, 112.5, 120, 127.5, 135, 142.5, 150, 157.5, 165, 172.5, 180, 190, 200cm）

図-17と図-18にケースAの結果を示す。ここで図-17は多項式近似の結果であり、図-18はスプライン近似の結果である。両図とも、実線で示されているのが近

似結果であり、○で示されているのが、曲げモーメントを与えた深度での理論値である。両手法で曲げモーメントの近似精度にはほとんど違いがないが、多項式近似の場合には、せん断力と地盤反力の近似について杭の端部で精度が落ちてくるのがわかる。

図-19と図-20にケースBの結果を示す。このケースの近似の際には、地表面付近の近似精度を高めるために、深度-1cmのところダミーの点の曲げモーメントを与えている。この点を与えない場合には、多項式近似ではデータの近似精度がかなり落ちるが、スプライン近似では地盤反力の地表面のごく近傍での精度が少し落ちる程度である。ケースBでも曲げモーメントの近似は両手法にあまり差がないが、図-19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。本来近似精度を高めるためには、目的の区間の測定点の個数を増やすべきであり、ケースAのように測点を決めていれば、多項式近似の手法でも十分信頼のおけるデータが得られたと考えられるが、今回の実験では当初計画していたよりも杭の根入れ長をふやしたため、地表面付近の測点数が減ってしまい、多項式近似手法が適用できなくなった。

また、多項式近似の場合には、相関係数を求めて近似

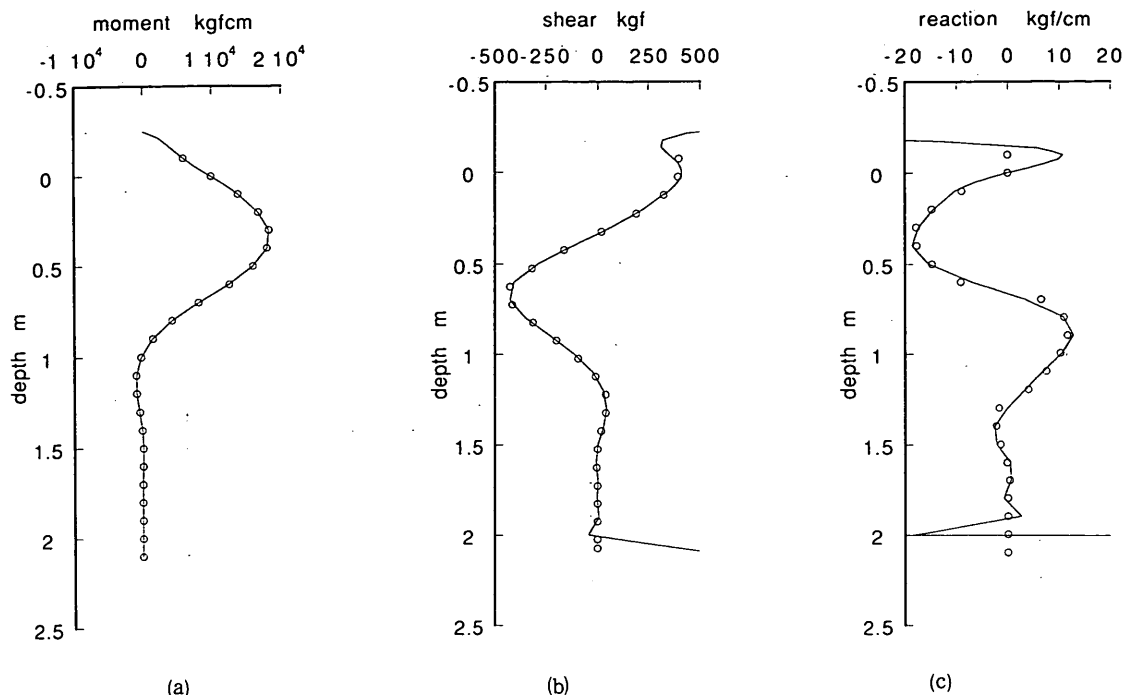


図-17 最小自乗法による多項式近似(ケース A)

の精度を確認しており、近似の精度が悪いと判断された場合には近似結果を利用しないことを考えてきた。このような方法では活用できないデータが多くなってしまう問題がある。さらに、ここでの多項式近似の場合、曲げモーメント分布の近似の相関係数はケース A とケース B でどちらも 0.99999 であったにもかかわらず、ケース B では 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。

3. 実験結果及び考察

図-21 に、今回用いた载荷のパターンを示す。パターン A は規定回数だけ同一荷重をかけ、その後次の荷重段階に移るものである。パターン B は計画最大荷重を杭の最終的な挙動が確認できるまで繰返しかけたものである。パターン C は同一荷重を繰返しかけ、その荷重での杭の最終的な挙動が把握できたら次の荷重段階に移るもので、パターン A に比べると荷重レベルが前の段階よりも減る場合の载荷がなされていないものであ

る。パターン D は最初に計画最大荷重を 1 回かけ、その後パターン C と同様な方法で载荷するものである。

実験ケースの一覧表を表-4 に示す。いずれのケースも、根入れ長は 210 cm、载荷点の高さは 25 cm である。実験で载荷した最大荷重は、地盤に十分な変位が生じるように設定されており、杭においても残留ひずみがでない程度の範囲内で十分大きな荷重を作用させている。この荷重を現地に変換すると、通常に作用するであろう最大荷重に比べても十分に大きなものとなっている。

図-22 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¹⁹⁾、処女载荷状態での杭頭変位 y_{mp} と杭頭荷重 T の関係を示している。

図中で、白丸が実験結果であり、点線で示しているのが単純に港研方式を適用した場合の杭頭荷重と杭頭変位の関係であり、ここでは、地盤反力係数 k_s が 0.02 と 0.01 kgf/cm^{3.5} の例を示している。

通常、杭頭変位 y_{mp} と杭頭荷重 T の間には、両対数グラフ上ではほぼ直線になる関係があるが、今回の実験結果では、荷重が増えるにつれてやや上方向にそる傾向が示されている。

ところで、実験では、载荷点の高さは杭頭の変位が増えるとともに下がっており、また、载荷装置の構造上変

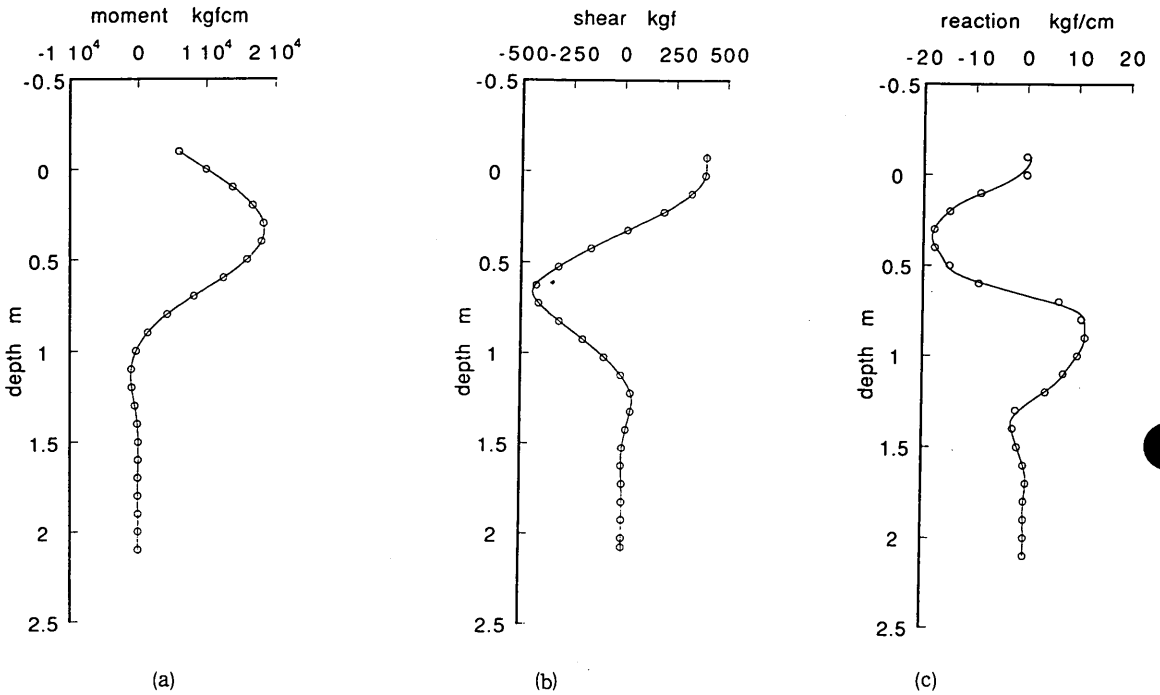


図-18 スプライン関数による近似(ケースA)

位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。さらに、たわみ角が大きくなると、3.2の(2)式で示すように、梁の方程式が通常の微小変形理論とは異なる形になる。ここでは、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ている。

なお、たわみ角が微小でないことを考慮すると、変位が大きくなる傾向にあるが、地中部ではその差が小さいので、計算上地盤反力が変化する影響は小さい。

図-22には、載荷高さの変化とたわみ角が微小でないことによる補正を加味した港研方式の計算結果を実線で示している。地盤反力係数 k_s は $0.01 \text{ kgf/cm}^{3.5}$ としている。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 -1000 kgfcm の曲げモーメントを作用させており、この値は最大曲げモーメントの約5%である。

この図の比較よりわかるように、曲げモーメントを加味しなかった場合でも、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両者はよく一致している。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く。こ

れはおもに載荷高さがさがったことと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、地盤反力係数 k_s は載荷中はほぼ一定であったと考えられる。

以上のようにして求めた各実験ケースでの地盤反力係数 k_s の値も表-4に示してある。

3.1 予備実験

杭が大きいたわんだ場合には、水平に載荷した場合であっても、水平力の杭軸方向成分によって引き抜き力が作用することが考えられる。この点についてあらかじめ検討するために、予備実験を実施した。

予備実験は2回実施した。それぞれケース0-1、ケース0-2と呼ぶことにする。それぞれの実験の諸元は表-5に示す。予備実験では、杭の下端は砂中に完全に浮いた形となっており、図-9に示した装置は使用していない。

図-23に杭の載荷点の軌跡を示した。軌跡が全体的に右上に動いていくほど杭が抜け上がっていることを示す。

図-23(a)はケース0-1の場合で、根入れ長が1.8mである。この結果を見ると、最大荷重 T が 230 kgf の繰返し載荷までは杭の抜け上がりはほとんどないが、最大荷重 T が 300 kgf になると杭が抜け出す傾向にある。

繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動

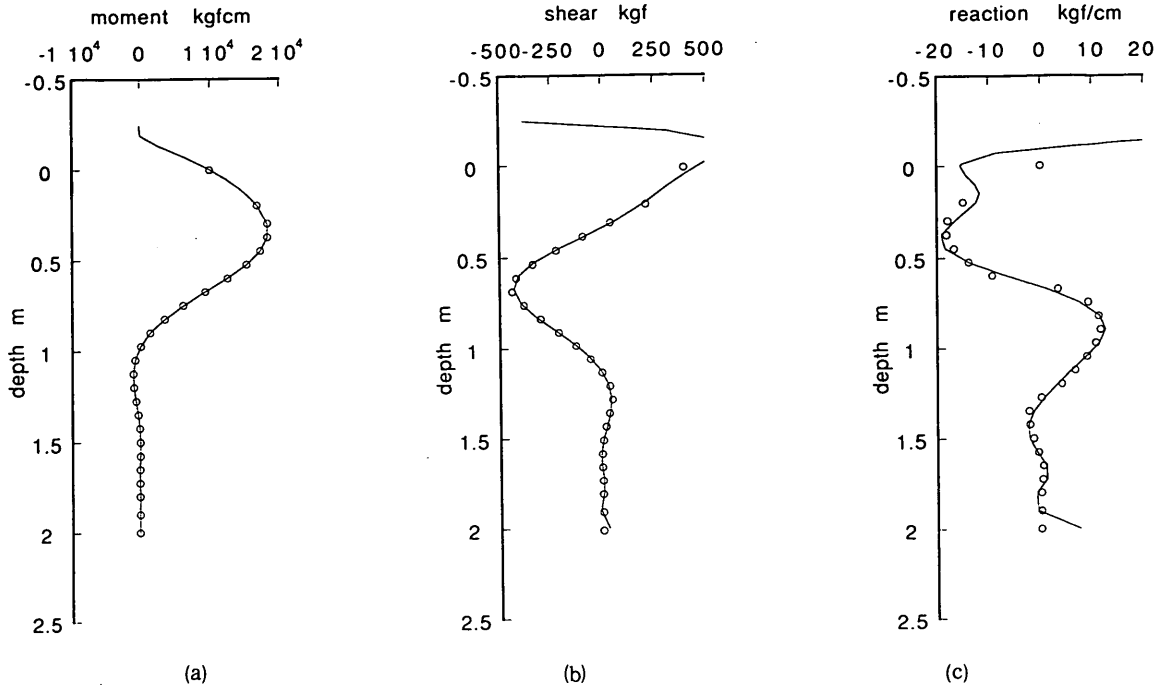


図-19 最小自乗法による多項式近似(ケースB)

なかでも、荷重が230kgfを越えて、300kgfまで載荷する過程で杭が抜け上がり、除荷過程では、顕著な抜け上がりはないようである。最大荷重300kgfの繰返しのあとに、300kgfより小さな最大荷重での繰返し載荷を実施しているが、このときにはほとんど抜け上がりは起きていない。最大荷重300kgfの繰返し載荷は5回行っているが、このあいだに約10cm 抜け上がった。

図-23(b)はケース0-2の場合で、根入れ長が2.1mである。この結果では、最大荷重430kgfの繰返しの際にわずかに杭が抜け上がったかのような挙動を示しているが、(a)の場合と比べるとほとんど抜け上がっていないと判断されるものである。このケースの場合にも最大荷重430kgfの繰返し載荷のあとに、より小さい最大荷重のもとで繰返し載荷を行っており、そのときにも抜け上がる挙動はしていない。

図-23(c)はケース2の実験結果である。根入れ長はケース0-2と同じ2.1mであり、このケースの場合には、図-9に示すように、抜け上りを防ぐための工夫を施してある。この結果はケース0-2の結果とほぼ同様で、杭がわずかに抜け上がるかのような挙動をしている。このケースでは杭下端の変位はきわめて小さく実際上はほとんどなかったと考えられ、図のように杭頭の軌

跡が右上方向に動いていった理由は、杭のたわみ方の変化に原因があると思われる。

以上の結果から、ケース0-2では最大荷重430kgfの繰返しであっても、杭は抜け上がらなかったが、ケース0-1の場合には、最大荷重300kgfの繰返しで杭が抜け上がったと結論できる。

杭が水平方向に変位するときには、杭前面の地盤が盛り上がるのが観察される。杭前面の浅いところの土が行き場を失い、杭に対して上方向に変位する。このため、杭には杭頭に働く水平力の杭軸方向の引き抜き力と土が上方向に動く時に生じる摩擦による引き抜き力が働く。これに対し、深部では、杭も地盤もほとんど変位せず、杭面には静止土圧が作用し、杭が引き抜けようとするとき静止土圧に比例する摩擦力が働き杭の引き抜けに抵抗する。根入れ長が1.8mと2.1mと異なる時、30cmの間で作用する最大引き抜き抵抗力は約50kgf(静止土圧係数 $K_0=0.4$ 、杭と砂との間の摩擦角 $\delta=20^\circ$ とした場合)となり、この50kgfの違いが主たる原因となって、杭が引き抜ける挙動をするか否かの違いがでたと考えられる。

このことから、今回の実験では、引き抜きに対する安全率に十分な余裕がないと考えられたので、引き抜きに

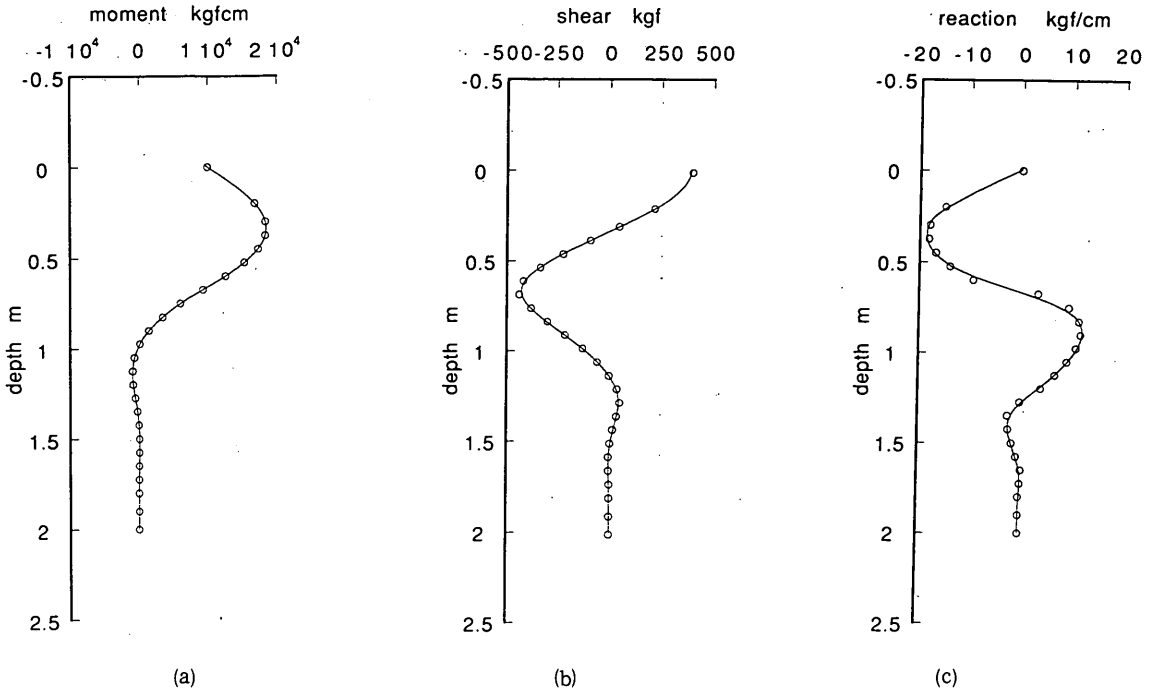


図-20 スプライン関数による近似(ケースB)

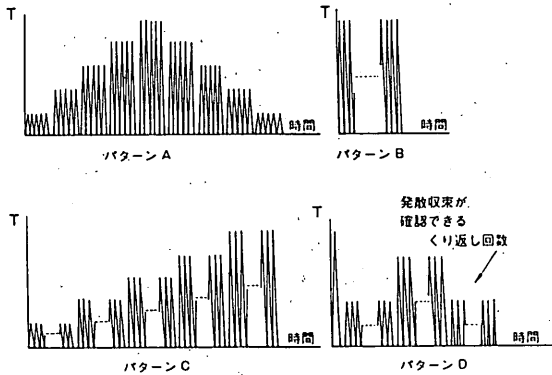


図-21 荷重パターン

対する対策をとることにした。つまり、ケース0-2では引き抜け対策を取っていないが、ケース2では対策をしている。しかし、図-23 (b), (c) よりわかるように、そのことによって杭全体の挙動が大きくは変化していない。

また、実際に大変形する杭の水平抵抗力を計算する際には、軸方向の引き抜けに対する十分な検討が必要である。図-23 (a) でもわかるように、引き抜けが起こると、

杭の根入れ長が不足し、変位量も大きくなる傾向にある。

3.2 大変形時の挙動

杭の横抵抗の非線形性は古くから知られるところであったが、今から30年ほど前に、篠原・久保¹³⁾によって、処女荷重時には、地盤反力 p と杭の変位 y の間に

$$p \propto y^{0.5} \quad (1)$$

という関係があることが示された。この関係は一般に、港研方式と呼ばれている。しかしながら、この関係は無限の大変位に適用されるものではなく、同じ論文の中で、幅10cmの杭の荷重実験の結果から、杭の変位が1.5cmを越えるあたりから急に地盤反力の増加が止まる傾向がみられ、地盤反力が受働抵抗の限界に達したと結論している。

これまでの杭を用いた港湾の構造物の代表的なものとして、横棧橋やドルフィンがあげられるが、これらの設計に際して、水平方向に杭がたわみやすいという性質は不利な条件であったため、杭の水平変位は極力抑えられるような設計がされていた。従って、通常的设计の範囲では、地表面変位が1cmを越えることは希であり、篠原・久保が示した横抵抗式の適用限界を越えることはほ

繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動

表 - 4 実験ケース一覧表

No.	地盤条件	地盤反力係数 k_s (kgf/cm ^{3.5})	根入れ長 (m)	載荷高さ (m)	杭の曲げ剛性 (kgfcm ²)	載荷パターン
1	普通	0.011	2.1	0.25	3.00×10^6	A
2	普通	0.010	2.1	0.25	3.00×10^6	B
3	普通	0.010	2.1	0.25	3.00×10^6	D
4	普通	0.010	2.1	0.25	3.00×10^6	C
5	やや固い	0.018	2.1	0.25	3.00×10^6	C
6	やや固い	0.023	2.1	0.25	1.50×10^6	C
7	やや固い	0.023	2.1	0.25	5.00×10^6	C

表 - 5 予備実験ケース一覧表

No.	地盤条件	地盤反力係数 k_s (kgf/cm ^{3.5})	根入れ長 (m)	載荷高さ (m)	杭の曲げ剛性 (kgfcm ²)	載荷パターン
0-1	普通	0.010	1.8	0.6	3.00×10^6	A
0-2	普通	0.010	2.1	0.25	3.00×10^6	A

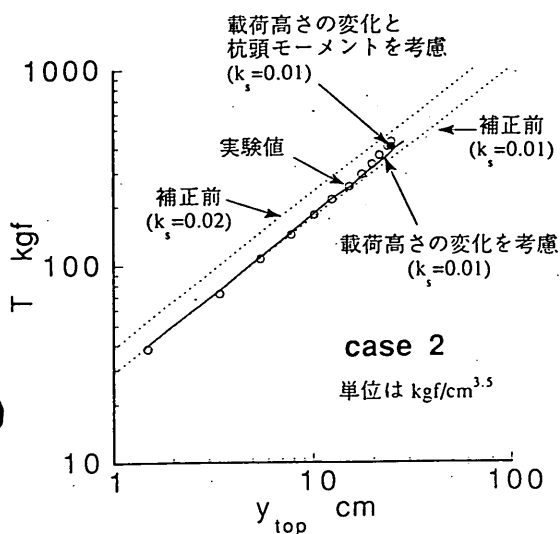


図-22 杭頭変位による地盤反力の推定

とんどない。それゆえ、これまでこの問題についてはあまり検討されたことがなかったといえる。

しかし、港研方式の物理的意味を検討する上でも、港研方式の限界がどこにあるかを追求することは意義が深い。

港研方式の限界を議論するには、地盤の反力と杭の変位がそれぞれ十分な精度で決定されなくてはならない。杭の変位分布や地盤反力分布を直接求めるのは困難であ

るため、基礎工研究室では、杭に発生する曲げモーメントの深度分布を求め、構造力学の示すところに従い、2回積分、2回微分することにより杭の変位と地盤反力を求めている。すでに2.で述べてきたようにこの問題に対処するため、新たにスプライン関数を利用して推定精度をあげることにつとめた。

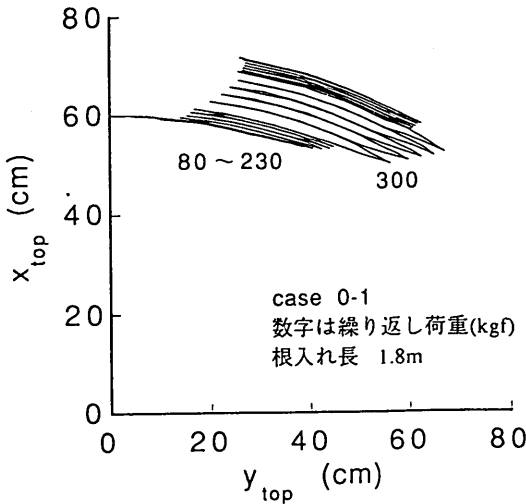
さらに今回の実験では、杭頭変位が大きだけでなく、たわみ角も大きくなるため、たわみ角の高次の項が無視できないので、梁の曲げによる変形の支配方程式として、次式を用いている¹⁵⁾。

$$\frac{M}{EI} = - \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (2)$$

ここで、記号は以下のとおりである。

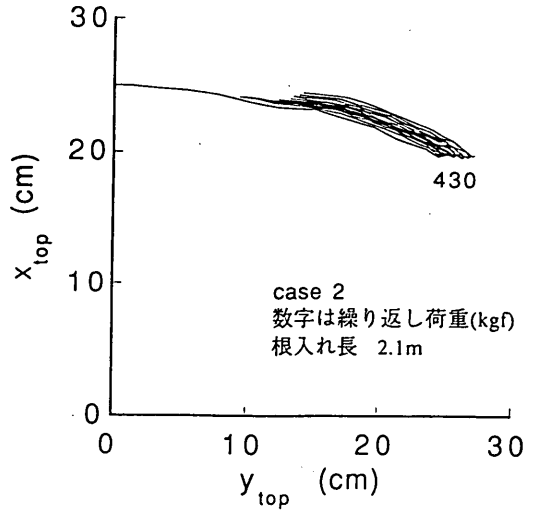
- M: 曲げモーメント
- EI: 杭の曲げ剛性
- y: 杭の変位
- x: 杭の軸方向座標

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-24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



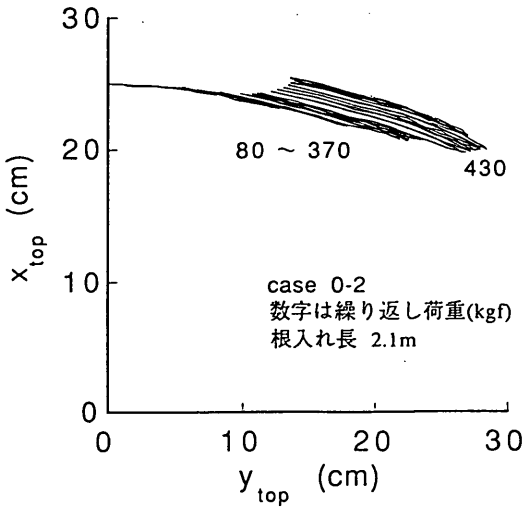
(a) ケース0-1

図-23 杭頭の軌跡



(c) ケース2

図-23 杭頭の軌跡



(b) ケース0-2

図-23 杭頭の軌跡

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良好に合い、特に杭の横抵抗で問題となる比較的浅い部分で、地盤反力の近似精度が極めて高かったことがわかる。

ただし、ここで注意しなくてはならないのは、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ず異なっていくことである。つまり、計算結果に比べ、近似結果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。港研方式が提案された当初から、地盤反力の最大値が発生するあたりの深さまでは、港研方式の仮定である、 $p = kxy^{0.5}$ がよく合い、それ以深では地盤反力の発生の方が小さくなり、港研方式が合わないことがわかっていた^{13), 14)}。篠原・久保¹³⁾は、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。いずれにせよ、図-22の整理の仕方では、地盤の平均値として地盤反力係数の推定が正しいということしかわからないが、十分な精度を持って実験結果を解析し、図-24のような比較を行えば、より詳細な議論が可能となる。

より詳細に港研方式の適用性を見るために、各深度に

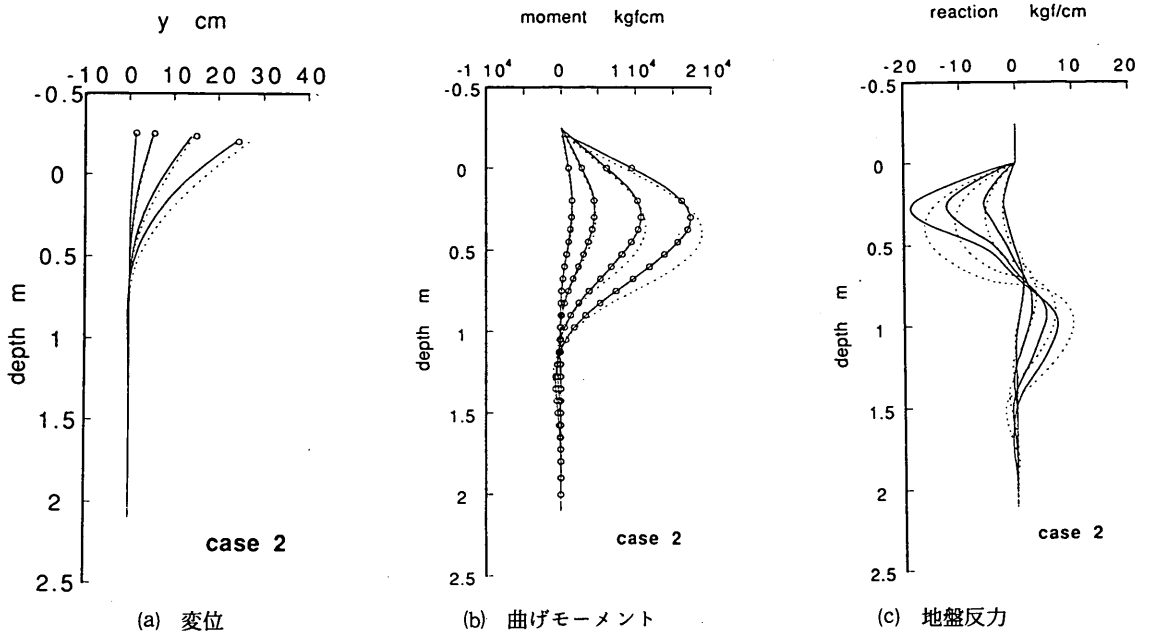


図-24 実験結果と港研方式の比較

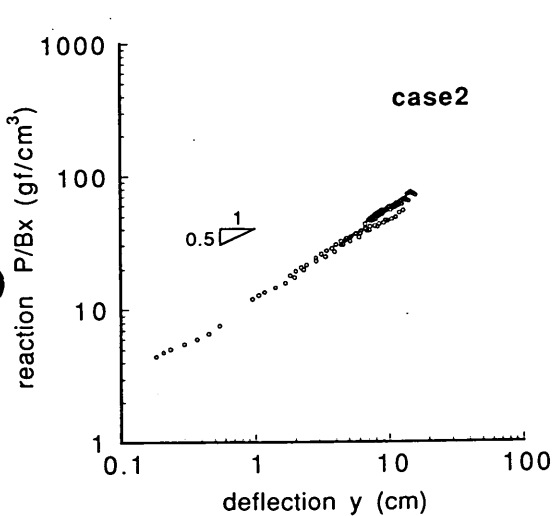


図-25 杭の変位と地盤反力

おける地盤反力と変位の関係を示したのが図-25である。ここでは、杭の挙動に支配的的要因になると思われる、曲げモーメントが最大を示す深さより上の深度（深度30cm以浅）の杭の変位と地盤反力の関係を示している。図よりわかるように、杭の変位が15cm程度になっても、

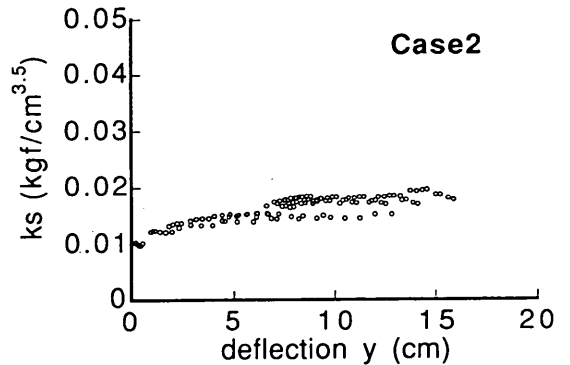


図-26 杭の変位と地盤反力係数

地盤反力が飽和する様子が見られない。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-26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-24の比較から予想されるように、 $P/Bxy^{0.5}=k_s$ の値は、表-

4に示す値よりわずかに大きい。

このように、丁寧にみると、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_b 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_b 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。

今回の実験では、杭の幅は20 cmであり、篠原・久保¹³⁾が示した実験の時の杭の幅の倍になっているが、地盤の反力が飽和に達するのに必要な地盤の変位量はほぼ10倍になっている。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、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であろう。このため、地盤の反力は簡単には飽和しない。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。単純には、地盤の要素の応力ひずみ関係は双曲線近似が適用できると考えられるが、そのような仮定をしたときであっても、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。実際、篠原・久保¹³⁾の示した関係($p \propto y^{0.5}$)は、変位について2オーダーくらいのデータの範囲から求められているが、双曲線の関係ではこのような広い範囲で両対数で直線関係にあるとするのは困難である。

3.3 繰返し荷重を受けたときの挙動

図-27(a)~(d)にそれぞれのパターンでの載荷重 T と杭頭変位 y_{top} の関係を示す。図-27(a)のケースを見ると、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、すなわち処女荷重レベルでは、繰返し回数が増えるにつれて杭頭変位が増えて行くが、荷重のレベルが前よりも下がったとき、すなわち弾性域荷重レベルでは、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。この傾向はすべてのケースについて共通である。

処女荷重レベルでの繰返し挙動についてより分かりやすくするために、図-28(a)にケース2の、最初の2サイクルと最後のサイクルにおける荷重と杭頭変位の関係を示す。これまでいくつか報告されているように、繰返し載荷の回数につれて杭頭変位が増えることがわかる。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。ケース2の場合背面の穴の深さはおよそ15 cmであった。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わずかずつ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¹⁶⁾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。

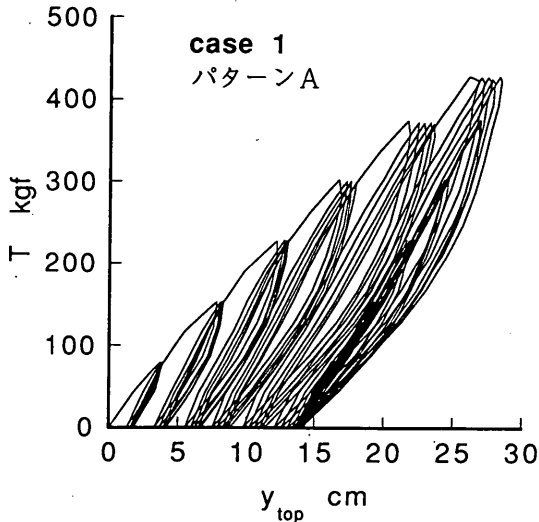
いずれの実験ケースにおいても、荷重を除荷したときには、杭の両側におよそ10~15 cmの穴があく。この穴の影響は、既往最大荷重が載荷されるときにはほとんど影響を及ぼさないと考えられるが、弾性荷重域では自由長が長くなる効果をもたらすものと考えられる。

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、1サイクルで囲まれるループの面積は繰返し回数が増えるにつれて小さくなり、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。

杭頭たわみ角 i_{top} についても、繰返し回数とともに最大値が増加する傾向がみられる。しかし、繰返し回数とともに弾性的になる傾向については顕著ではない。(図-28(b))

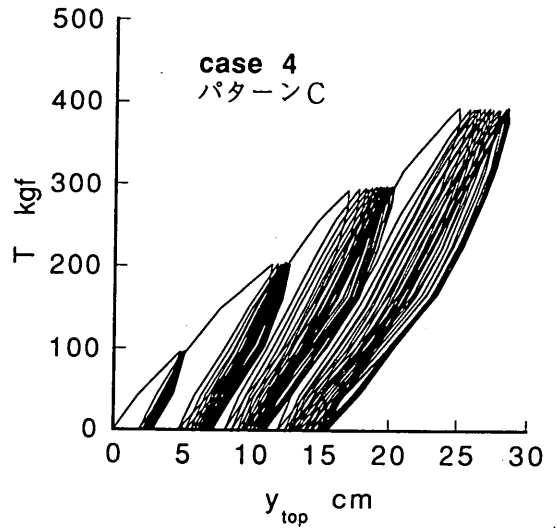
弾性域荷重レベルでの実験結果を図-29に示す。ここに示すのはケース3の例であり、図中①と示してあるのは、最初に約400 kgfの最大荷重を加えた直後の最大荷重約200 kgfの繰返しの結果であり、図中②と示してあるのは、①のあとに最大荷重約300 kgfの繰返し荷重を加えたあとの最大荷重約200 kgfの繰返し載荷の結果である。①と最大荷重約300 kgfの繰返しと②の繰返し回数はそれぞれ20, 20, 15回である。図-29(a)に示すように、杭頭変位については、弾性域荷重レベルでは、繰返し回数が増えるにつれて、最大変位は減る方向にあり、さらにピーク荷重と荷重ゼロの2点より求められる割線弾性係数は大きくなる傾向にある。また、あらかじめ、現在の荷重レベルより少し大きな荷重の繰返しを受けた場合には、弾性的挙動がより顕著となり、1サイクルごとのループの面積がますます小さくなる。杭頭たわみ角 i_{top} については、繰返し回数の影響が顕著にあらわれない。(図-29(b))

繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動



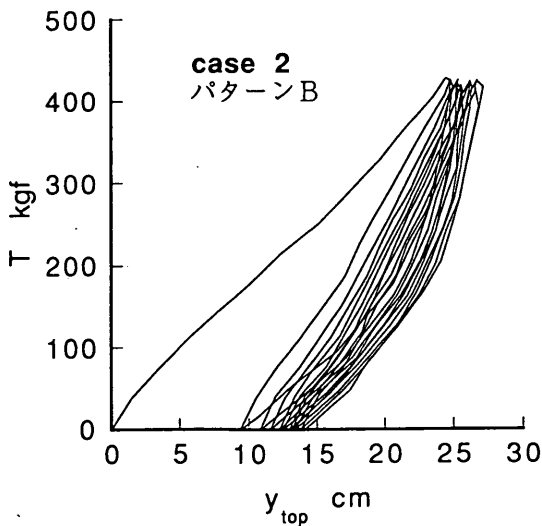
(a) パターン A

図-27 杭頭変位と杭頭荷重の関係



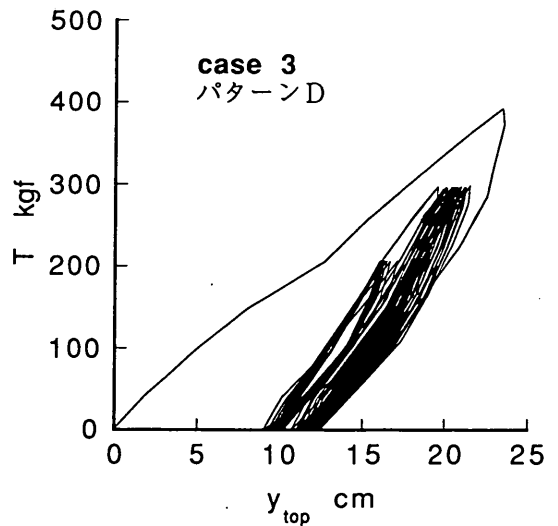
(b) パターン B

図-27 杭頭変位と杭頭荷重の関係



(c) パターン C

図-27 杭頭変位と杭頭荷重の関係

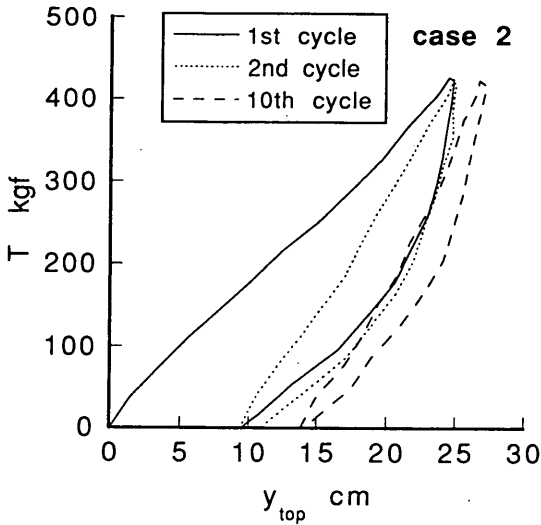


(d) パターン D

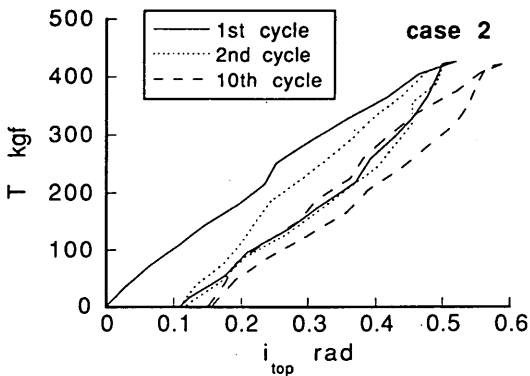
図-27 杭頭変位と杭頭荷重の関係

処女荷重レベルにおける繰返し回数が地表面変位 y_0 や地表面たわみ角 ω に与える影響についてさらに詳しくみることにする。ここでは、図-30 に示すような諸量を定義する。ここでは、杭の地表面変位についての

定義を示すが、杭の地表面たわみ角についてもサフィックスの意味は同じであるとする。図に示してあるように、1回目の載荷時の最大荷重時の地表面変位を y_{i1} 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



(a) 杭頭変位の変化

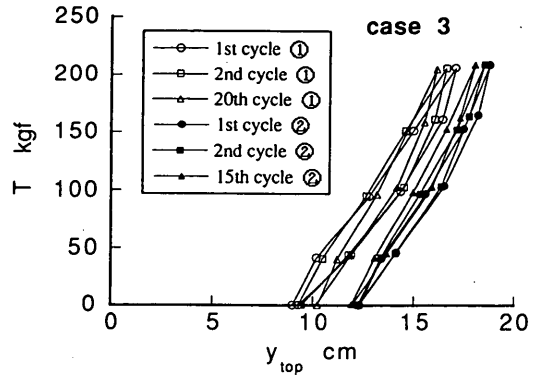


(b) 杭頭たわみの角の変化

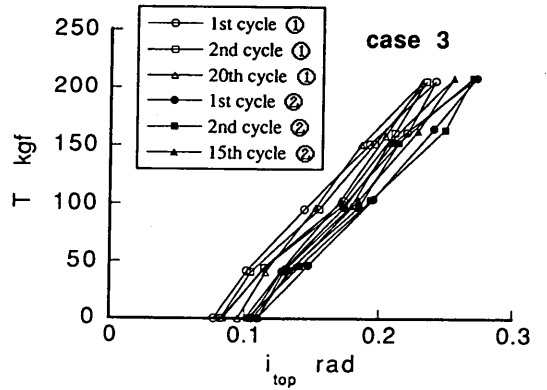
図-28 繰返し回数の違いによる杭の挙動の変化

変位を $y_{r,1}$ 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 $y_{r,n}$ とし、 $n+1$ 回目の荷重サイクル直前の残留地表面変位を $y_{r,n}$ とする。ここで、荷重ケースの A や C で荷重レベルが上がったときの 1 回目の荷重直前の残留地表面変位 $y_{r,0}$ は 0 であるとしている。

このようにして定義した諸量の繰返し回数ごとの変化を図-31 に示す。地表面での変位とたわみ角は直接測定していないが、近似計算の結果は実測値とあまり差がないことがわかっているので、ここでは、すべて近似計算からえられた数字を用いている。図-31(a) と(c) はそれぞれ地表面変位比 $y_{r,n}/y_{r,1}$ と地表面たわみ角比 $i_{r,n}$



(a) 杭頭変位の変化



(b) 杭頭たわみ角の変化

図-29 繰返し回数の違いによる杭の挙動の変化

$/i_{r,1}$ である。(b) は、各サイクルごとの、荷重過程での地表面変位の変化量 $y_{r,n}-y_{r,n-1}$ の第 1 回載荷時の変位 $y_{r,1}$ に対する比であり、割線弾性係数の比の逆数である。(d) はたわみ角について荷重過程での地表面たわみ角の変化量 $i_{r,n}-i_{r,n-1}$ と第 1 回載荷時の地表面たわみ角 $i_{r,1}$ の比を示している。

図-31(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 倍程度地表面変位量が増えることがわかる。

図-32 に、今回の実験結果と篠原・久保の実験結果¹⁹⁾ と、現場実験の結果^{13), 20)} を同時に示した。いずれの結果からも、繰返し回数が少ないときには変位比 $y_{r,n}/y_{r,1}$ の伸びが大きく、繰返し回数が増えるにつれて、変位比 $y_{r,n}/y_{r,1}$ 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

繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動

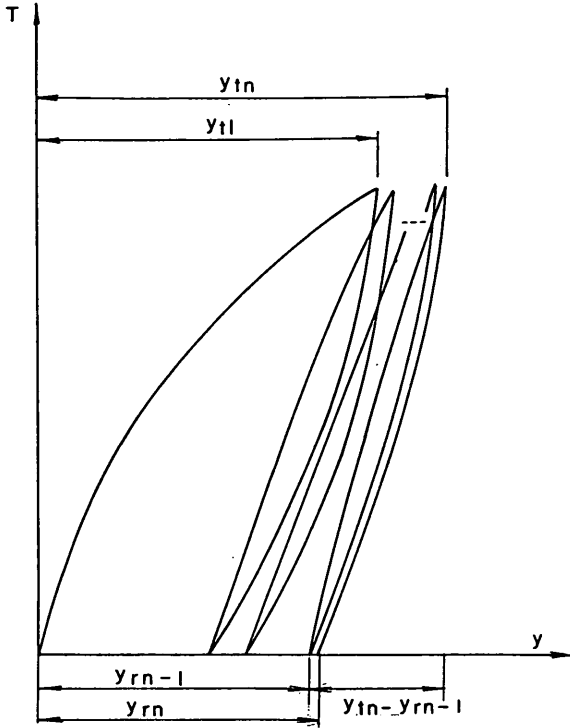


図-30 荷重・変位曲線の記号の説明

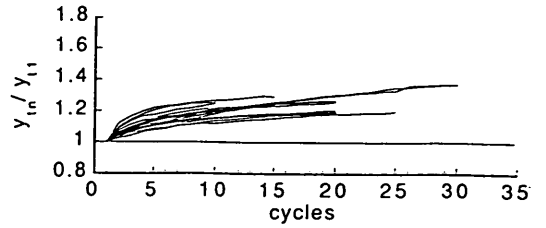
らつきのほぼ上限に位置している。

ここで、篠原・久保の実験結果は杭頭変位の伸びについて整理したものであり、現場実験と今回の実験は地表面変位について整理したものである。今回の結果を杭頭変位で整理した場合には、変位の伸びは、図-32に示すものより小さくなり、篠原・久保の結果は、今回の実験結果より変位の伸びはやや大きかったようである。

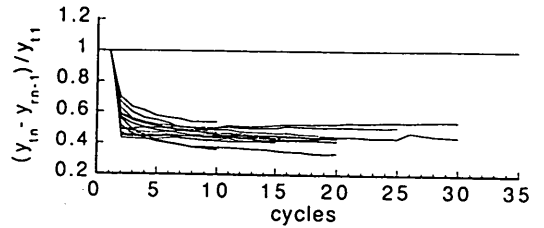
ところで、篠原・久保の実験¹⁹⁾では、板杭と管杭を用いており、現地での実験^{11, 2)}は管杭を用いたものであり、今回の実験では板杭を用いている。篠原・久保の報告では杭の形状の違いによる変位の伸びの差はなかったとされている。しかし、杭の形状が異なる場合には、周辺の地盤の動きが異なってくると考えられるので、繰返し挙動に影響がある可能性がある。

また、篠原・久保と現地の実験では、地盤が飽和もしくは湿潤状態にある。このように水の存在の有無によって実験結果が異なる可能性がある。

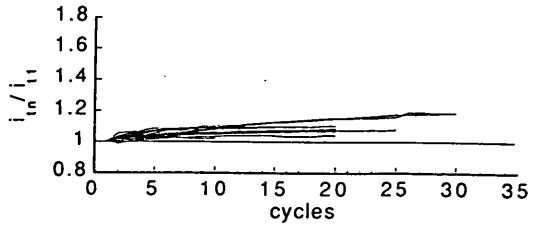
Barton¹⁷⁾は、飽和砂地盤と乾燥砂地盤中の杭に準静的に繰返し水平方向载荷をする遠心模型実験を行い、その結果から、砂地盤中の水の有無が杭の繰返し挙動におよぼす影響として以下のようにまとめている。すなわち、第一回目の繰返し载荷の過程で、杭前面の地盤は



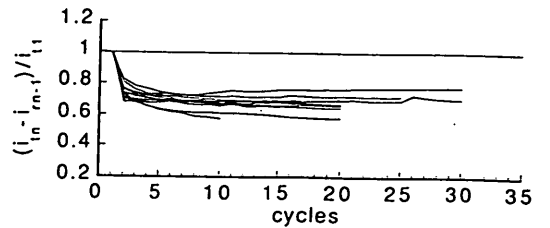
(a) 地表面変位比



(b) 各サイクルの地表面変位比



(c) 地表面たわみ角比



(d) 各サイクルの地表面たわみ角比

図-31 繰返し回数と変位比の関係

せん断を受け破壊する。杭背面では、土は引っ張り力に抵抗できないので地盤は杭に追随せず穴ができる。除荷時には、もし水があれば、杭前面の破壊した部分が液状化し、杭の周辺の穴があいた部分に砂が流れ込んでいく。その後の繰返しによって、表層付近の砂は締め固まっていき、ほぼ5回から10回程度の繰返しによって安定状態となる。このとき杭周辺にできた穴の斜面の勾配は比較

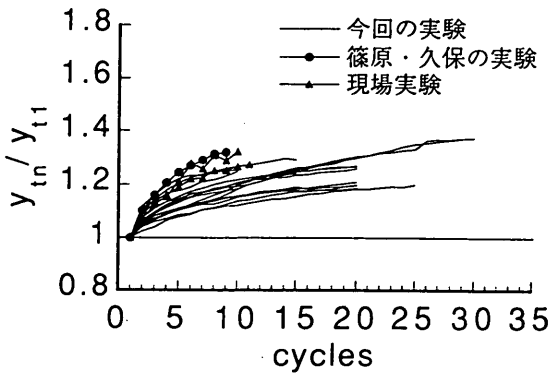


図-32 繰返し回数と地表面変位比の関係

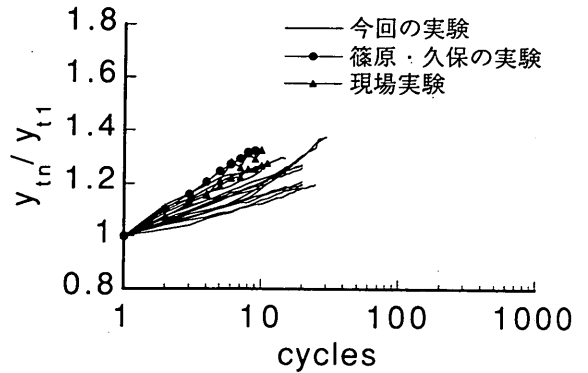


図-33 繰返し回数と地表面変位比の関係

的緩やかである。水が存在しない場合にも、杭前面では破壊が起こり、杭背面では穴ができる。繰返しによってできる斜面の勾配は水が存在する場合よりも急になり、穴に砂が動く量が少ない。そして最終的には、20回程度の繰返しによって安定状態となる。

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言えるかも知れない。しかし、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、今回の実験データからもわかるように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。

繰返し载荷による杭頭部の変位の伸びについては、根入れ比 $E_r = l/l_m$ が影響することが考えられる。特に、長杭と考えられないとき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_r はどの荷重レベルでも長杭の範疇にはいる1.5よりも大きかった。荷重レベルごとに実験結果を平均し、地表面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、地表面たわみ角についても同様であった。

図-33は横軸に繰返し回数の対数を取って地表面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¹³⁾と、現場実験の結果^{11), 12)}も同時に示してある。これらの結果からは、地表面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、地表面変位量の伸びは、繰返し回数の対数

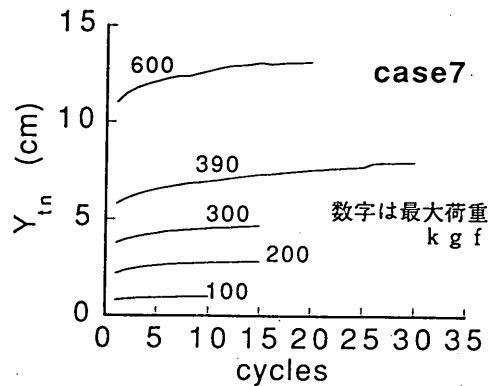


図-34 繰返し回数と地表面変位の関係

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、繰返しによる地表面変位量は処女荷重時に比べて1.4から1.6倍に達する。

このように、変位の伸びの傾向は、荷重レベルによらないと結論できるが、もともと処女荷重時の変位が小さいときには、繰返しによって変位が伸びても全体の変位量は小さく、工学的に問題でない。設計荷重のような大きな荷重が繰返し作用するときの変位が工学的に問題となる(図-34)。設計荷重のような極限的な荷重が作用する回数は数回以下と言ったような限られた回数であると考えられ、そのような場合の繰返しの影響によって増加する地表面変位量の伸びの最大値として処女载荷時の変位の1.4倍という数字は安全側である。

図-31(b)の縦軸が割線弾性係数の逆数を示していることはすでに説明したが、この値はすぐに0.4~0.6の

繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動

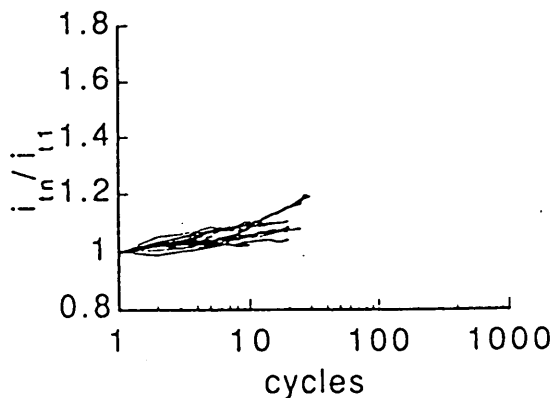


図-35 繰返し回数と地表面たわみ角比の関係

間に収束する傾向を示しており、割線弾性係数は初期荷重時のほぼ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ることがわかる。(図-31(c))地表面頭たわみ角についても、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ることが図-35からわかる。

図-31(d)はたわみ角について(c)と同じような整理をしたものであるが、比は0.6から0.8程度に収束する。

地表面変位が伸びていく挙動を理解するために、杭の地中部での挙動を見ることにする。図-36(a)~(d)は、ケース2の第1サイクルの杭の挙動を示したものである。

ただし、これらの図は、実測の曲げモーメントデータをスプライン近似して、微分及び積分して求めたものである。図に示す番号は、荷重の順序で、1から始まり、4で最大荷重となる。5からは除荷過程に入り、8で荷重が0となり、第一サイクルが終了する。なお、図中では、荷重過程は実線、除荷過程は点線で表している。

図-36(a)を見ると、荷重過程では、杭は荷重に従ってたわんでいく。表面からの観察ですでに認められたように、このとき杭の背面の隙間に砂が崩れ落ちるため、背面の地盤高さが下がる。除荷過程にはいると、杭はもとに戻ろうとするが、荷重時に背面に砂がたまつたため、十分にはもとに戻れない。杭の上部では曲げが少なくなるように挙動し、上部が急激に元に戻ろうとすると同時に、やや深いところでは逆に前方に押し出される挙動をする。

図-36(b)で曲げモーメントの変化を見ると、荷重過程では最大曲げモーメントの発生点は荷重の増加につれてわずかつ深くなるが、急激な変化をしない。除荷過程にはいると、除荷につれて最大曲げモーメントの発生深さは深くなり、さらに上部では曲げモーメントが発生せず、曲げモーメントのゼロ点の位置も深くなる。

図-36(c)からもわかるように除荷過程では、せん断力をより深い位置で受け持つようになり、地盤反力が主として作用する位置が深くなり、浅部ではほとんど作用しなくなる。(図-36(d))このような除荷過程での杭の挙動の観察はすでに、篠原・久保¹⁹⁾によってもなされて

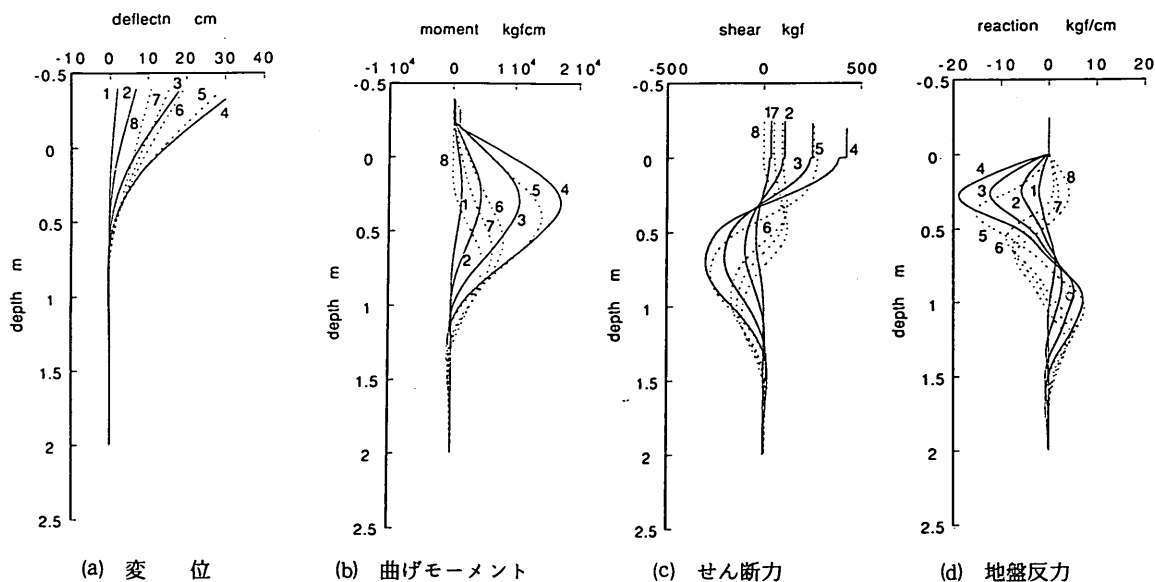


図-36 第1サイクルの杭の挙動

いる。

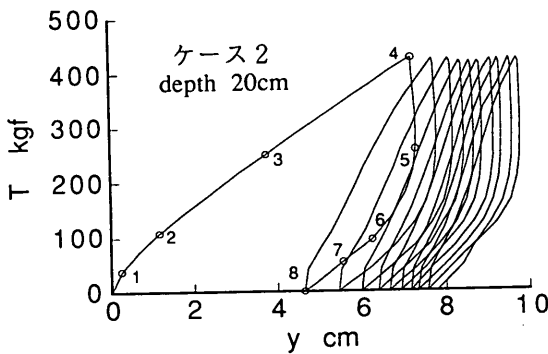
以上のことからわかるように、除荷時には杭は深度ごとに傾向の異なるかなり複雑な挙動をする。除荷時には、杭はもとに戻ろうとするが、浅部では背面に砂がすでに供給されているため、十分に戻ることができず、 $l_{m\max}$ が発生した深度あたりを支点にするかのようにして、やや深いところ、具体的には、 $l_{m\max}$ と l_{m1} の間で杭は引き続き前方に変位し、最大荷重作用時よりも大きな地盤反力を発生するようになる。このとき杭背面の $l_{m\max}$ より深いところに砂が供給されていると考えられる。

この様子をつぶさにみるため、代表的な深度として、20cmと52.5cmの二つの深さの点について、杭頭荷重 T と変位 y と地盤反力 p の関係を図-37に示す。なお、図中に示してある番号は、図-36と同じものである。図-37(a)、(b)は深度20cmの点の挙動を示したものである。(a)を見ると、杭頭荷重 T が増えるにつれて、変位 y が増加し、除荷の初期には、荷重が減少しても変位はほとんど変わらず、荷重がかなり下がって初めて急

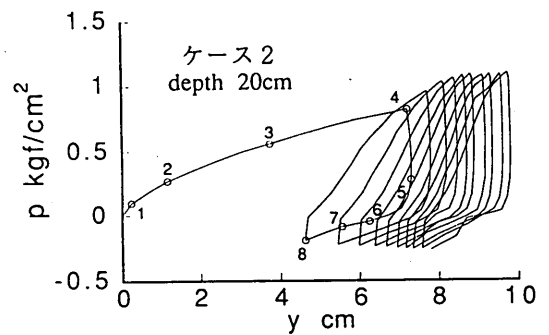
激に変位が減少するのがわかる。地盤反力 p についても同様であり、4から6に移る過程は、杭前面が受働状態であったところから、主動状態に移っていく過程であることがわかる。繰返し回数が増えるにつれて変位が増えて行くが、地盤反力は飽和せずに、処女載荷曲線の延長に沿って増加することがわかる。ここで、反力が処女荷重変位曲線の延長よりも上目にてていることは、港研方式の地盤反力係数 k_s が増加傾向にあることを示すものであるが、繰返しによって地盤の密度が増加する傾向にあることが一因であると考えられる。

一方、図-37(c)、(d)は深度52.5cmでの挙動を示すものである。ここでは、荷重 T を除荷しても引き続き変位 y が増え、荷重 T が0に達したあたりで変位 y の最大が発生する。除荷時に変位が増加する傾向は明かで、繰返しが進むにつれて、最大荷重時に変位が最小で、最小荷重時に変位が最大となる傾向が顕著となる。

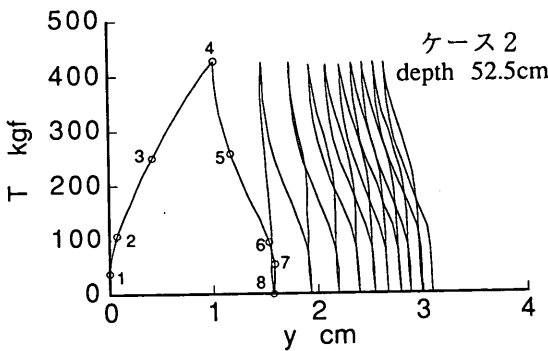
地盤反力 p については、奇妙な挙動を示している。処女載荷過程である1~4までは、変位 y の0.5乗に比



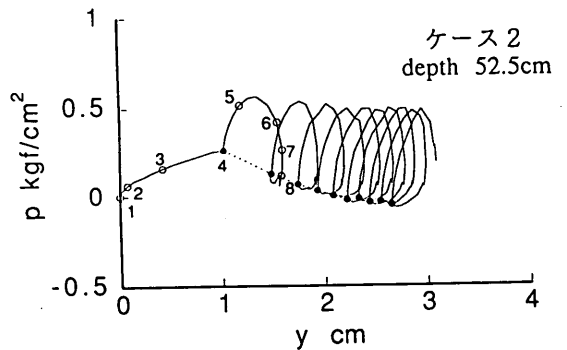
(a) 杭頭反力と杭の変位 (深度20cm)



(b) 地盤反力と杭頭変位 (深度20cm)



(c) 杭頭荷重と杭の変位 (深度52.5cm)



(d) 地盤反力と杭頭変位 (深度52.5cm)

図-37 ある深度での杭の繰返し挙動

例するような形で地盤反力が増加していくが、そのときの係数は、この地盤での平均的な地盤反力係数 k_s の半分程度である。除荷が始まると急激に地盤反力 p が増加する。このときの最大地盤反力は $k_s = 0.01 \text{ kgf/cm}^3$ としたときにこの深さで発生するであろう地盤反力にほぼ一致した値となる。この深さでは、変位の方向は処女載荷過程と同じであり、引き続き杭の前面側が受働側であるが、杭全体の変形状態が変化したため、急激に大きな反力が発生したものと考えられる。引き続き除荷すると、変位は増え続けるが、反力は徐々に低下する。図-37(d)には、杭頭荷重 T が最大の時の地盤反力と変位の関係を●で示している。この図からもわかるように、この深度では、繰返し回数が増えるとともに、最大荷重時の変位が伸びていき、地盤反力は減少しながら次第に一定値に収束する傾向にある。

以上のように、やや深いところでは、変位と地盤の関係が浅い部分 ($l_{m\max}$ 以浅) とは明らかに異なっている。地盤反力が変位の伸びとともに増えるという傾向は無く、最大荷重時の反力は徐々に小さくなり、反力が働かないようになる。

図-38には、ケース2の最初のサイクルと最後の3サイクル(8, 9, 10サイクル目)の最大荷重時の変位、曲げモーメント、地盤反力を示したものである。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 l_{m1} のあたりから変位が増え(図-38(a))、しかも、杭に発生する曲げは主として $l_{m\max}$ から l_{m1} の深度で変化がみられており、曲げモーメントの第一ゼロ点の位置がやや深くなる傾向にある(図-38(b))。地盤反力は、浅部で増加し、深いところでは反力が出ない方向に変化する(図-38(c))。 $l_{m\max}$ から l_{m1} までの深度のあたりでは、すでに図-37(c), (d) で見てきたように、繰返し回数によって最大荷重時の地盤反力の発生仕方が変化する。このような変化は繰返し回数の増加とともに連続的におきるが、図中の繰返し回数程度でもほぼ収束がみられるように、最終的には、一定の方向に収束していくものと思われる。

杭周辺の砂の動きについては以下のように考えられる。 $l_{m\max}$ より浅いところでは、おもに載荷時に杭の背面に砂が供給される。 $l_{m\max}$ から l_{m1} あたりのやや深いところでは、図-36(a)でも見られたように、除荷時に変位が増える。従って、この部分では、処女載荷時を除けば、除荷時に上部から杭背面に砂が供給される。次に載荷するときに杭のこの部分は戻ろうとするが、すでに背面に砂が供給されているため、もとはは戻ることができない。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

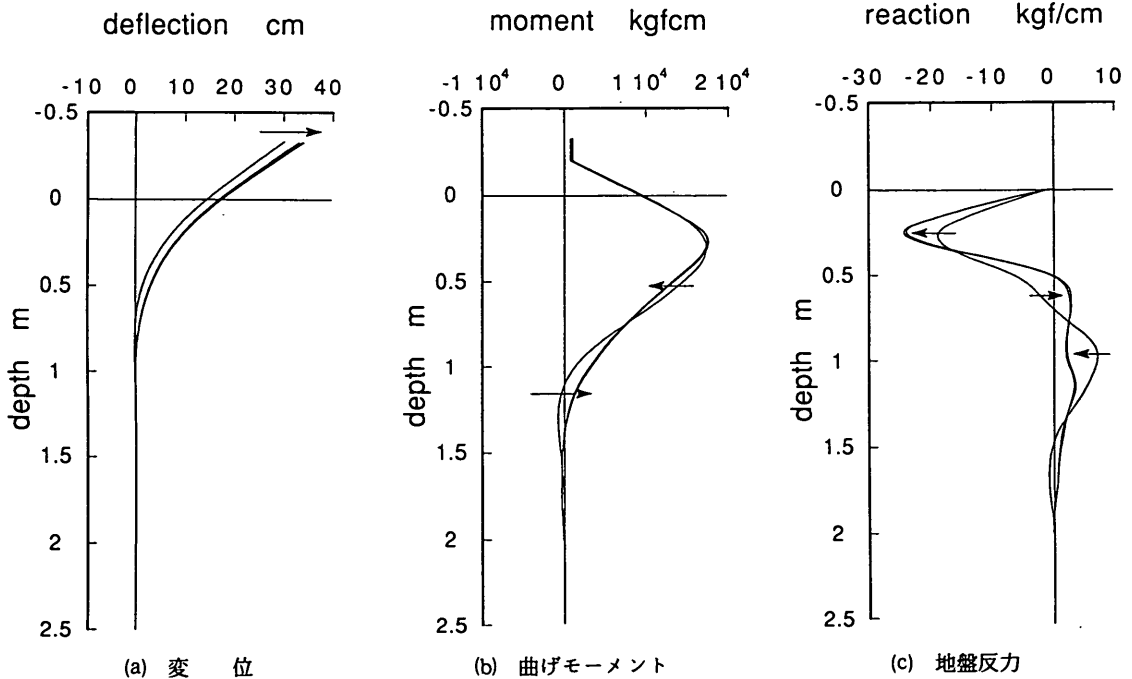


図-38 繰返し荷重作用時の杭の挙動

という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。

図-37(c)でも見られるように、1サイクルでの変位の伸びはこの深さでも小さくなっていき、砂が供給される量がだんだん少なくなっていくことがわかるが、このような砂の供給がなくならなければこの深度の地盤反力の発生の仕方が安定的にならないと考えられ、このためには多数の繰返し回数を必要とする。

繰返し載荷時に杭周辺の砂は上記のように動いていると考えられるが、この結果、図-37(d)や図-38(c)で見られるように、 l_{max} より深いところでは最大荷重時に地盤反力がほとんど発生しなくなり、深いところからのたわみ量が増え、全体として杭の変位が伸びていくものと考えられる。

一方、弾性荷重領域内では、比較的深部(最大荷重時の l_{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、 l_{max} から l_{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。

4. 大変形繰返し荷重を受けた単杭の挙動の推定^{9), 10)}

今回室内実験で実施したのと同様な大変形繰返し力が作用した実大実験が一連のSPS(単杭構造)の設計法の開発研究の中で行われている^{1), 2)}。その結果、これまで本論文で述べてきたことと基本的に同じ結果が得られている。すなわち、相当の大変形になるまで港研方式が適用でき、同じレベルの繰返し載荷をすると繰返し回数とともに変位が伸びていく傾向がみられた。

そこで、大変形、繰返し荷重作用時の単杭の挙動について以下のような方法で推定することが考えられる。

- ①まず、想定される荷重に対する処女荷重時の変位 y_0 とたわみ角 i_0 を港研方式によって推定する。
- ②繰返し荷重作用時の最大変位、残留変位については、次式によって推定する。

$$y_{top} = A_1 y_0 + A_2 i_0 h + \frac{Fh^3}{3EI} \quad (3)$$

ここで、

- y_{top} : 載荷点の変位
- y_0 : 処女載荷時の地表面の変位
- i_0 : 処女載荷時の地表面のたわみ角
- h : 載荷高さ
- F : 水平荷重
- EI : 杭の曲げ剛性
- A_1, A_2 : 表-6による

ただし、表-6の各数字は以下のようにして求めた。すなわち、図-31(a)と(c)は、それぞれ載荷時の最大地表面変位と最大地表面たわみ角が繰返しによってどのように伸びて行くかを示したものであり、処女載荷時に対する比はそれぞれ繰返しによって1.0~1.4と1.0~1.2に変化する。杭の吸収エネルギーを求める際には、載荷の過程で変位やたわみ角がどのように変化するかが問題であり、それには図-31(b)と(d)を用いることができる。それらの値の処女載荷時の最大変位、最大たわみ角に対する比は、変位については0.4~0.6、たわみ角については0.6~0.8となることがわかる。残留変位量としては、地表面変位は、図-31(a)と(b)の差し引きによって求められ、地表面たわみ角については図-31(c)と(d)の差し引きによって求められる。ただし、残留変位を求める際には(3)式の第三項は0となる。

表-6 繰返し載荷による影響係数

	最大変位を求めるとき	杭の変位による吸収エネルギーを求めるとき	残留変位を求めるとき
A ₁	1.0~1.4	0.4~0.6	0.4~1.0
A ₂	1.0~1.2	0.6~0.8	0.2~0.6

③杭の変形によるエネルギー吸収量は次式によって計算できる。

$$E_a = \frac{1}{2} C (y_{i.op1} - y_{i.opr}) \quad (4)$$

ここで、

$$y_{i.op1} - y_{i.opr} = A_1 y_0 + A_2 i_0 h + \frac{Fh^3}{3EI} \quad (5)$$

C: 杭頭変位による見かけのバネ定数

$$C = \frac{F}{y_{i.op1} - y_{i.opr}} \quad (6)$$

A₁, A₂: 杭の変形による吸収エネルギーを求めるときの係数(表-6)

杭の変形による見かけのバネ定数は本来非線形であるが、繰返し荷重作用時には線形性がよくなるので(4)式のように線形で近似することによる誤差は少なく、しかも設計上安全側となり、計算も容易である。

この式を用いた実際の杭の変形によるエネルギー吸収の計算の一例を示す。計算条件は以下のとおり。

- 地盤反力係数 $k_s = 3.5 \text{ kgf/cm}^2$
- 杭の直径: 1900mm
- 杭の板厚: 32mm
- 作用水平力: 200tf
- 載荷高さ: 21m

杭の曲げ剛性： $1.72 \times 10^{13} \text{ kgfcm}^2$

最初に、港研方式により処女載荷時の地表面の変位 y_0 と地表面のたわみ角 i_0 を求める。この計算は港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁹⁾に計算方法が掲載されているので、ここでは計算の過程を省略するが、 $y_0 = 7.40 \text{ cm}$ 、 $i_0 = 1.89 \times 10^{-2} \text{ rad}$ という結果が得られる。参考までにこのときの杭の最大応力度は 5010 kgf/cm^2 であり、SHY 685 の鋼種を用いれば、 $1.5 \times$ 長期許容応力度 (上部構造設計基準・同解説²⁰⁾ より $1.5 \times 3600 \text{ kgf/cm}^2$ とする) の 0.93 程度である。

次に、(5)式により、エネルギー吸収量を求めるための繰返し荷重を受けた杭の載荷点の変位 $y_{1.0pr} - y_{1.0pr}$ を求める。

$$\begin{aligned} y_{1.0pr} - y_{1.0pr} &= 0.4 \times 7.40 + 0.6 \times 1.89 \times 10^{-2} \times 21 \\ &\quad 00 + 200 \times 10^3 \times 2100^2 / 3 \times 1.72 \times 10^{13} \\ &= 62.7 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

ただしここでは安全側とするため、繰返し荷重の影響係数 A_1 、 A_2 をそれぞれ $A_1 = 0.4$ 、 $A_2 = 0.6$ とした。

次に、杭頭変位による見かけのバネ定数 C を(6)式により求める。

$$C = 200 / 0.627 = 319 \text{ (tf/m)}$$

最後に、杭の変形による吸収エネルギー E_a を(4)式により求める。

$$E_a = 1/2 \times 319 \times 0.627^2 = 63 \text{ (tfm)}$$

5. 結論

本研究では、大変形が発生するような状況下で模型杭の水平方向繰返し載荷を行い、大変形時の杭の挙動と繰返し載荷に対する杭の挙動について検討した。実験データの解析にあたって、測定データをスプライン関数で近似する手法を新たに開発し、地盤反力係数について詳細に検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 新たに開発した、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、曲げモーメントを2回微分して得られる地盤反力の深度分布が精度よく推定できるようになった。
- (2) 大変形する杭では、杭が抜け上がりながら変位が増加する可能性があるため、注意を要する。
- (3) 処女載荷時には、大変形時 (今回の模型実験のレベルで変位 $y > 15 \text{ cm}$) においても港研方式 ($p \propto y^{0.5}$) が適用できることがわかった。このことは、地盤反力

がなかなか上限値に達しないことを意味する。

- (4) 同じ荷重を繰返し載荷した場合には、杭の変位及びたわみ角は次第に増えていく。その伸びは、繰返し回数対数にほぼ比例する。しかし、設計上考慮すべき最大荷重の繰返し回数は有限であるので、繰返し載荷による地表面変位の処女載荷時の変位に対する比はある値以下になる。その値は 1.4 とすれば安全側である。
- (5) 繰返し載荷の載荷及び除荷時に杭背面に砂が上部から供給されるため杭の変位が増えていく。砂の供給はなくならないため、変位は繰返し回数とともに増加する。このとき、 $l_{\text{max}} \sim l_m$ の深さの地盤反力の発生の仕方が変化し、杭の変位の伸びは l_m 程度の深さあたりから顕著となる。
- (6) 砂地盤における大変形繰返し荷重を受ける杭の挙動の推定方法として、まず港研方式により大変形時の処女荷重時の杭の挙動を計算し、これに繰返し荷重の影響を係数として加味する方法を提案した。

6. あとがき

本研究は、昭和63年度から平成元年度にかけて、港湾技術研究所、大成建設株式会社、日本鋼管株式会社の三者の共同研究として実施された研究のうち、基礎工研究室と日本鋼管株式会社とで共同して実施した実験の成果をとりまとめたものである。この実験は、平成元年には終了していたが、諸般の事情により、報告書のとりまとめが遅れていた。深くお詫びする。

杭の変位の伸びには杭周辺の砂の動きが大きな影響を持っているので、杭形状の違いや、砂の湿潤状態の違いによって、杭の変位の伸び挙動が異なってくることは大いに考えられる。現在ある実験結果では、その点を明確にする事ができないが、今後のデータの蓄積によってこれらの点が明らかにされていくものと期待される。

同時に、粘性土地盤における繰返し載荷による杭の変形問題も検討する必要があると考えている。

また、今回の報告ではまだ十分な検討がなされていないが、今回の問題に関連した事項として、港研方式の物理的意味、たわみ性壁の変形と土圧の関係についてさらなる検討が必要である。

実験データの解析にあたっては平成4年度基礎工研究室研修生の吉田渉氏 (㈱日本港湾コンサルタント) にお手伝いしていただいた。非常に精力的に計算していただき、計算手法の不備な点についてもいくつかご指摘いただいた。スプライン近似手法のチェックについては基礎工研究室の朝木祐次氏にお手伝いいただいた。実験の初期の段階では、元基礎工研究室の針金誠悦氏 (現秋田大学)、

壹岐幸史氏（現第四港湾建設局）にご協力いただいた。
また、本論文をまとめるにあたり、小林正樹土質部長からは、懇切なるご指導をいただいた。関係のみなさんに深く感謝いたします。（1992年9月30日受付）

loading in the centrifuge, Proc. of Symp. on the Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design, 1984, pp.456-472
18) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説，1980

参 考 文 献

記号一覧表

- 1) 木内里美・森永勝登・高橋正美・廣瀬鉄蔵・榊信昭・鈴木操：SPS（単杭構造）の設計法に関する基礎的研究，第13回海洋開発シンポジウム，1988，pp.331-336
- 2) 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
- 3) 高橋邦夫・菊池喜昭・鈴木操：大変形繰返し荷重を受ける模型杭の水平抵抗，第26回土質工学研究発表会講演集，1991，pp.1429-1430
- 4) 働沿岸開発技術研究センター：SPS（単杭構造）の設計の手引き，働沿岸開発技術開発センター，1992，p.38
- 5) 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 (Geo-Coast'91), Vol.1, 1991, pp.753-758
- 6) 高橋邦夫・菊池喜昭・鈴木操：大変形繰返し荷重を受ける単杭の水平抵抗特性，構造工学論文集Vol.38A, 1992, pp.1409-1416
- 7) 上田茂・白石悟：大変形する単杭構造による接岸ドルフィンに残留変位強度と累積疲労損傷度，港研報告第30巻第1号，1991，pp.267-312
- 8) 荘司喜博：砂地盤における地中杭の横抵抗に関する実験的研究，港研報告第23巻第2号，1984，pp.75-179
- 9) 桜井明編：スプライン関数入門，東京電機大学出版局，1981，p.173
- 10) 土田孝・菊池喜昭・中島謙二郎・佐々木栄美穂：パーソナルコンピュータを用いた全自動圧密試験機の製作，第19回土質工学研究発表会，1984，pp.207-208
- 11) 吉村和美・高山文雄：パソコンによるスプライン関数，東京電気大学出版局，1988，p.217
- 12) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，1989，p.381
- 13) 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）- 垂直自由端単杭の横抵抗 -，運輸技術研究所報告，第11巻第6号，1961，pp.169-242
- 14) 久保浩一：杭の横抵抗の新しい計算法，港研報告第2巻第3号，1964，p.37
- 15) 横山幸満：荷重関数法による梁の力学，山海堂，1987，p.231
- 16) 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
- 17) Barton, Y.: Response of pile groups to lateral

A_1	: 繰返し載荷による影響係数（変位）
A_2	: 繰返し載荷による影響係数（たわみ角）
B	: 杭幅（cm）
C	: 杭頭変位による見かけのバネ定数
D_r	: 相対密度
E	: 鋼材のヤング率（kgf/cm ² ）
E_a	: 杭による吸収エネルギー
E_r	: 根入れ比
EZ	: 曲げモーメント換算係数（kgfcm）
F	: 水平荷重（tf）
h	: 載荷高さ（m）
I	: 断面2次モーメント（cm ⁴ ）
i_0	: 処女載荷時の地表面たわみ角（rad）
i_{rn}	: n回目の荷重0時の地表面たわみ角（rad）
i_{rn}	: n回目の最大荷重作用時の地表面たわみ角（rad）
i_{top}	: 杭頭たわみ角（rad）
K_0	: 静止土圧係数
k_s	: 地盤反力係数（kgf/cm ^{3s} ）
l	: 根入れ長（m）
l_{max}	: 最大曲げモーメント発生深さ（m）
l_{m1}	: 曲げモーメント第一ゼロ点の深さ（m）
M	: 曲げモーメント（kgfcm）
P	: 杭に働く反力（kgf/cm）
p	: 地盤反力（kgf/cm ³ ）
T	: 杭頭水平荷重（kgf）
x_{top}	: 杭頭の鉛直変位
y_0	: 処女載荷時の地表面変位（cm）
y	: 変位（cm）
y_{rn}	: n回目の荷重0時の地表面変位（cm）
y_{rn}	: n回目の最大荷重作用時の地表面変位（cm）
y_{top}	: 杭頭変位（cm）
ϵ	: 曲げひずみ
ρ_d	: 乾燥密度（g/cm ³ ）
ρ_{dmax}	: 最大乾燥密度（g/cm ³ ）
ρ_{dmin}	: 最小乾燥密度（g/cm ³ ）
ρ_s	: 土粒子密度（g/cm ³ ）
δ	: 杭と砂の間の摩擦角（°）
σ_{sy}	: 鋼材の降伏応力（kgf/mm ² ）