

# 遠心模型実験による杭の $p$ - $y$ 関係の推定

込山 貴士<sup>1</sup>, 森 伸一郎<sup>2</sup>, 木村 亮<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 愛媛大学大学院 理工学研究科土木海洋工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

<sup>2</sup> 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

<sup>3</sup> 京都大学大学院助教授 工学研究科 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

In doing anti-earthquake design, the grasp related to lateral subgrade reaction - displacement of the pile evaluated that nonlinear is appropriate is needed. In this study, centrifugal static lateral loading test on single pile model in dry sand were carried out. And, the lateral subgrade reaction and displacement of pile were estimated under the basic equation of elastic beam the differentiation and integration of distribution of bending strains along the pile. Estimated results were compared for verification by directly measuring lateral earth pressure at two depths and displacement at the top of pile.

**Key Words:** pile, sand,  $p$ - $y$  relationship, coefficient subgrade reaction, non linearity, cyclic loading, centrifugal

## 1. はじめに

地震時において、杭は水平方向の外力として地盤の変形による荷重と、上部構造物の慣性力という2種の地震荷重を受ける。この水平方向の力を受ける杭に関する問題は、杭の水平抵抗問題と呼ばれる。

杭の水平抵抗問題を考える時、動的、静的問題に分けられるが、ここでは後者の静的問題について考える。実験において、杭頭に静的な水平漸増荷重を作用させた場合、杭は小さな荷重領域から非線形挙動をすることは知られている。このような杭の非線形挙動は、主に杭体と杭周辺地盤の非線形に支配される。前者は杭材料や形状などから把握できるが、後者については未解明な点が多く、これらの点を明らかにすることは杭の水平抵抗問題において重要なことである。

杭周辺地盤の非線形性を明らかにするために、杭を梁に置換し、これに作用する地盤からの反力(地盤反力)について考える。この方法は地盤反力法と呼ばれる。地盤反力法には、杭を剛体として杭-地盤系の崩壊機構を仮定して、力の釣り合いから杭の極限水平抵抗力を求める極限平衡法、杭の水平変位に応じて地盤反力が働くと仮定し、土を弾性体と仮定して梁の曲げ理論を用いる弾性地盤反力法、地盤の弾塑性状態を考慮して地盤反力はある限界値を越え

ないとする複合地盤反力法などがある。

このうち、弾性地盤反力法では、線形、非線形とに分けられ、線形では、変位に比例した地盤反力となる地盤ばねモデルが用いられ、深さ方向に一定、深さ方向に線形増加、深さのべき乗で増加などのモデルが提案されている。しかし、いずれのモデルでも微分方程式は線形となり、作用荷重に比例した応答値しか得られない。が、杭に発生する応力や変位を比較的簡単に求められ、ばねの適切な評価により杭の水平挙動をかなりの精度で説明できるなどの利点がある。よって、この線形弾性地盤反力法はChangの式などで各分野の設計法として用いられてきた<sup>1)</sup>。一方非線形は、地盤を非線形モデルで表現する解析法であり、ひずみに応じて地盤のばね剛性を低下させる非線形弾性地盤反力法、地盤反力  $p$  と水平変位  $y$  の関係を非線形曲線で表す  $p$ - $y$  曲線法などがある。しかし、非線形弾性地盤反力法では、陽な解析解が得られないので、繰返し計算など特別な計算法が必要となる。

最大で震度7の揺れを記録した1995年1月17日の兵庫県南部地震以来、設計法は比較的大きな変位を許容する設計法に移行してきている<sup>2)</sup>。これは、変位の小さな領域から、杭に損傷を与え地盤が強い非線形性を示す大变位までの水平地盤反力の特性を求めることが必要になってきたことを意味す

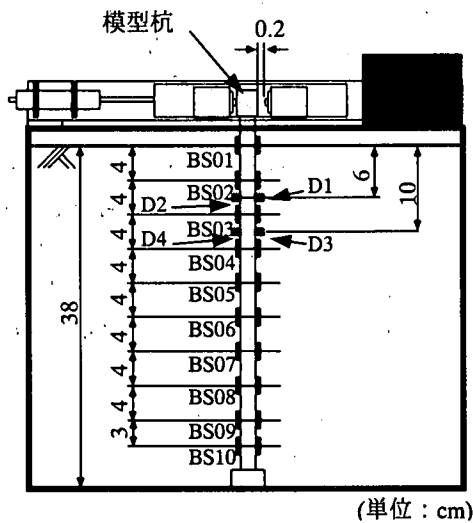
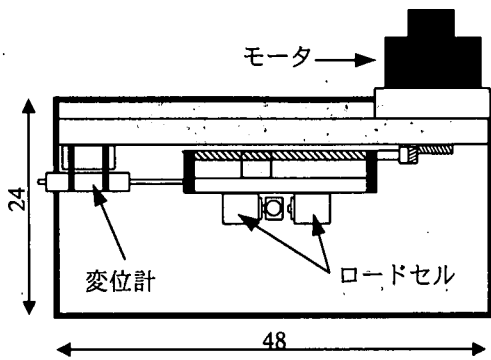


図-1 実験装置

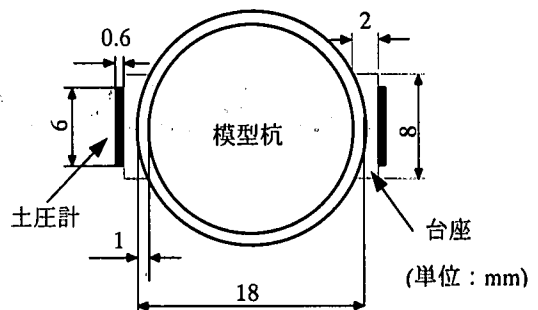


図-2 土圧計の固定方法

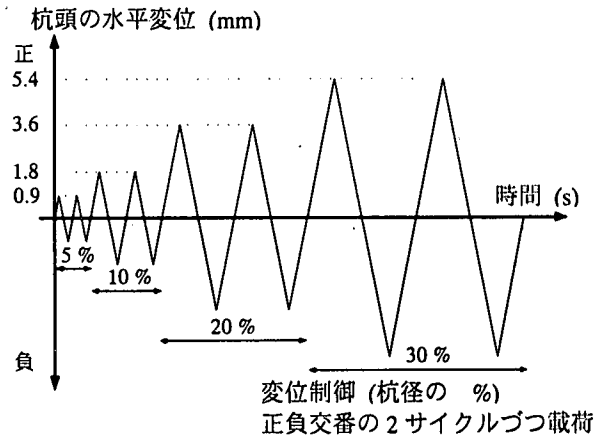


図-3 杭頭荷重の载荷サイクル

る。従来の設計法では強い非線形性は考慮されていないので、非線形性に着目した深さ方向に関する水平地盤反力の特性を解明する必要がある。

深さ方向に関する水平地盤反力-水平変位関係(以下  $p-y$  関係と呼ぶ)に関する研究は、模型実験、実物大実験など数多くなされているが、大きな非線形領域まで考えられたものは少ない。また、土の力学的特性が拘束圧に依存することから、最近では、遠心载荷装置に土槽を搭載した遠心模型実験も多く実施されている。これらの研究では、測定の手軽さから、杭の曲げひずみ測定から弾性梁の多項式近似による2回積分して水平変位を、2回微分して水平地盤反力を推定という手法がよくとられている。このような  $p-y$  関係の求め方は、一般的であるが、この推定法の精度を検証した研究はあまりない。

この点を踏まえて、著者らは、砂地盤中における単杭の  $p-y$  関係の解明を目的とし、それぞれの深さにおける水平地盤反力と杭の水平変位の推定を行った。はじめに、水平地盤反力の推定を行い多項式の次数を検討し、続いて変位の推定精度を検討し、杭の水平変位は精度良く推定されていることを明らかにした。また、杭に土圧を貼付して土圧の直接測定による地盤反力の推定精度を検証するとともに、ひずみ計の検定を行った。そこで、このように行って

きた 1G 場での実験で得られた知見が、遠心場において成立するか否かを調べるために本研究では、遠心場において小型模型を用いて 1G 場と同様の水平载荷実験を行った。そして、水平地盤反力の拘束圧依存性や非線形性を検討した。

## 2. 実験装置

図-1 に単杭の杭頭水平载荷実験の実験装置を示す。実験に用いた土槽は、長さ 48 cm、幅 25 cm、高さ 40cm の鋼鉄性容器である。模型地盤として、乾燥状態の豊浦砂を用いた。地盤の作成方法は、杭を設置した後、砂降らせ器を用い、砂を落下させる空中落下法を採用した。本実験では、落下高さ 1 m とし、砂降らせ器のスリット幅を 1 mm で砂を降らして相対密度  $D_r = 90\%$  の密な地盤を作成した。

模型杭には、外径 18.0 mm、肉厚 1.0 mm、長さ 44 cm (埋設長さ 38 cm)、ヤング率  $E = 1.10 \times 10^8$  kPa の中空真鍮パイプを用いた。これらの諸元はすべて測定した。杭先端は、土槽底面の固定具を介して、先端固定とした。杭頭部は自由とした。

杭頭载荷時の杭体に生じる曲げひずみを測定するために、杭の前後面に 2 枚のひずみゲージを杭の外

側に貼付した。深さ方向に地表面から4 cm 間隔で9点、最下点は、杭先端の固定具と干渉するため、間隔を3 cm とし、計10断面で測定した。杭の前後面の2枚を1組としてひずみ計(BS)とした。杭頭載荷点は地表面高さ5 cm とし、杭頭荷重を2つのロードセルによって測定した。また、同高さにおいて接触型変位計を用いて杭頭変位を測定した。また、杭周辺の土圧を直接測定するために、杭の1断面につき2個の小型土圧計を前後面に貼付した。地表面から6 cm, 10 cm の2断面において測定した。用いた土圧計は受圧面の直径6.0 mm, 厚さ0.6 mm と小型である。図-2 に土圧計の固定方法を示す。土圧計の杭への固定方法は、杭にステンレス製の台座を設けて、その上に土圧計を装着した。台座を設けるのは、土圧計の受圧面に対し平面を保つためである。アクリルの杭模型の場合<sup>8), 9)</sup>、杭表面を土圧計の幅の分だけ切削することで平面が得られ、土圧計の部分は周囲の杭表面との間に段差は生じなかった。しかし本実験では、台座を設けたため、土圧計の表面は周囲の杭表面よりも突出している。よって、測定される土圧は本来杭に作用する土圧より大きく測定される可能性がある。土圧計はそれぞれD1~D4とした。

なお実験は、京都大学防災研究所の遠心載荷装置を用いて10 G, 60 G の遠心加速度で行った。

### 3. 実験方法

#### 3.1 杭頭への載荷方法

杭頭への載荷は、モーターを用いて、スライダを移動させることによって行った。スライダにはねじが切っており、モーターにとりつけられたベベルギアとかみ合っている。モーターの回転がベベルギアに伝わることで、スライダが水平移動し、載荷が行われる。載荷は変位制御で行った。図-3 に載荷サイクルを示す。

#### 3.2 水平地盤反力の推定方法

杭頭載荷実験から測定された杭の曲げひずみに杭材料の曲げ剛性(EI)を乗じて曲げモーメントに変換する。そして多項式による関数近似を行う。本研究では、5次多項式とした。曲げモーメント分布の5次近似式を2回積分、2階微分して水平変位、水平地盤反力をそれぞれ推定する。2階微分して得られるのは、杭に作用する分布荷重である。水平地盤反力度は単位面積当たり作用する応力度である。よって、分布荷重を杭幅で除することで水平地盤反力度を得る。積分の境界条件としては、実験時の杭先端固定

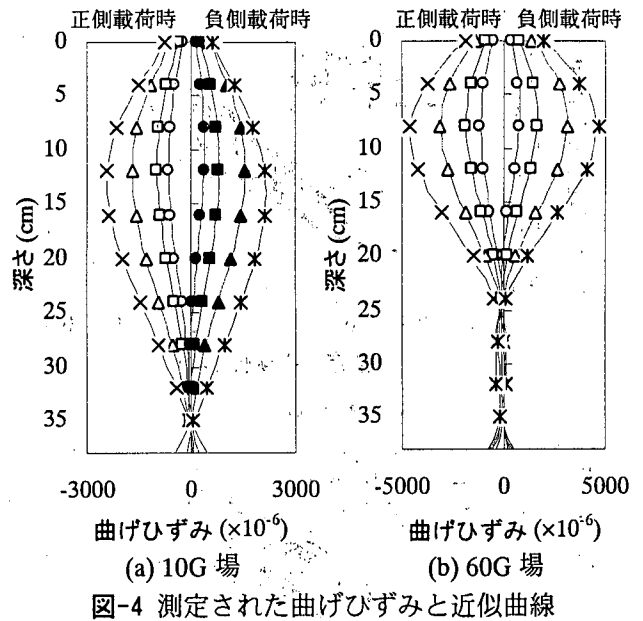


図-4 測定された曲げひずみと近似曲線

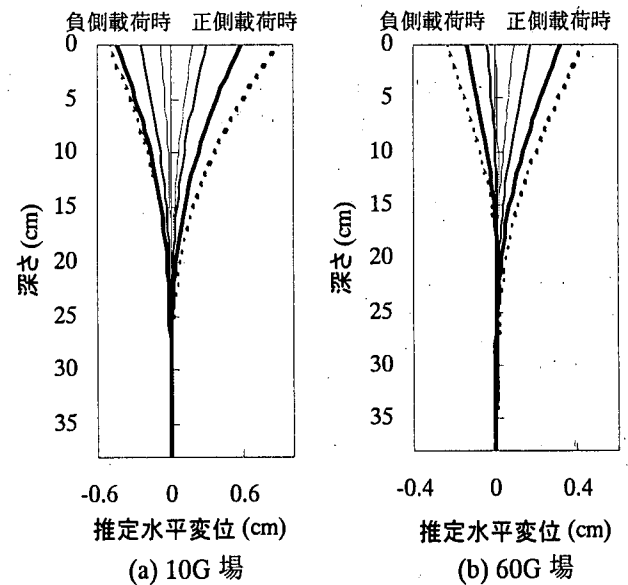


図-5 推定された水平変位

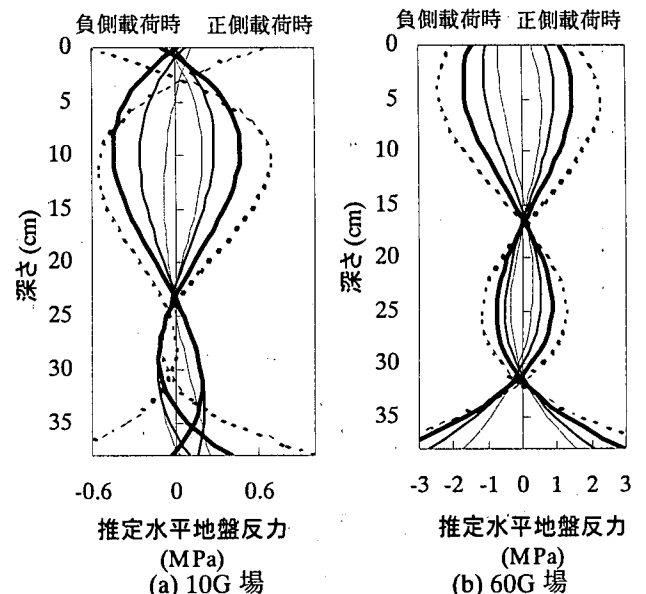
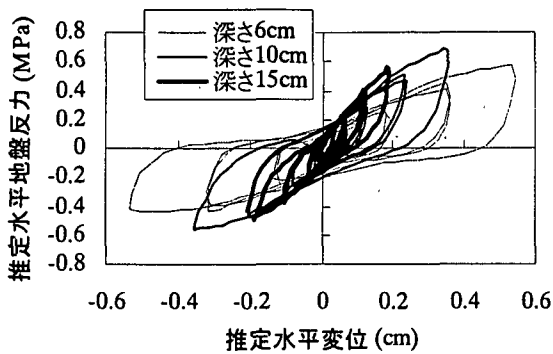
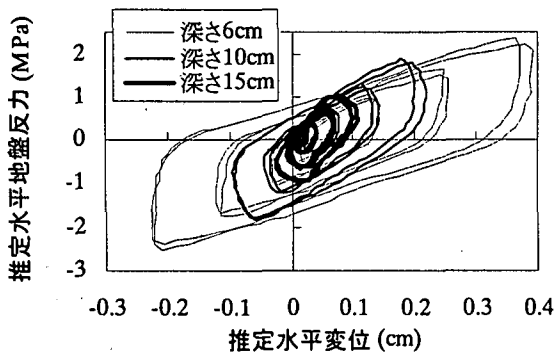


図-6 推定された水平地盤反力

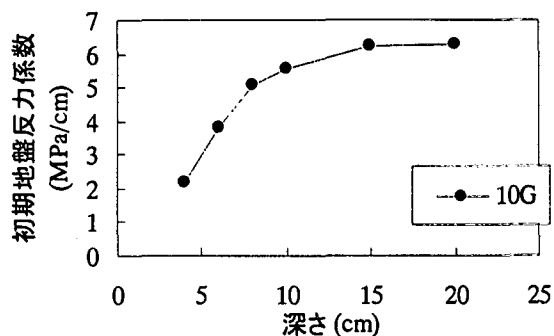


(a) 10G 場

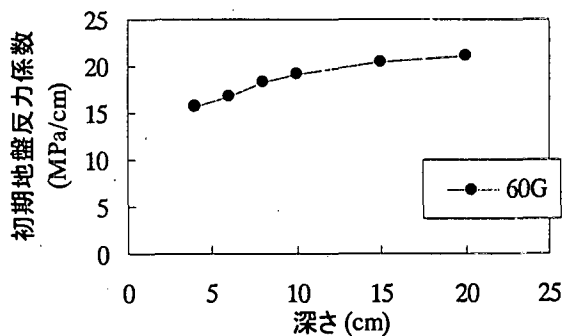


(b) 10G 場

図-7 3つの深さの p-y 関係

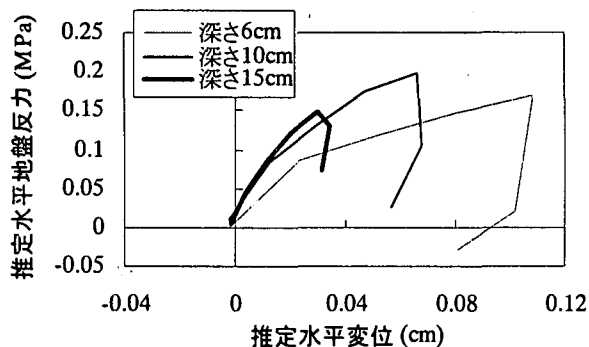


(a) 10G 場

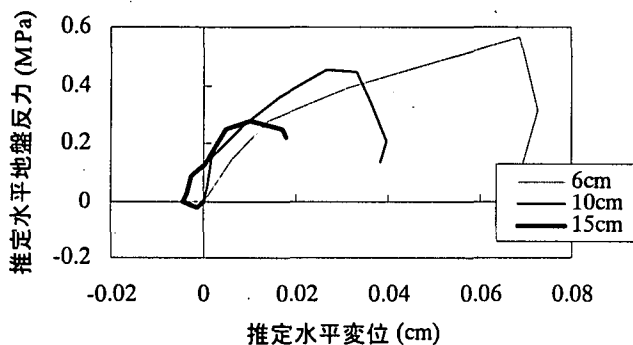


(b) 60G 場

図-9 各深さの初期地盤反力係数

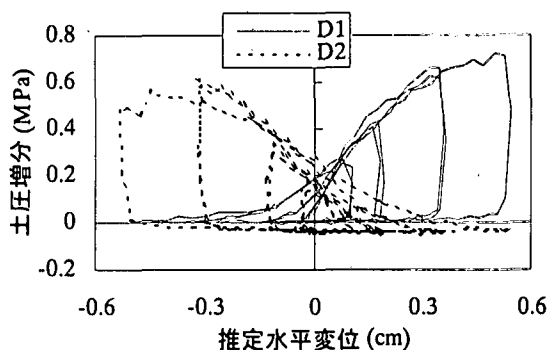


(a) 10G 場

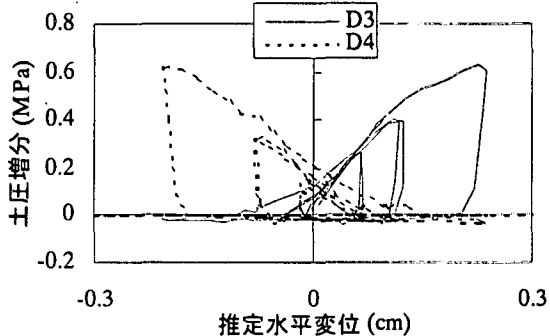


(b) 60G 場

図-8 地盤反力の初期部分



(a) 深さ 6cm



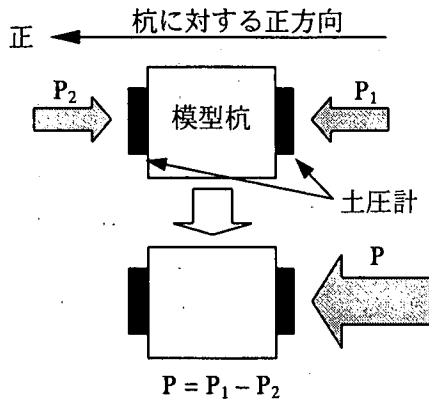
(b) 深さ 10cm

図-10 各土圧計の測定値 (10G 場)

条件から杭先端の変位、傾斜角をゼロとした。

### 3.3 推定精度の検証

杭に装着した土圧計の測定値と、推定された水平地盤反力とを比較することによって、推定の精度を検証した。また、杭頭における変位計の測定値と地



(P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 土圧計の測定値, P; 水平地盤反力)

図-11 土圧計の測定値の解釈

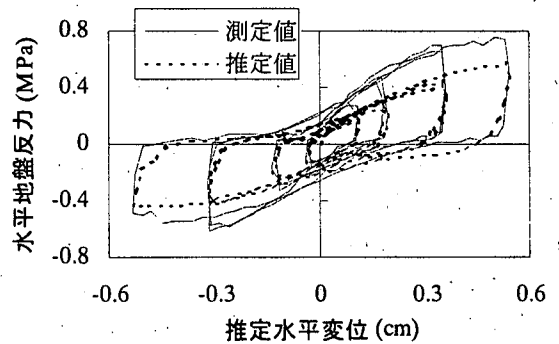
上突出部において推定された水平変位とを比較することによって、推定精度を検証した。地上突出部における水平変位の推定は、地表面まで推定した杭の水平変位と傾斜角を境界条件とし、集中荷重の作用する片持ち梁とみなして、弾性梁の微分方程式に基づいて杭の変位を算出した。こうして算出された推定値と変位計の測定値とを比較した。

#### 4. 実験結果

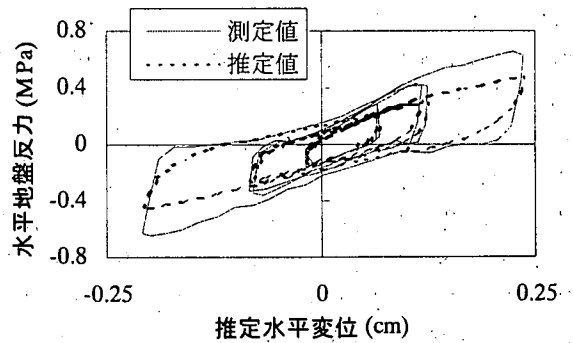
実験結果の図は、各荷重段階のピーク値時を示す。図-4 に測定された曲げひずみと近似曲線を示す。これらの図から、10G 場では、ひずみは深部にまで及び杭全体にひずみが見られる。最大ひずみは、深さ 12 cm で 2500 μ 表れている。60G 場では、杭の浅部で大きくひずみが生じている。最大ひずみも深さ 8 cm で 4500 μ となっている。図-5 に推定された水平変位を示す。10G 場と 60G 場を比較して、10G 場のほう

が深くまで変位していることがわかる。図-6 に杭は推定された水平地盤反力を示す。10G 場では、杭頭荷重が大きくなるにつれ、地盤反力の最大値は深くなる傾向が見られる。対して、60G 場ではその傾向は見られないが、地盤反力の明確な変曲点が見られる。図-7 に3つの深さの p-y 関係を示す。10G 場では、地盤反力が降伏しているのが見られるが、60G 場では、降伏は見られない。

図-8 に地盤反力の初期部分の拡大図を示す。この図から、10G、60G 場ともに深くなるほど、地盤反力の初期勾配は大きくなることがわかる。また、地盤反力の非線形性は小さな変位から表れていることがわかる。この地盤反力の初期部分を拡大し、杭の直径を D と表して水平変位が 0.01D 時の割線係数を初

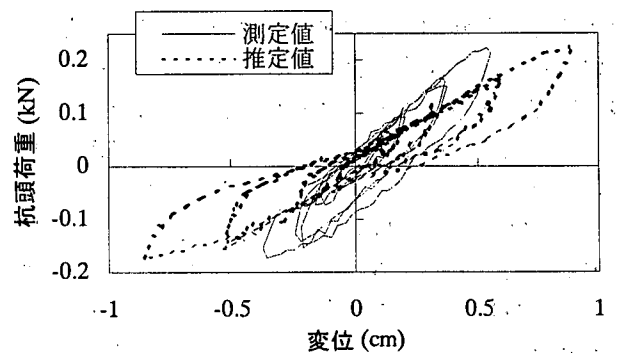


(a) 深さ 6cm

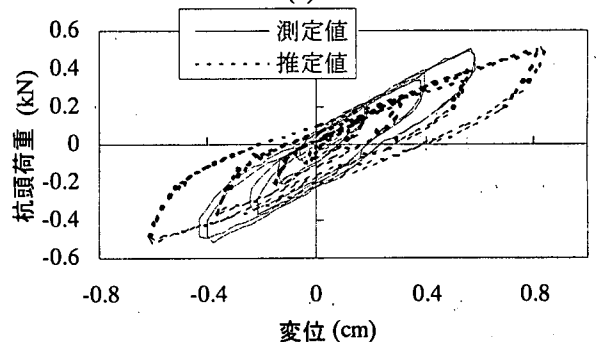


(b) 深さ 10cm

図-12 地盤反力の検証 (10G 場)



(a) 10G 場



(b) 60G 場

図-13 変位の検証

期地盤反力係数として求めた<sup>7)</sup>。図-9に各深さの初期地盤反力係数を示す。10G場では、上に凸の形で降伏してきているのがみられるが、60G場では、ほぼ直線的に増大していることがわかる。

次に、推定法の検証について示す。図-10に杭に貼付した土圧計の測定値を示す。10G場では、土圧計D3が、60G場では、土圧計D2が途中から測定されていなかったため、測定されている範囲で示す。ここでは、10G場の図を示す。これらの図から、水平土圧は杭の前後面でほぼ対称であることがわかる。図-11に示すように、杭の前後面で測定した土圧を水平地盤反力として求めるために、正側と負側の土圧計の差を水平地盤反力として採用した。図-12に地盤反力の検証を示す。測定値より推定値が小さめであるが、両者の形状は似ていることがわかる。図を省略したが、60G場でも同様な傾向が見られた。

また、変位の検証を示す。図-13に変位の検証を示す。10G場では、誤差が大きく見られピーク値で50%程度であるが、60G場では、ピーク値で20%程度に収まっていることがわかる。1G場での実験<sup>8), 9)</sup>に比べ、推定値と測定値の誤差が大きく表れている。

## 5. 結論

遠心場において、小型模型を用いた乾燥地盤中の単杭に対する静的な水平載荷実験を行った。そして、杭の曲げひずみ測定による弾性梁の基本方程式に基づく推定法を用いて p-y 関係の推定を行った。

その結果、次のことがわかった。(1) 水平地盤反力の特性として、深くなるほど、初期勾配は大きくなり、小さな変位から非線形性が表れる。(2) 初期地盤反力係数は、深くなるほど大きくなる。10G場では深さの小さいところで線的に変化するが、深くなるほど伸びは小さくなる。一方、60G場では、深いところでほぼ直線的に変化している。

## 謝辞

本実験を実施するにあたり、京都大学大学院の松浦勇気氏に多大なる協力を頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 横山 幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，1977.11
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，IV 下部構造編，1997
- 3) 神田 政幸，竹村 次朗，日下部 治：遠心模型実

験による砂地盤中の単杭の p-y 関係の測定，土木学会論文集，No.631/Ⅲ-48，355-369，1999.9

- 4) 福井 次郎，木村 嘉富，大越 盛幸，阪野 彰：砂地盤中の単杭の復元力特性に関する水平載荷試験，土木研究所資料，第3552号，1998.3
- 5) 幸左 賢二，鈴木 直人，木村 亮，木村 嘉富，森田 悠紀夫：終局状態に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験，土木学会論文集，N0.596，Ⅲ-43，pp.249-260，1998
- 6) 社会法人地盤工学会：地盤工学ハンドブック，3.4.3 杭の水平抵抗，pp.811-823，1999
- 7) (社)日本道路協会：道路示方書・同解説IV下部構造編，1996
- 8) 森 伸一郎，込山 貴士：杭の水平地盤反力の推定に関する検討，土木学会第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp505-508，1999.7
- 9) 森 伸一郎，込山 貴士：杭の水平地盤反力の推定方法に関する検討，構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム，pp213-216，2000.3
- 10) 森 伸一郎，込山 貴士：杭の地盤反力-変位関係の推定と推定方法の検証，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ，CD-ROM，2000.9
- 11) 森 伸一郎，込山 貴士：遠心模型実験における杭の p-y 関係の推定，地盤工学会四国支部技術研究発表会，2000.9