

杭の水平地盤反力の推定方法に関する検討

森 伸一郎¹・込山 貴士²

¹正会員 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)

²学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

It is required to clarify the effect of lateral subgrade reaction on pile in order to solve various problems associated with strange behavior of pile during an earthquake. In this study, static lateral loading tests on single pile model in dry fine sand were carried out. Bending strains was measured and with the help of results thus obtained lateral subgrade reaction and displacement of pile was estimated. The results showed that the characteristic of lateral subgrade reaction is nonlinear. Displacement of pile and earth pressure on pile was directly measured. Furthermore, estimation of lateral subgrade reaction on pile and corresponding measured value of earth pressure showed that the proposed method of estimation is appropriated.

Key Words : sand, estimation, subgrade reaction, pile, non linear

1. はじめに

杭の耐震設計には、上部構造物の慣性力による杭頭水平力と地盤振動による杭周辺地盤の強制的な変形という2種の地震荷重を考慮する必要がある。特に、地盤変形を荷重として考えた場合、様々な深さにおける水平地盤反力の非線形特性を解明する必要がある。深さの違いによる水平地盤反力特性に関する研究は、過去に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。これを明らかにしようとする研究では、直接土圧を計測するものもある¹⁾が、測定の簡便さから、ひずみ測定による弾性梁の多項式近似による推定という方法がとられている²⁾。これらの事を踏まえ、本研究では、砂地盤中の単杭における水平地盤反力-変位関係(p-y 関係)を明らかにすることを目的とし、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う。これまで、水平地盤反力の推定を行い、多項式の次数を検討した³⁾。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⁴⁾。そこで本研究では、杭の土圧を直接測定することによる推定された水平地盤反力の推定精度を検討した。また、ひずみ計の補正の影響について検討した。

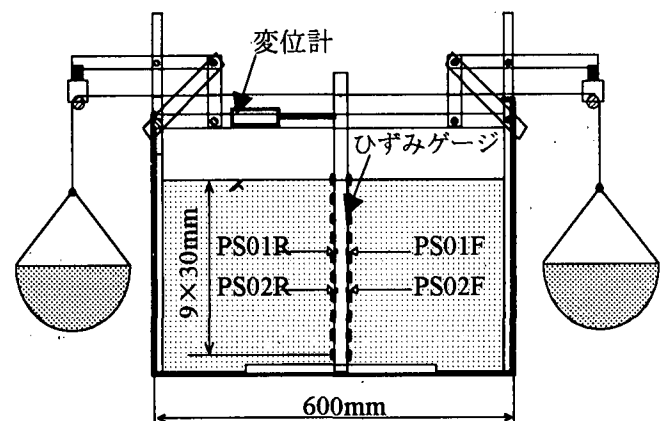


図-1 砂地盤中の荷重実験に用いた実験装置

2. 実験装置

実施した模型実験は、乾燥砂地盤中に設置した先端固定、頭部自由の単杭の杭頭部に対し、水平力を静的に繰り返し荷重するものである。図-1に実験装置を示す。実験に用いた土槽のサイズは、長さ60cm、幅30cm、高さ40cmである。模型地盤には、表乾状態の豊浦砂を用いた。表-1に実験で用いた砂の物理特性を示す。空中落下法によりDr=70%程度の深さ30cmの模型地盤を作成した。模型杭には、外径

表-1 実験に用いた砂の物理特性

土粒子密度	G_s	2.632	
粒度分布	最大粒径	$D_{max}(mm)$	0.42
	60%粒径	$D_{60}(mm)$	0.18
	30%粒径	$D_{30}(mm)$	0.13
	10%粒径	$D_{10}(mm)$	0.11
	50%粒径	$D_{50}(mm)$	0.17
最大間隙比	e_{max}	0.956	
最小間隙比	e_{min}	0.604	

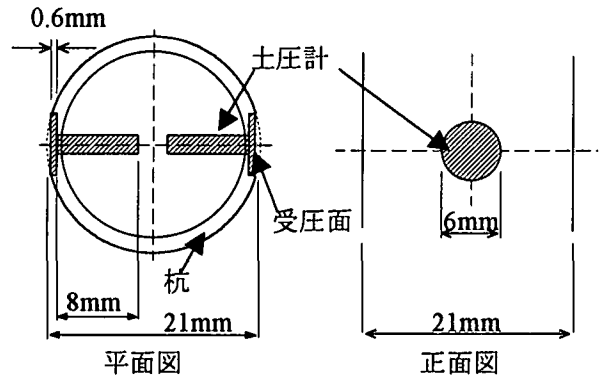


図-2 土圧計を埋め込んだ杭断面

2.1cm, 内径 1.81cm, 長さ 50cm(埋設長さ 30cm), ヤング係数 $E=3.22 \times 10^4 \text{ kPa}$ の中空アクリルパイプを用いた。杭は, 先端固定, 頭部自由条件とした。測定したのは杭の曲げひずみ, 杭頭変位, 杭周面土圧である。杭の荷重方向の前後面に 1 対 2 枚のひずみゲージを地表面から 3cm 間隔で 10 断面に貼付して, 2 ゲージ法により曲げひずみを測定した。杭頭荷重点は地表面高さ 13cm 高さとし, 変位計による杭変位測定点は地表面高さ 10cm とした。杭に土圧計を埋め込んだ。土圧計のサイズは, 直径 6mm, 厚さ 0.6mm であり容量は 50kPa である。深さ 11cm と深さ 17cm の 2 断面に, 杭の前後面に 1 対 2 個の土圧計を計 4 個埋め込んだ。埋め込み方法としては, 杭断面に段付き穴を開けて土圧計の受圧面が杭表面に一致するように埋め込んだ。図-2 に小型土圧計を埋め込んだ杭断面を示す。

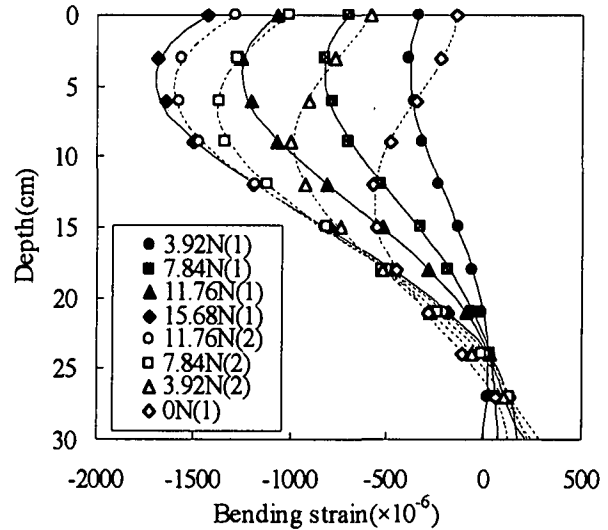


図-3 測定された曲げひずみと近似曲線

3. 実験方法

(1) 曲げひずみ計の補正

本実験に先立ち, 気中における静的な杭頭荷重を行い, 片持ち梁の理論値に一致するように各ひずみ計の補正を行った。荷重は $P=0.98, 1.96, 2.94, 3.92, 4.90 \text{ N}$ の 5 段階の単調荷重により, 各点の曲げひずみ計について測定値を横軸に, 理論値を縦軸にとり, 原点を通る直線回帰を行い, 回帰直線の傾きを補正係数とした。補正の結果, 測定値は, 理論値に比べて小さく測定されていることがわかった。

(2) 杭頭荷重の荷重方法

杭頭への水平力は, 土槽の両側の容器に入れた重りに作用する重力を滑車とたこ糸により水平力に変換して作用させた。荷重荷重は, 1.96, 3.92, 5.88, 7.84, 9.80, 11.76, 15.68N の 7 段階で 1 サイクルの繰り返し荷重とした。1 段階の荷重時間は 3 分とし, 曲げひずみの落ち着いている後半区間の 10 秒間の平均値を採用した。

(3) 水平地盤反力の推定方法

実験から得ら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。それを最小二乗法により 5 次多項式で近似する。弾性梁の基本方程式に基づき, 曲げモーメントを 2 回微分して水平地盤反力を, 2 回積分して杭の水平変位を推定する。2 回微分して求められるのは分布荷重なので, それを杭径で除して応力とする。積分の境界条件として, 杭先端の変位とたわみ角を 0 とした。

4. 実験結果

以下で示す実験結果の図は, 実線は荷重時, 波線は除荷時を指す。1 サイクルの繰り返し荷重を行ったが, 正側時についての図を示す。荷重荷重は, 一例として荷重時 $P=3.92, 7.84, 11.76, 15.68 \text{ N}$, 除荷時 $P=11.76, 7.84, 3.92, 0 \text{ N}$ を示す。図-3 に杭の曲げひずみ測定値と近似曲線を示す。この図から, 曲げひずみは荷重時には深さ 5cm で最大になるが, 除荷時には, 荷重時よりも深い所で大きな曲げひずみとなり, 深いほど曲げひずみの戻る割合が小さく, 結果として

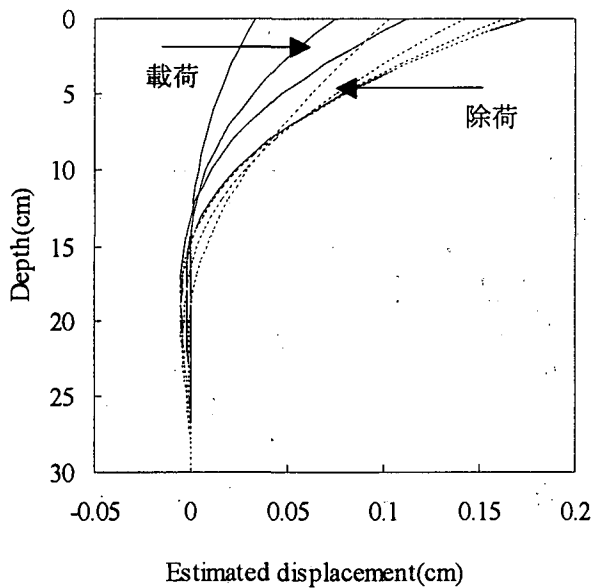


図-4 推定された杭の水平変位

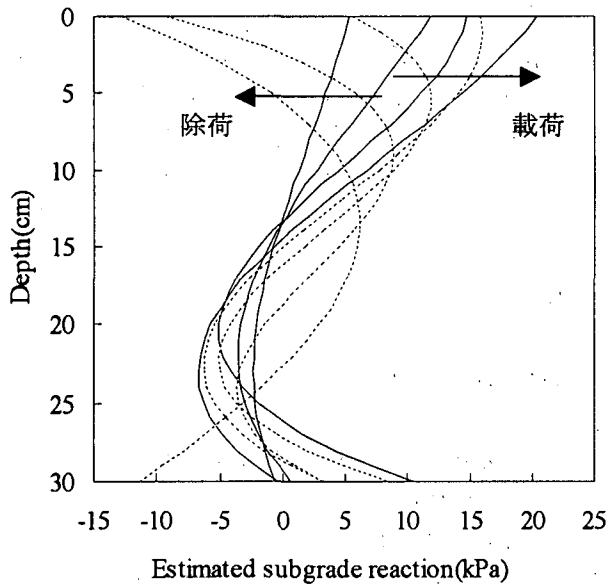


図-5 推定された水平地盤反力

分布の最大になる深さは徐々に深くなる。荷重が 0N のときには深さ 15cm で最大残留ひずみは 500μ を超える。図-4 に推定された杭の水平変位を示す。この図から、杭の変位状況を表せていると思われる。図-5 に推定された水平地盤反力を示す。この図から、地盤は荷重を浅い部分で受け持ち、深い部分では逆に杭を押していることがわかる。以降の図は、1 サイクル全体について示す。図-6 に地盤深さ 5~20cm 間の深さ方向 5cm 間隔における推定水平地盤反力~杭の水平変位を示す。この図から、水平地盤反力の非線形性が表れているのがわかる。

次に、土圧計による検証結果について示す。図-7 と図-8 に深さ 11cm と深さ 17cm における測定土圧と推定水平変位の履歴を示す。杭に作用する土圧は、

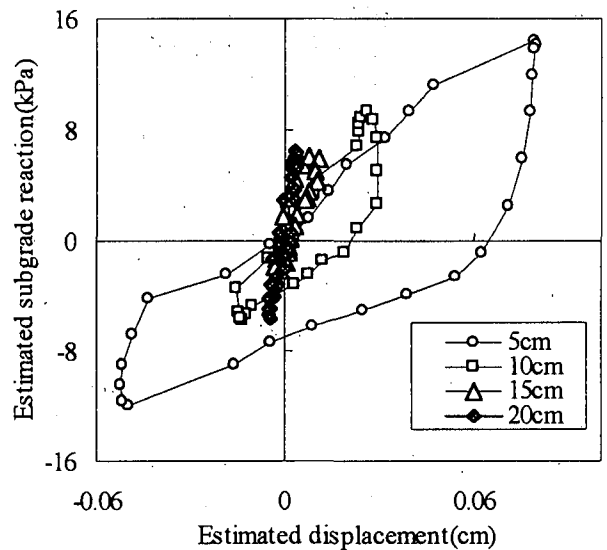


図-6 各深さにおける杭の水平地盤反力~水平変位

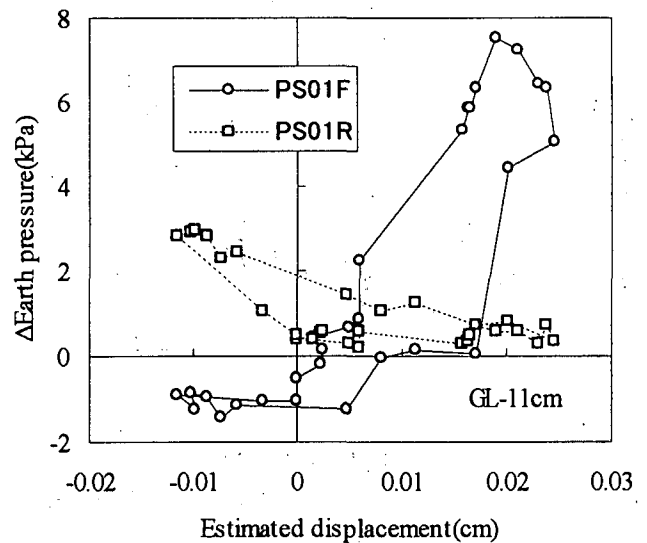


図-7 深さ 11cm の土圧計(PS01F, PS01R)測定値

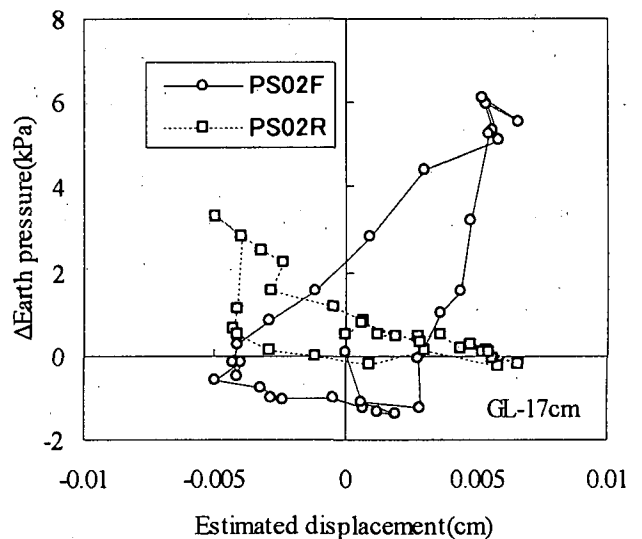


図-8 深さ 17cm の土圧計(PS02F, PS02R)測定値

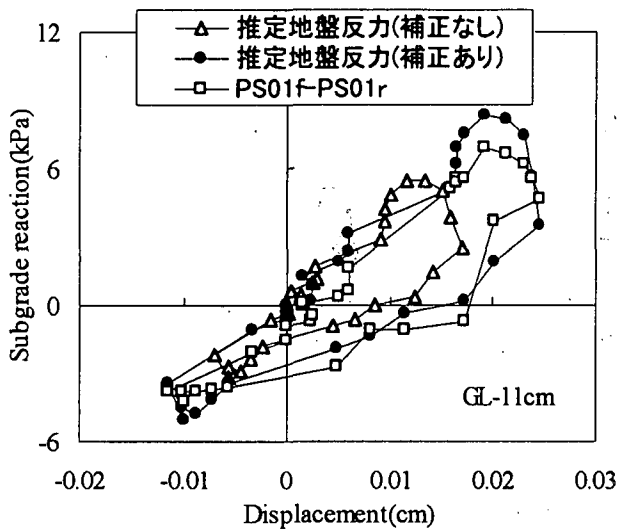


図-9 深さ 11cm の土圧値と推定された水平地盤反力(ひずみ計補正有り, なし)

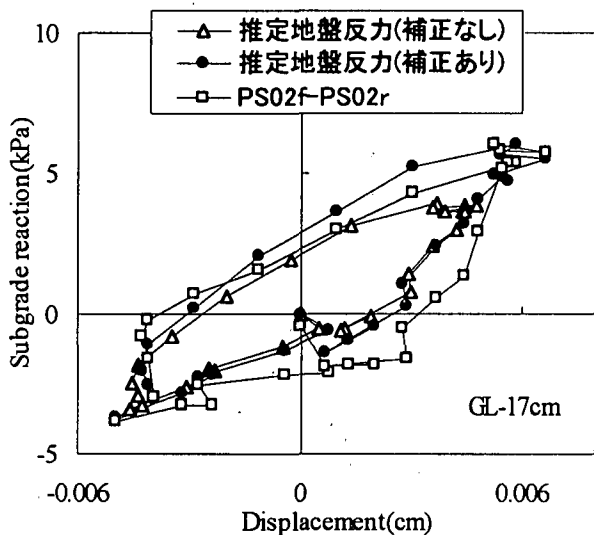


図-10 深さ 17cm の土圧値と推定された水平地盤反力(ひずみ計補正有り, なし)

初期拘束圧を受けているため図-7, 図-8 は载荷開始前を基準とした土圧増分を示す。これらの図から, 杭の変位に対する土圧の変化は前後面で対称ではないことがわかる。地中において杭は, 周辺地盤全体からの反力を受けている。杭全体に作用している地盤反力を求めるために正側(Front)と負側(Rear)の土圧計測定値の差をとった。図-9, 図-10 に両側の測定土圧値の差をとったものと推定水平地盤反力(ひずみ計補正有り, なし)を示す。この図から, 両側の測定土圧値の差をとったものと推定水平地盤反力とはほぼ一致していることがわかる。よって, 深さ 11, 17cm においては, この推定方法による水平地盤反力の推定は妥当であると考えられる。また, 実験の初期段階におけるひずみ計補正が推定結果に影響を及ぼすこともわかる。ひずみ計補正有無を比較すると, 補正をした方が土圧計測定値とより近く, 測定

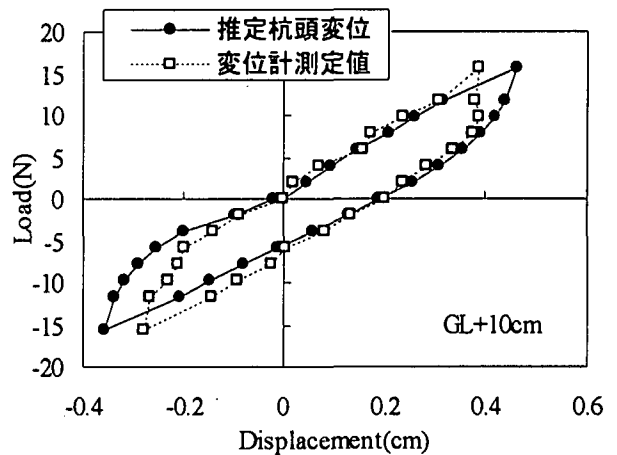


図-11 高さ 10cm の推定変位と変位計測定値

値に対して $\pm 10\sim 20\%$ の精度があると考えられる。また, 地上突出部における水平変位について推定精度を検討した。地表面まで推定した杭の水平変位とたわみ角を境界条件として, 弾性梁の微分方程式に基づき水平変位を算出した。図-11 に载荷荷重に対する地表面高さ 10cm における変位の関係について測定値と推定値を示す。この図から, 変位の推定についても妥当性が確かめられたと考えられる。

5. 結論

乾燥砂地盤中における単杭の静的な杭頭载荷実験を行い, 杭の曲げひずみから弾性梁の基本方程式に基づく水平地盤反力と変位の推定方法の精度について, 杭受圧と杭変位を土圧計と変位計を用いた直接測定との比較による検証を行った。

その結果, 推定精度の検証から水平地盤反力, 杭の水平変位ともによく推定され, 測定値の $\pm 10\sim 20\%$ 程度の精度であることがわかった。また推定結果には, ひずみ計補正が大きく影響することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 福井 二郎, 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载荷試験, 土木研究所資料第 3552 号, 1998. 3.
- 3) 森 伸一郎, 込山 貴士: 低拘束圧における乾燥砂地盤中の杭の水平地盤反力の推定, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, III, pp856-857, 1999.9
- 4) 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