

杭の水平地盤反力の推定に関する検討

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 理工学研究科土木海洋工学専攻(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

地震時には、構造物の杭基礎には上部構造物からの杭頭慣性力と杭周辺地盤の強制的変形という2種類の荷重が作用する。これら2種類の地震荷重に共通する杭の水平地盤抵抗のモデル化が望まれている。本研究では、地盤抵抗状態を表す水平地盤反力の推定を目的として、乾燥砂地盤中の単杭を対象とした杭頭水平載荷の模型実験を行い、用いた推定方法に関する検討を行った。その結果、限定された範囲においては妥当な方法であること、及び載荷荷重の増加に従い水平地盤反力の分担域が深くなること、水平地盤反力の非線形性が確認された。

Key Words : pile foundation, subgrade reaction, nonlinear, polynomial approximation

1. はじめに

杭の耐震設計においては、上部構造物の慣性力による杭頭水平力と振動による杭周辺地盤の強制的な変形という2種類の異なる地震荷重を考慮する必要がある。この2種類の地震荷重に対して、杭周辺地盤をばねでモデル化するには、広範囲の変位にわたるばねの非線形性を適切に評価することが重要と考えられる。特に地盤変形を荷重として考える場合、様々な深さにおける水平地盤反力特性を解明する必要がある。

そのような深さの違いによる水平地盤反力特性の非線形性に関する研究は、蓄積も少なく最近研究が盛んである^{1)~4)}。それらの研究では、直接土圧を計測するものもあるが、弾性梁の多項式近似による推定という方法がとられることが多い^{1)~3)}。

そこで、本研究では、乾燥砂地盤中の単杭を対象とした杭頭水平載荷の模型実験を行った。実験で測定された杭の曲げひずみを用いて、分布荷重の作用する弾性梁の基本方程式に基づく水平地盤反力の推定を行った。推定を3次、4次、5次の多項式近似で行い、近似次数の違いによる推定の差を比較検討した。そして、推定された水平地盤反力の特性について検討した。また、推定された杭の水平変位の精度を変位計測定値と比較検討した。

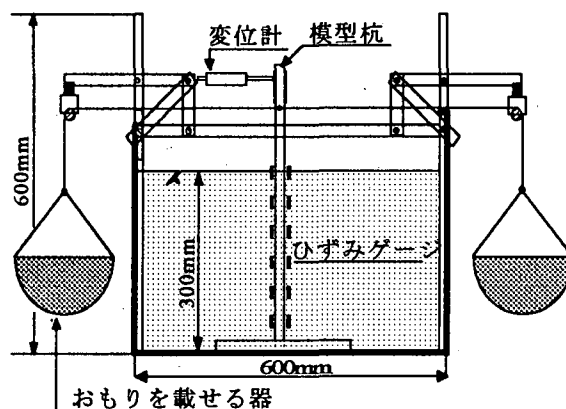


図-1 杭の載荷実験に用いる実験装置

表-1 実験に用いた砂の物理特性

土粒子の比重		G_s	2.632
粒度分布	最大粒径	$D_{max}(\text{mm})$	0.43
	60%粒径	$D_{60}(\text{mm})$	0.22
	30%粒径	$D_{30}(\text{mm})$	0.17
	10%粒径	$D_{10}(\text{mm})$	0.14
	50%粒径	$D_{50}(\text{mm})$	0.20
最大間隙比		e_{max}	0.932
最小間隙比		e_{min}	0.633

2. 実験方法

実施した模型実験は、乾燥砂地盤中に設置した先端固定、杭頭自由の単杭に対して、杭頭部に水平力を静的に載荷する実験である。図-1に実験装置を示す。実験に用いた模型土槽のサイズは、長さ 60cm、幅 30cm、高さ 40cm である。表面乾燥状態の豊浦標準砂を用い、空中落下法により深さ 30cm の模型地盤を作成した。表-1 に実験で用いた砂の物理特性を示す。模型杭は外径 2.1cm(内径 1.81cm)、長さ 50cm(埋設長 30cm)、ヤング係数 $E=3.22 \times 10^6 \text{ kPa}$ の中空アクリルパイプを用いた。杭の曲げひずみは、載荷方向の前後面にひずみゲージを地表面から 5cm 間隔で 6 点に貼付し、2 ゲージ法により測定した。

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鉛直力を滑車とたこ糸により水平力に変換して作用させた。質量を予め測定してある海砂をビニール袋に詰めたものを重りとした。交番の水平力載荷ができるが、ここでは単調載荷の場合を対象とする。載荷荷重は、0.49, 0.98, 1.96, 3.43, 5.40, 8.34, 12.26, 17.17, 21.58, 26.00, 34.92, 39.34, 43.85 N の 13 ステップである。載荷点は、地表面から 7cm 上であり、変位計による変位測定点は地表面から 13cm 高さである。

水平地盤反力の推定方法について述べる。まず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。それを多項式で最小二乗法により近似し、杭を分布荷重の作用している弾性梁とみなして、基本方程式に基づき曲げモーメントを 2 回微分して地盤反力を、2 回積分して杭の水平変位を求める。積分の境界条件として、杭先端固定条件から杭先端の変位とたわみ角を 0 とした。なお、6 点計測の場合、3 次または 4 次式では最小二乗近似であるが、5 次式では確定される。なお、2 回微分することから、議論の対象は、大きく見積もっても測定点の両端部を除く測定点の区間である。

3. 実験結果

実験結果の内、載荷荷重 $P=5.40 \text{ N}$ の場合に注目して示す。図-2 に杭の曲げひずみの測定値と近似曲線を示す。この図から、いずれも 25cm までは良く近似できているように見える。5 次は近似ではなく確定されるので、測定点上を厳密に通る。4 次、3 次と次数が下がるに従い測定点とのずれが大きくなるのがわかる。図-3 に推定された杭変位を示す。この図から、次数があがると変位は大きく推定されているのがわかる。図-4 に推定された地盤反力を示す。この図から、深さ 5~20cm の区間において傾向と大きさに次数による差が

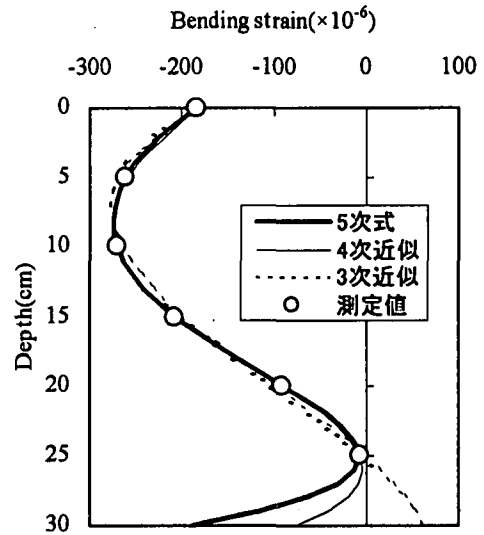


図-2 曲げひずみ分布と近似曲線
($P=5.40 \text{ N}$)

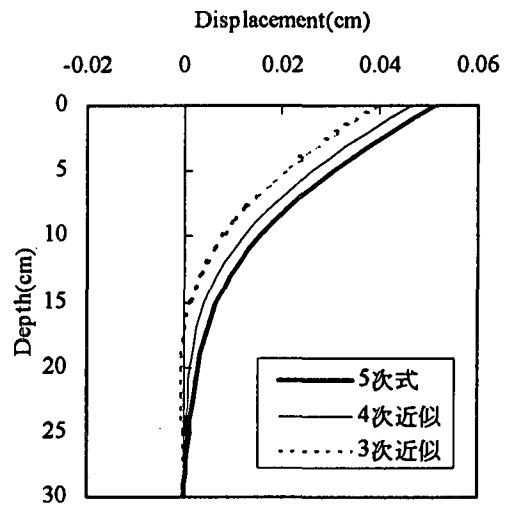


図-3 推定された杭の水平変位分布
($P=5.40 \text{ N}$)

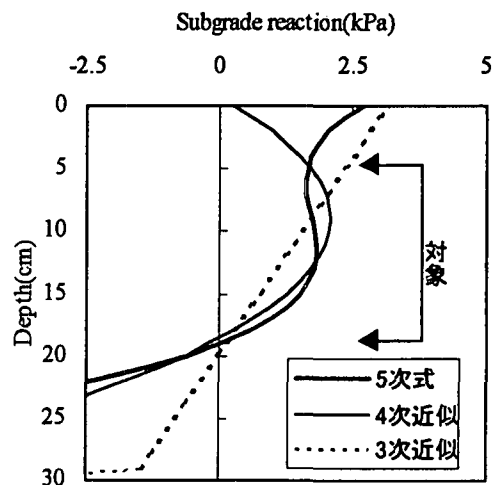


図-4 推定された地盤反力分布
($P=5.40 \text{ N}$)

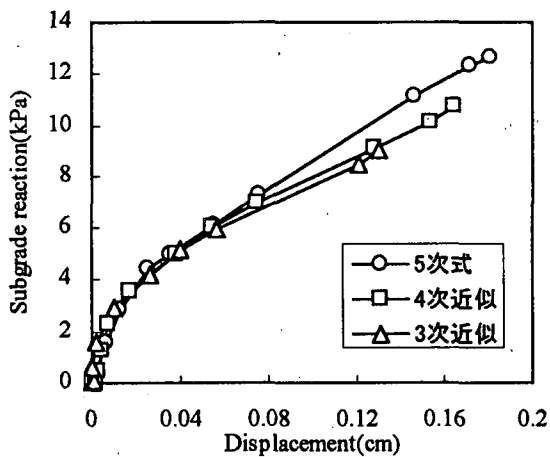


図-5 深さ 15cm の推定杭変位～地盤反力関係
($P=5.40\text{N}$)

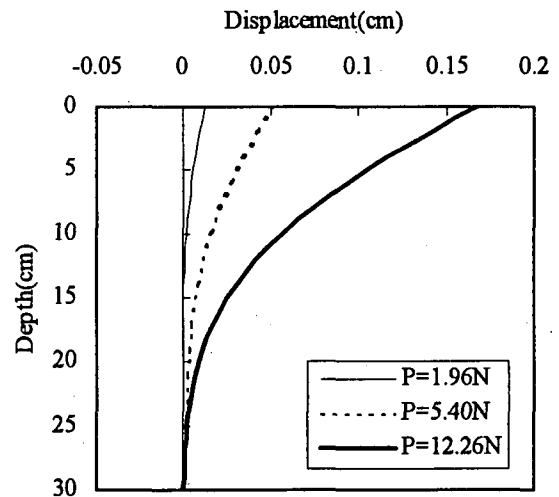


図-7 推定された杭の水平変位分布

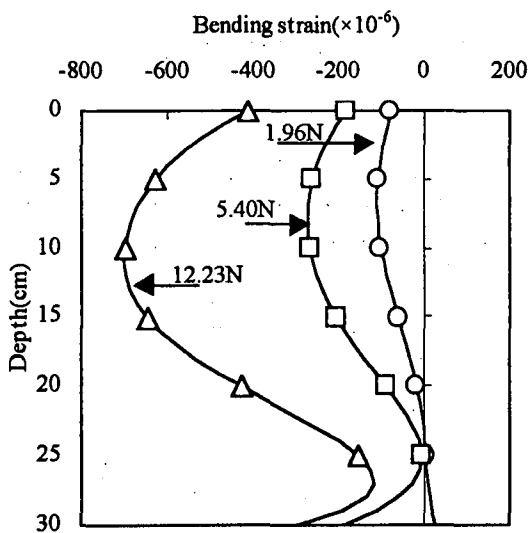


図-6 曲げひずみ分布と近似曲線

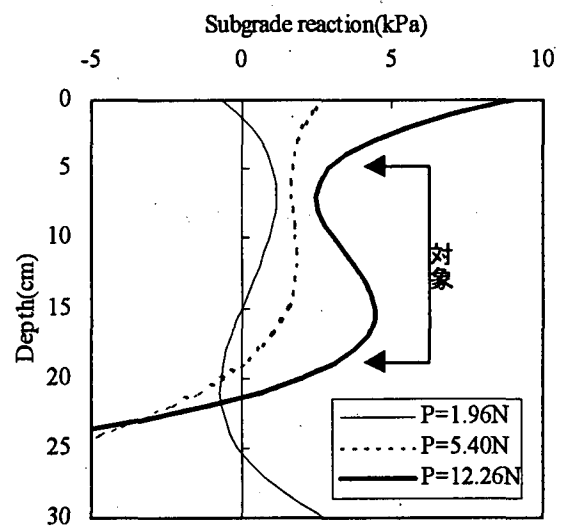


図-8 推定された地盤反力分布

認められるものの概略の傾向は同じである。

なお、5cm より浅い部分と 20cm より深い部分については、変位と地盤反力の関係が不合理な形状となっている。これらの区間はひずみ測定の間端部区間で、2 回微分した結果は測定値による拘束が極めて弱い信頼性がない。よって、推定の適用範囲として深さ 5cm ～20cm を採用する。図-5 に深さ 15cm の地盤反力 - 水平変位の関係を示す。この図から、推定の適用範囲では、次数による差が小さいことがわかる。

しかし、図-4 の地盤反力分布において 3 次、4 次、5 次式を比較すると、5 次式が自由度の大きい分だけ地盤反力の変化を細かく追従していると思われる。

そこで、5 次式について载荷荷重 $P=1.96, 5.40, 12.26\text{N}$ の 3 段階に着目して示す。図-6 に杭の曲げひずみ分布と近似モーメント曲線を示す。この図から、载荷荷重

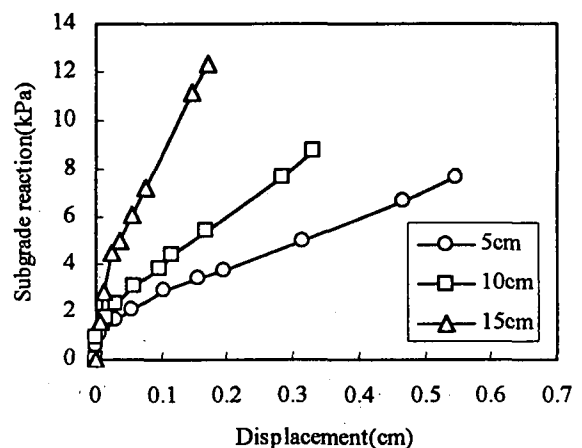


図-9 各深さにおける推定杭変位～地盤反力分布

が増加するにつれ曲げモーメントも増大しているのがわかる。また、最大曲げモーメント発生深さが載荷荷重の増加とともに下に下がっているのがわかる。図-7に推定された杭の水平変位を示す。この図から、載荷荷重の増加につれ杭の変位も増大するとともに深部に及ぶのがわかる。図-8に推定された地盤反力を示す。この図から、推定の適用範囲である深さ 5cm~20cm においては、変位が大きくなるにつれて地盤反力も増大し、その反力の重心は深部に移動していくのがわかる。図-9に地盤深さ 5cm~20cm 間の深さ方向 5cm 間隔における地盤反力-水平変位の関係を示す。この図から、深くなるほど地盤反力は大きくなる傾向にあること、また、地盤反力は小さい水平変位から非線形性が現れるが実験の範囲内では上限値は現れないことがわかる。また、地表面まで推定した杭の変位とたわみ角を境界条件とし、集中荷重の作用する片持ち梁として、弾性梁の微分方程式に基づき地上部における杭の変位を算出した。以下に用いた基本算出式を示す。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M_x}{EI} \quad (1)$$

たわみ角 θ ，水平変位 y は，上式を積分して，

$$\theta = -\frac{1}{EI} \int M_x dx + C_1 \quad (2)$$

$$y = -\frac{1}{EI} \iint M_x dx dx + C_1 x + C_2 \quad (3)$$

算出値と実験時に地表面高さ 13cm で変位計により測定した測定値とを比較することにより，変位の推定精度を検討した。図-10 に杭の水平変位の変位計による測定値と推定値を示す。この図から，測定値と推定値がほぼ一致しているのがわかる。よって，この推定方法によって杭の水平変位はよく表されているとみなして良いと考えられる。

4. 結論

単杭の杭頭水平載荷実験を行い，杭の測定曲げひずみの多項式近似と分布荷重の作用する弾性梁の基本方程式に基づき水平地盤反力の推定を行った。その結果，この推定法の特徴を踏まえ推定の適用範囲内であれば，地盤反力を推定できること，近似次数が高次なほど地盤反力の変化を細かく追従できること，その非線形性が小さな杭変位から現れること，この推定方法によって杭の水平変位はよく推定されていることがわかった。

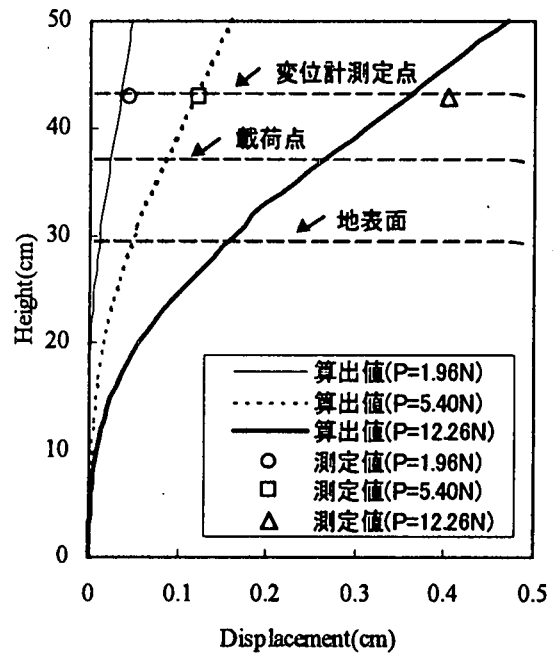


図-10 杭の水平変位の変位計測定値と推定値

今後は，曲げひずみの測定点を増やして近似次数を高くして地盤反力の推定精度を上げること，土圧測定による地盤反力の面からみた推定方法の精度の検証，地盤状態を不飽和，飽和，液状化状態などと変化させて実験を行い，地盤反力の非線形性の変化などを調べていく予定である。

参考文献

- 1) 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載荷試験, 土木研究所資料 第 3552 号, 1998.3.
- 2) 並河 努, 成川 匡文, 土方 勝一郎, 大島 豊, 西村 功, 内川 祐一郎, 柳下 文雄, 久保 賀也, 塩見 忠彦, 馬場崎 亮一: SR モデルによる杭基礎建築物の地震応答解析における液状化の考慮方法 (その 5 模型試験による液状化時の地盤反力係数の算定), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.363-364, 1998.9.
- 3) 杉本 三千雄, 吉澤 陸博, 田村 修次, 船原 英樹, 八幡 夏恵子: 大型せん断土槽を用いた液状化地盤における RC 杭基礎の振動台実験 (その 4 杭頭載荷試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.543-544, 1998.9.
- 4) 金縄 知樹, 神田 政幸, 岡村 未対, 竹村次朗, 桑野 二郎: 遠心模型による砂地盤中の単杭の水平載荷実験, 第 31 回地盤工学研究会発表会(北見), pp.1757-1758, 1997.