

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.02.006

竖向荷载作用下夯实水泥土楔形桩桩身 峰值应力变化规律研究

王 忍, 何 杰, 高建喜, 熊 猛

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲, 412007)

摘 要: 运用数值模拟与试验验证相结合的方法, 研究竖向荷载作用下夯实水泥土楔形桩桩身峰值应力变化的规律。研究表明, 当楔形桩楔角相同时, 桩身峰值应力所对应的深度基本为一个定值, 且与竖向荷载大小关系较小, 进而提出桩身峰值应力深度比的概念; 桩身峰值应力深度比与楔形桩楔角的关系, 在数值上可以近似用直线与抛物线分段拟合, 且拟合程度较高。

关键词: 楔形桩; 桩身峰值应力; 桩身峰值应力深度比; 竖向荷载

中图分类号: U473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)02-0033-05

Research on the Variable Regularity of Rammed Soil-Cement Tapered Piles Peak Stress Under Vertical Loading

WANG Ren, HE Jie, GAO Jianxi, XIONG Meng

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Based on numerical simulation and experimental verification, a research has been conducted on the variable regularity of rammed soil-cement tapered piles peak stress under vertical loading. Experimental results show that the depth corresponding to the pile peak stress is basically a fixed value, which has little to do with the vertical loading, for wedge piles with identical wedge angles. A concept of pile peak stress depth ratio has thus been proposed: the relationship between the depth ratio of pile peak stress and wedge angles can be approximately fitting with that between straight lines and parabolic sections with a high degree of fitting.

Keywords: tapered pile; pile peak stress; depth ratio of pile peak stress; vertical loading

0 引言

楔形桩具有单桩承载力大、节约材料、施工方便等特点。楔形桩可以通过楔角对应的倾斜外壁向桩周土施加更大的法向力, 从而更大程度地调动桩周土的

工作性能, 产生较大桩侧阻力, 是一种典型的摩擦型桩。文献 [1] 指出, 等径夯实水泥土桩桩身轴力沿深度逐渐衰减, 上部摩擦力发挥效果较好, 下部摩擦力发挥较差, 属于摩擦型桩。文献 [2] 指出, 楔形桩的荷载传递效率与楔角成正相关关系, 侧壁倾角越大,

收稿日期: 2016-11-10

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (16JJ5007), 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2015B571)

作者简介: 王 忍 (1991-), 男, 江苏海安人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为软土地基处理及桩土相互作用,

E-mail: cxsimon123@163.com

越能充分利用浅层桩周土。文献 [3] 提出了新型复合桩基模型分析方法并结合试验结果, 得到夯实水泥土楔形桩在黏性土中的合理楔角范围值为 $1.0\sim 3.5^\circ$ 。文献 [4] 采用等应变假定, 根据土体位移等于桩顶位移, 导出土分担的荷载与土沉降的关系。文献 [5] 提出了一种适用于小楔角的楔形桩承载力理论计算方法, 该方法计算结果与试验结果一致。文献 [6] 考虑桩土相互作用, 提出了计算桩体穿越成层土时沉降的新方法。

综上所述, 学者们对楔形桩已进行了一些研究, 但关于桩身峰值应力的变化与楔角的关系情况并未见阐述。本文采用数值模拟^[7]以及试验验证的方法, 研究竖向荷载作用下桩身峰值应力变化规律与楔角的关系, 以期能为工程实践中桩基的设计和 optimization 提供参考。

1 数值模拟试验

1.1 试验条件

为研究竖向荷载作用下夯实水泥土楔形桩桩身应力变化特性, 采用 ADINA 有限元分析软件作为数值模拟试验工具, 根据试验模型的对称性, 建立二维数值模型。桩土采用 9 节点矩形单元, 桩土接触面单独定义接触面单元, 以便于较好地模拟荷载作用下桩土间的相互作用。

1.2 试验方案

为保证实际施工过程中桩体材料成本相同, 数值模拟时控制桩长与桩体材料用量不变, 单变量为楔角。楔形桩桩长为 1.2 m, 通过上下桩径的变化来改变楔角的大小; 荷载为垂直竖向均布荷载, 直接加载于桩顶。破坏条件采用 Mohr-Coulomb 剪切滑动破坏准则。加载过程分 4 个步时进行, 每个步时对应 10 kPa。试验模型几何尺寸及物理参数如表 1 所示。

表 1 桩的几何尺寸及物理参数

Table 1 Geometric and physical parameters of piles

编号	参 数					
	桩顶半径 / m	桩底半径 / m	桩长 / m	楔角 / ($^\circ$)	弹性模量 / GPa	泊松比
算例 1	0.040	0.040	1.200	0	30	0.3
算例 2	0.050	0.030	1.200	0.955	30	0.3
A	0.055	0.025	1.200	1.433	30	0.3
B	0.060	0.020	1.200	1.909	30	0.3
C	0.065	0.015	1.200	2.386	30	0.3
D	0.070	0.010	1.200	2.862	30	0.3
E	0.075	0.005	1.200	3.338	30	0.3

注: 桩 A, B, C, D 为试验桩, 用于发现规律; 桩 E 为验证桩, 用于检验规律是否科学; 算例 1、算例 2 为规律的特殊情形, 用于规律补充。

试验模型中土的物理力学参数如表 2 所示。

表 2 土的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical properties of the soil

重度 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角 / ($^\circ$)	黏聚力 / kPa	压缩模量 / MPa	泊松比
18	8.0	9.4	4	0.3

2 数值模拟试验结果及分析

2.1 桩身应力变化规律

试验过程中, 控制桩顶应力相同, 对桩顶施加竖向均布荷载, 大小分别为 10, 20, 30, 40 kPa。后处理过程中, 自上而下定义桩身单元, 提取桩身应力并处理得到 4 组桩身应力图, 如图 1 所示。

由图 1 可以看出:

1) 竖向荷载作用下, 楔形桩桩身应力均呈现先增大后减小的趋势。

2) 不同荷载条件下, 对于相同楔角的楔形桩, 桩身峰值应力出现的深度近似相同。

3) 相同荷载条件下, 对于楔角不同的楔形桩, 桩身峰值应力出现的深度不同, 且楔角越大深度越深。

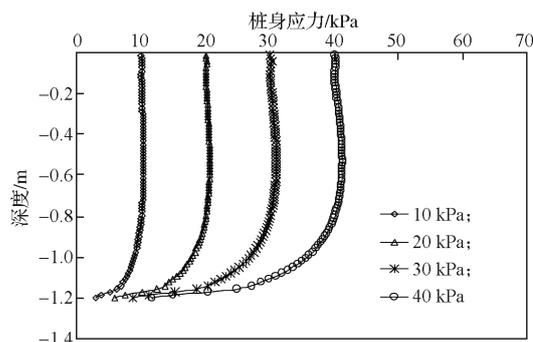
4) 不同荷载条件下, 对于相同楔角的楔形桩, 桩身峰值应力与桩顶应力的比值近似为定值。

5) 相同荷载条件下, 对于楔角不同的楔形桩, 桩身峰值应力与桩顶应力的比值不等, 且楔角越大比值越大。

以上现象表明:

1) 在土质条件一定的情况下, 楔形桩桩身峰值应力出现的深度与楔角关系显著, 与上部荷载关系较小。

2) 如果桩体材料抗压强度一致, 则桩身峰值应力出现的位置为易坏区。在进行楔形桩桩基设计时, 可根据设计要求进行局部或整体优化。



a) $\theta=1.433^\circ$

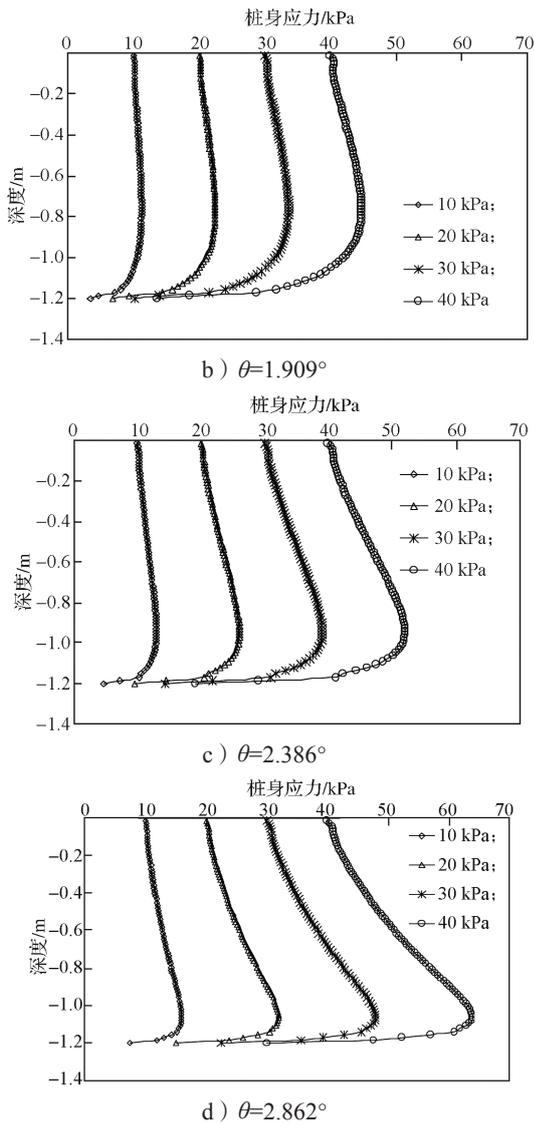


图1 桩身应力图

Fig. 1 Pile stress diagrams

2.2 桩身峰值应力变化规律

为使楔角的变化范围更大, 补充算例1和算例2。定义桩身峰值应力深度与桩底深度的比值为桩身峰值应力深度比, 用字母 v 表示。根据试验数据, 可以计算出各楔角所对应的桩身峰值应力深度比, 计算结果如表3所示。

表3 桩身峰值应力深度比

Table 3 Depth ratio of pile peak stress

编号	参 数			
	楔角 $\theta / (^\circ)$	桩底深度 / m	峰值应力深度 / m	峰值应力深度比 v
算例1	0	-1.200	-0.015	0.0125
算例2	0.955	-1.200	-0.045	0.0375
A	1.433	-1.200	-0.540	0.4500
B	1.909	-1.200	-0.765	0.6375
C	2.386	-1.200	-0.945	0.7875
D	2.862	-1.200	-1.065	0.8875
E	3.338	-1.200	-1.140	0.9500

分析表3中数据可知, A, B, C, D 4种桩型, 楔角与桩身峰值应力深度比近似呈现抛物线型。由于3点可以确定1条抛物线, 如果采用3点进行二次多项式拟合, R^2 必然始终等于1。本文采用二次多项式拟合时, 数据点数为4, 比多项式次数多2。对A, B, C, D 4种桩型的楔角与桩身应力峰值深度比进行二项式拟合, 得

$$v = -0.0903\theta^2 + 0.6995\theta - 0.38$$

由于 $R^2 = 0.99$ 接近于1, 这说明二次多项式拟合程度较高。

为验证拟合函数的科学性, 增加验证桩型E, 桩型E的相关参数见表1。将 $\theta = 3.338$ 代入拟合函数, 计算得到 $v = 0.9490$ 。由表3的数据可知, 桩型E的桩身峰值应力比为0.9500。两者误差为0.1%, 结果相当吻合, 这说明拟合函数具有较高可信度。

经计算, 拟合函数极大值为0.9747, 对应楔角 θ 约为 3.873° 。这说明桩身峰值应力出现的位置位于桩内, 这是因为楔形桩为典型摩擦型桩, 由于桩侧阻力作用, 轴力与桩截面面积均随深度增大而减小, 但是两者减小的速度并不一致。

考虑在实际工程中, 当 $\theta = 0$ 即为等截面桩时, 桩身峰值应力比大于或等于0, 而拟合函数中, 当 $\theta = 0$ 时 $v = -0.3800$ 小于0, 不符合实际, 故需要修正。修正过程通过增加算例1与算例2实现。两个算例的取值参数见表1, 后处理结果见表3。修正后的楔角-峰值应力深度比关系如图2所示。

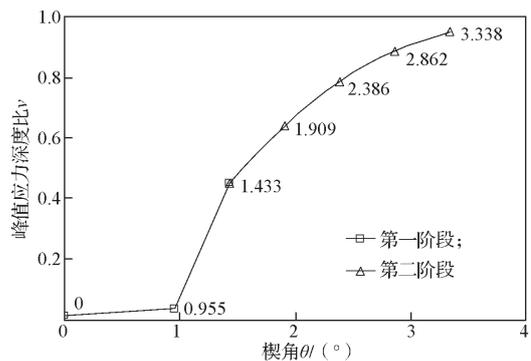


图2 楔角-峰值应力深度比关系图

Fig. 2 Wedge angle-depth ratio of the pile peak

由图2可以看出:

1) 图中第一阶段为折线段, 变化过程可视作两次线性变化的组合; 第二阶段为抛物线线段。

2) 第一阶段说明, θ 在 $0 \sim 0.955^\circ$ 和 $0.955 \sim 1.433^\circ$ 小楔角范围内, 峰值应力深度比与楔角近似成线性变化, 可以按照线性内插法求得。

3) 第二阶段说明, 在 1.433° 到极值对应的楔角内, 峰值应力深度比可以按拟合抛物线函数求得, 且

误差较小。

3 比例模型试验

3.1 试验方案

为验证数值模拟所得结论的科学性,研究竖向荷载作用下楔形桩桩身峰值应力变化特性,选择一种桩型在其桩顶施加4组不同荷载,观察其桩身应变情况。

模型试验在2.0 m×2.0 m×2.5 m的模型箱中进行。模型箱中分层填筑含水率为25%的黏性土,土的具体物理力学参数见表4。

表4 土的物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical properties of the soil

水的质量分数/%	重度/(N·m ⁻³)	塑限指数/%	液限指数
25	19.1	30.5	0.46
黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	
13.3	5.7	4.6	

模型箱填筑完毕后,静置养护1周。通过反力架将制作好的木质桩模垂直静压成孔,在桩底埋置小土压力盒,然后将贴好应变片的管径为16 mm的PVC管竖直放入,并对准成孔中心。根据95%的夯实度计算好水泥土配比及用量,分层填入并夯实。桩体施工完毕后,覆盖地膜并定期洒水养护。桩的物理力学参数见表5。

表5 桩的物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical properties of piles

桩顶半径/m	桩底半径/m	桩长/m	楔角/(°)	弹缩模量/MPa
0.075	0.050	1.2	1.2	80.4

桩身应变片型号为BX120-0.5AA,应变采集装置为DH3815静态电阻应变仪。桩身应变片布置如图3所示。

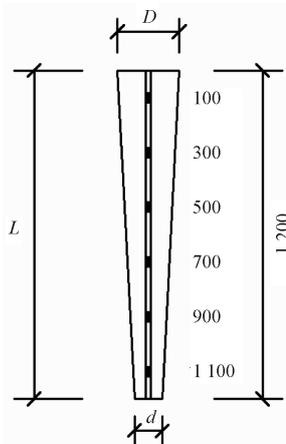


图3 桩身应变片布置图

Fig. 3 Pile strain gauge layout

对桩体标准养护28 d后,在桩顶设置厚度为20 cm的碎石垫层。通过对垫层上部荷载板施加竖向荷载,

从而对楔形桩进行静压。施加在荷载板上的荷载大小分别为3, 4, 5, 6 kN,加载完毕后静置10 min,待沉降稳定采集桩身应变。

3.2 桩身应力分析

根据计算机应力-应变采集系统采集的桩身应变,处理可得桩身应变随深度的变化关系,如图4所示。

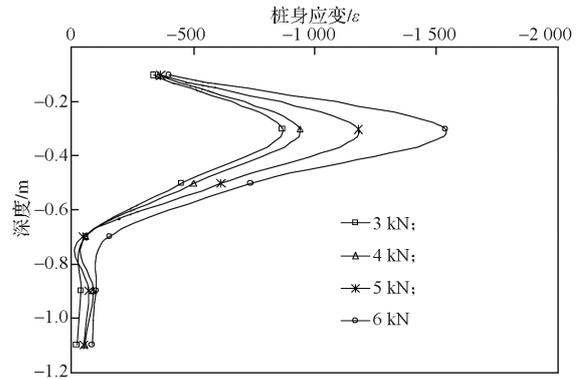


图4 桩身应变图

Fig. 4 Pile strain diagram

由图4可知,在不同荷载作用下,对于同一楔形桩,峰值桩身应变出现的深度近似相同,在深度约-0.300 m处。

桩身应力σ与桩身应变ε存在式(1)的关系,

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \tag{1}$$

式中E为桩身弹性模量。

由式(1)可知,桩身应变乘以桩身弹性模量等于桩身应力,即应力与应变两者呈线性关系。因此,峰值桩身应力深度与峰值桩身应变深度一致,桩身峰值应力深度比为: -0.30 ÷ (-1.200) = 0.250 0。

根据2.2节中的分析,当桩身楔角θ为1.200°属于第一阶段的情形。结合图2和表3,按照线性内插法计算桩身峰值应力深度比:

$$0.037\ 5 + (1.200 - 0.955) \div \frac{1.435 - 0.955}{0.450\ 0 - 0.037\ 5} = 0.248\ 0。$$

对于桩身峰值应力深度比,试验真值为0.250 0与计算值0.248 0,两数相对误差为0.8%,这说明数值模拟实验结论较为可靠。

桩身峰值应力大于桩身材料极限抗压强度时,桩体就会破坏,所以往往桩身峰值应力出现的部位需要特别注意,可以通过加大截面面积,或者提高材料强度的方法来进行局部加强。

4 结论与建议

根据上述数值模拟试验以及数据分析,可得以下

结论与建议:

1) 对于典型的楔形摩擦型桩, 在竖向荷载作用下, 桩身应力随深度的增大, 呈先增大后减小的趋势; 对于同一楔角, 桩身峰值应力所对应的深度基本为一个定值, 且与竖向荷载大小关系较小。

2) 楔形桩桩身应力峰值深度比变化规律, 可以简化为两个阶段。第一阶段为两次线性变化的组合型, 第二阶段为抛物线型。对于第一阶段, 峰值应力深度比与楔角近似成线性变化, 可以按照线性内插法求得。对于第二阶段, 峰值应力深度比可以按拟合抛物线方程求得, 具体拟合方程与工况对应的土质条件有关。本文所提拟合方程仅供参考。

3) 在楔形桩设计过程中, 要特别注意桩身峰值应力出现的位置, 并根据峰值应力与桩顶荷载的关系进行桩身材料配比选择。峰值应力与桩顶荷载的关系有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 郭忠贤, 杨志红, 王占雷. 夯实水泥土桩荷载传递规律的试验研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2020-2024.
GUO Zhongxian, YANG Zhihong, WANG Zhanlei. Experimental Study of Load Transfer Behavior of Rammed Soil-Cement Piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2020-2024.
- [2] 何 杰, 刘 杰, 张可能, 等. 夯实水泥土楔形桩复

合地基承载特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1506-1512.

HE Jie, LIU Jie, ZHANG Keneng, et al. Experimental Study of Bearing Behaviour of Composite Foundation with Rammed Soil-Cement Tapered Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1506-1512.

- [3] 刘 杰, 何 杰, 闵长青. 夯实水泥土楔形桩复合地基中桩的合理楔角范围研究 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 122-127.
LIU Jie, HE Jie, MIN Changqing. Study of the Rational Wedge Angle Range in a Composite Foundation with Rammed Soil-Cement Tapered Piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 122-127.
- [4] CANETTA G, NOVA R. A Numerical Method for the Analysis of Ground Improved by Columnar Inclusions[J]. Computers Geotech, 1989, 7(1/2): 99-114.
- [5] KODIKARA J K, MOORE I D. Axial Response of Tapered Piles in Cohesive Frictional Ground[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(4): 675-693.
- [6] MYLONAKIS G, GAZETAS C. Settlement and Additional Internal Forces of Grouped Piles in Layered Soil[J]. Geotechnique, 1998, 48(1): 55-72.
- [7] 王勛成, 邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 102-122.
WANG Xucheng, SHAO Min. The Basic Theory and Numerical Methods of FEM[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 102-122.

(责任编辑: 邓光辉)