

DOI: 10.11779/CJGE2019S2019

# 竖向荷载下膨胀土桩基承载室内模型试验

张明远<sup>1, 2</sup>, 王成<sup>1, 2</sup>, 钱建固<sup>\*1, 2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 利用自主研发的多向桩基加载系统, 开展了室内模型试验, 研究了膨胀土中桩基分别在最优含水率和饱和含水率条件下的下压和上拔荷载桩基的承载特性。试验结果表明: 膨胀土含水率的变化, 对抗压桩的极限承载力影响更为明显, 对抗拔桩的极限位移影响更为明显。随着含水率的增加, 尽管抗压桩和上拔桩的极限侧摩阻力均减小, 且减小程度接近, 但上拔荷载作用下极限侧摩阻力明显低于下压荷载的极限侧摩阻力。不同含水率条件下, 抗压试验桩身极限侧摩阻力呈抛物线形分布, 而上拔试验桩身极限侧摩阻力呈线性分布, 含水率的增加使抗压桩和上拔桩的极限承载力显著减小, 且抗压桩减小幅度更大, 但抗压桩的极限承载力始终大于上拔桩的极限承载力。

**关键词:** 膨胀土; 桩基; 承载力; 模型试验

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0073-04

作者简介: 张明远(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事膨胀土室内及原位试验研究工作。E-mail: 1630626@tongji.edu.cn。

## Model tests on bearing characteristics of pile foundation in expansive soil foundation under vertical loadings

ZHANG Ming-yuan<sup>1, 2</sup>, WANG Cheng<sup>1, 2</sup>, QIAN Jian-gu<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the self-developed multi-directional load system for piles a series of model tests are carried out to study the behaviors of compressive and uplift loaded piles in expansive soils with two states of optimal water content and full saturation. The test results show that the change of water content of expansive soils has more significant influences on the behaviors of compression piles than those of tension piles, but more considerable on the deformation of tension piles. The ultimate bearing capacity of compression piles are always greater than that of tension piles. With the increase of water content, the ultimate skin frictions of compression piles and tension piles both decrease, but the ultimate skin friction under uplift load is obviously smaller than that under downward compressive load. Under different water contents, the ultimate skin friction of compressive piles is parabolically distributed, while that of uplift piles is linearly distributed. This is due to the fact that the displacement of the top of the tension piles is larger than that of the compression piles when the pressure piles and the uplift piles reach the ultimate bearing capacity, which makes the deep side friction of the tension piles play more fully. With the increase of water content, the ultimate bearing capacities of compression piles and tension piles decrease significantly, and the decrease of compression piles are even greater, but the ultimate bearing capacity of compression piles are always larger than that of tension piles.

**Key words:** expansive soil; pile foundation; bearing capacity; model test

## 0 引言

膨胀土中含有大量的强亲水性黏土矿物, 具有吸水量大、高塑性以及剧烈的膨胀性与收缩性等工程特性<sup>[1]</sup>, 其吸水膨胀、失水收缩的特性导致在其上修筑的输电线路基础安全性存在一定的隐患。膨胀土层含水率上升会带来两个方面的影响, 一方面, 含水率上升会使得地基土体强度降低; 另一方面, 膨胀土体在含水率上升时会发生体积膨胀, 从而使得基础等地下

结构物产生较大的次生内应力以及使得结构物产生变形。桩基是有效应对膨胀土问题的基础形式之一<sup>[2]</sup>, 然而, 相比较传统的桩基, 膨胀土桩基行为将复杂的多, 特别是抗拔桩, 土的膨胀性还有可能诱发桩侧的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877252); 国家电网有限公司总部科技项目(5217L0160001); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2019-04-30

\*通讯作者 (E-mail: qianjiangu@tongji.edu.cn)

胀拔力。显然,非饱和膨胀土桩基的承载特性不同于传统的桩基。

从试验角度来看,无疑现场静载试验是探讨膨胀土桩基承载特性最可靠的方法,然而现场试验具有耗时耗力、价格昂贵、边界条件难以控制等诸多方面的困难,而这些试验条件在室内容易控制,因此室内模型试验也不失为一种其有效研究手段之一。然而,有关膨胀土中桩基承载特性的模型试验报道并不多见,尤其是抗拔承载性能上。

必须指出的是,桩侧摩阻性能是影响桩基荷载传递的决定性因素。其中,非饱和膨胀土的桩侧摩阻力主要受两方面控制,其一是含水率;通常含水率变化会降低膨胀土以及桩土界面强度<sup>[3-4]</sup>,与此同时,湿化还可能诱发桩周土的膨胀应力,一定程度上又提高桩侧摩阻性能,然而两方面机理共同下,仍缺乏对摩阻力演化规律的了解。其二,上拔和下压荷载作用,由于地基附加应力场不同,摩阻性能势必有着差异性,但这两种竖向荷载下摩阻力在定量甚至定性上差别有多大,目前缺乏试验观察。当然,一些学者选择采用有限元的方法来研究膨胀土中桩基力学特性<sup>[5-6]</sup>,但是,缺乏试验支撑的有限元计算分析,所得的研究结果仍需要室内试验以及现场数据加以验证。

必须指出的是,对于承受多向荷载的高耸结构(如输电杆塔),桩基在承受较大上拔荷载的同时,桩周土湿胀可能导致桩基抗拔性能严重劣化。因此,很多工况下膨胀土桩基础都是以抗拔承载为设计控制条件<sup>[7]</sup>。目前,现行的国内外相关工程技术标准及规范,缺乏膨胀土桩基设计的明确性指导意见,对膨胀土桩基承载机理的认识及理论分析方法严重滞后于工程实践。无疑,开展非饱和膨胀土桩基室内试验研究,加深其机理认识,进而完善现有的理论计算方法,是推进膨胀土桩基实践的基础性研究工作。本文拟开展室内模型试验,研究膨胀土土体含水率对膨胀土桩基在上拔与下压荷载作用下的承载特性影响,观测不同含水率及受荷条件下承载力、桩身轴力以及桩侧摩阻力的变化规律,揭示膨胀土浸水后承载特性的演化规律,为膨胀土桩基的理论分析与提供依据。

## 1 试验设备

### 1.1 试验装置

本试验采用同济大学和杭州邦威机电公司联合研发的试验装置,该试验装置包括加载系统和模型箱系统两部分。如图 1 所示。

加载系统为微机控制物理模型多维加载系统,可模拟竖向抗压和抗拔的专用加载系统,加载过程中可

同步绘制出  $Q-s$  曲线,方便观测曲线变化。模型箱系统包括模型箱、箱体运动导轨以及牵引电机。模型箱外侧为透明钢化玻璃,方便观测填土过程分层厚度和浸水情况。模型箱的尺寸设计为  $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 。

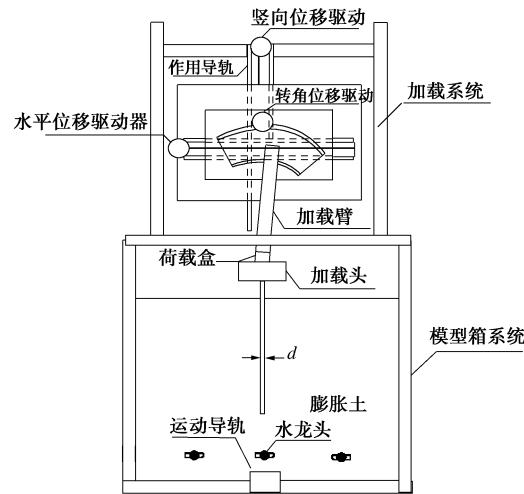


图 1 加载装置示意图

Fig. 1 Schematic of loading devices

### 1.2 模型桩

本次试验模型桩选用铝合金材料制作,弹性模量为  $70\text{ GPa}$ ,模型桩桩长  $540\text{ mm}$ ,桩径  $40\text{ mm}$ 。为模拟实际工程中桩土界面的粗糙程度,试验模型桩外表面采用黏贴一层细砂的方法处理。

### 1.3 地基土制备

试验用膨胀土样取自河南省内乡县,该地膨胀土层厚约  $12\text{ m}$ ,土样呈黄褐色,硬塑状,内部含铁锰质结核及钙质结核,自由膨胀率为  $59\%$ ,属于中等偏弱膨胀土,具体指标见表 1。

表 1 试验用土基本参数

Table 1 Basic parameters of soils

物理性质指标	数值
天然密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.07
液限/%	37.7
塑限/%	19.5
塑性指数 $I_p$	18.2
$G_s$	2.74
天然干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	1.69
自由膨胀率/%	59

试验采用重塑土制备地基,将土样晒干、粉碎再过筛,之后进行筛分试验,测得试验用土  $90\%$ 的颗粒粒径在  $0.1\text{ mm}$  以下。土体填筑是按照  $2.5\text{ cm}$  分层填筑、分层击实的方法,来模拟现场的原状土。下面以最优含水率  $17\%$ 为例介绍土体填筑具体步骤:

(1) 重塑土加水搅拌:根据目标干密度计算模型箱  $2.5\text{ cm}$  厚的体积需要的土颗粒质量和水的质量,称取对应质量的干土和水,将其搅拌充分均匀后填筑。

(2) 回填模型箱: 回填后击实土体, 保证土体干密度与原状土一致。饱和土体的制备是在完成上述步骤后, 将土样浸水, 并定期沿不同深度取样, 待底层土体含水率达到饱和含水率时, 认为土体完全饱和。

#### 1.4 量测方案

##### (1) 桩身应变量测

本次试验在桩内壁等距布置 5 对应变片以测量桩身应变。应变采集仪采用 YE2539 高速静态应变仪。应变片采用箔式常温应变片 BX120-5AA, 电阻  $120 \Omega$ 。

##### (2) 桩端土压力量测

本次试验土压力计选用应变式土压力计。土压力计埋设于基础底部下方 1 cm 处, 上覆细砂并压实。

##### (3) 桩顶位移和力的量测

桩顶荷载由轴力计量测, 桩顶上拔位移和下压位移由位移传感器量测, 二者均已固定在加载设备上。

## 2 试验过程

共进行 4 组试验, 分别为最优含水率 ( $w=17\%$ ) 下的抗压、抗拔试验和饱和含水率 ( $w=30\%$ ) 下的抗压、抗拔试验。每组试验过程类似。

首先重塑土回填压实、土体内部钻孔。钻孔完成后依次埋入土压力计和模型桩, 注意保证桩周土体回填密实。待连接所有传感器导线后, 先预加载并卸载, 保证加载装置和桩之间贴合密切, 之后将采集仪数据清零, 正式加载。

竖向加载采用慢速荷载维持的方式, 每级荷载为预估荷载的 1/10。待桩顶位移稳定后记录桩顶位移和桩身应变, 之后施加下一级荷载, 荷载施加至  $Q-s$  曲线出现陡降段结束试验。接近预估荷载时, 减小每级荷载施加量, 以保证准确测量出极限承载力。试验过程见图 2。

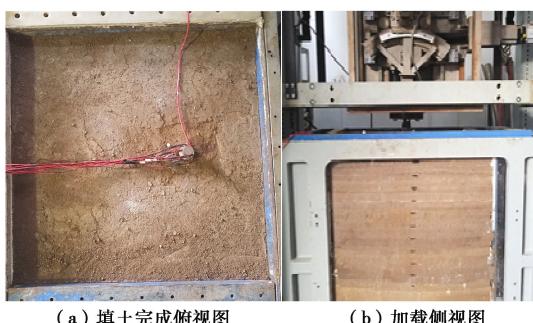


图 2 填土完成图

Fig. 2 View of filling completion

## 3 试验结果分析

### 3.1 桩顶荷载位移 $Q-s$ 曲线

根据桩顶轴力计和位移计数据, 整理得到  $Q-s$

曲线如图 3 所示。

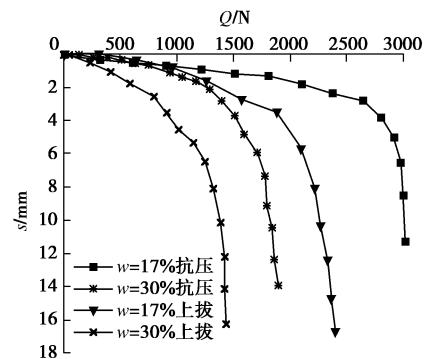


图 3 不同含水率条件下的荷载位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves under different water contents

由图 3 可以看出, 含水率的升高会明显的降低膨胀土中桩基极限抗压、抗拔承载力。对于抗压桩, 含水率较低情况下, 桩基荷载位移曲线拐点明显, 含水率较高情况下, 荷载位移曲线较平缓, 拐点不明显。

根据建筑桩基技术规范, 以  $Q-s$  曲线出现明显陡降的起始点对应的荷载作为极限荷载, 分析发现: 最优含水率增加到饱和含水率时, 桩基极限抗压承载力降低 41.3%, 而极限上拔承载力降低了 34%。这表明, 膨胀土含水率上升, 桩基抗压承载力的降低幅度要大于抗拔承载力。最优含水率条件下, 上拔承载力为下压承载力的 71%; 饱和含水率条件下, 该比值为 80%。因此, 随着含水率的提高, 桩基上拔承载力与下压承载力的比值有所提高。

### 3.2 桩身轴力

根据应变数据可以推算出不同深度处  $z$  的桩身轴力  $P$ , 图 4 反映了抗压桩和上拔桩在达到极限承载力状态时的桩身轴力分布情况。由图可以看出, 不管是抗压桩还是上拔桩, 浸水后的极限状态桩身轴力总会减小。深度较浅时, 减小幅度较大; 随着深度增加, 浸水对轴力影响减小。

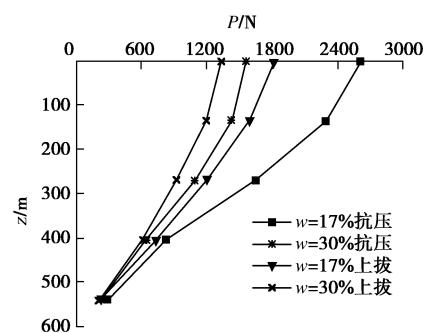


图 4 极限承载力状态下桩身轴力分布

Fig. 4 Distribution of axial forces of piles under ultimate bearing capacity

### 3.3 桩侧摩阻力

根据轴力沿桩身的分布情况推算出沿着桩身分布

的侧摩阻力  $q_s$  大小。图 5 显示的是极限承载力状态下的侧摩阻力分布情况。

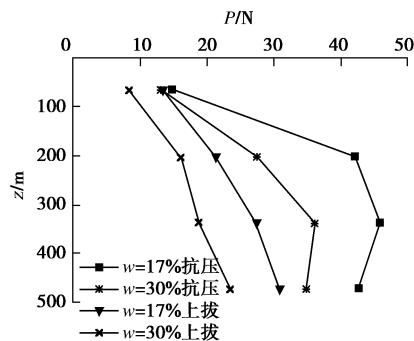


图 5 极限承载力状态桩侧摩阻力分布

Fig. 5 Distribution of lateral frictional resistances of piles under ultimate bearing capacity

不同含水率条件下, 达到极限承载力时抗压试验桩身侧摩阻力呈抛物线形分布, 而抗拔试验桩身侧摩阻力近似呈线性分布。这是由于随着深度的增加, 桩侧水平方向土压力增大, 桩土侧摩阻力随之增大。对于上拔桩而言, 极限状态桩土相对位移较大, 因而桩土侧摩阻力发挥程度较高; 但对于抗压桩而言, 由于桩端阻力的影响, 接近桩端的位置, 桩土相对位移发挥程度较小, 侧摩阻力未能充分发挥, 因此桩达到极限承载力状态时的侧摩阻力未必随着深度一直增加。

含水率由 17% 增加至 30% 过程中, 抗压试验桩身全长平均极限侧摩阻力由 40 kPa 减少至 27 kPa, 减少约 33%; 上拔试验中桩侧极限侧摩阻力由 28 kPa 减少至 18 kPa, 减少约 35%。抗压桩和上拔桩的侧摩阻力减小幅度比较接近, 同时, 含水率相同时, 上拔桩极限侧摩阻力平均值约为抗压桩的 67%~70%。

## 4 结 论

本文对河南内乡中等偏弱膨胀土分别在最优含水率、饱和含水率时进行了抗压和上拔两种工况下的加载, 得到了膨胀土含水率变化前后的承载特性变化的相关数据。试验结果表明:

(1) 关于承载力, 无论抗压桩还是上拔桩, 在膨胀土浸水含水率上升后承载力均会降低, 上拔桩承载力降低幅度比抗压桩小。相同含水率条件下, 上拔承载力约为抗压承载力的 70%~80%。极限状态上拔桩顶位移比抗压桩大, 并且均随着含水率的升高而增大。

(2) 桩身轴力分布形式上, 上拔桩和抗压桩是比较相似的: 随着深度的增大而减小, 不同深度处的桩身轴力均随着桩顶荷载增加而增加, 但是越深的地方增加的幅度越小。浸水会造成极限状态全长范围内的

桩身轴力均减小, 深部减小幅度低。

(3) 上拔桩的桩侧摩阻力分布规律沿着深度一直增大, 呈线性分布, 而抗压桩的侧摩阻力整体呈现抛物线形式分布, 最大侧摩阻力分布在桩体中下部, 因为桩端阻力在一定程度上限制了深部的桩土相对位移。上拔桩在极限承载力状态的平均侧摩阻力约为相同含水率条件下抗压桩的 67%~70%。

## 参 考 文 献:

- [1] 孙长龙, 殷宗泽, 王福升, 等. 膨胀土性质研究综述[J]. 水利水电科技进展, 1995(6): 10~14. (SUN Chang-long, YIN Zong-ze, WANG Fu-sheng, et al. The summarizing statement properties of expansive soils[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1995, 15(6): 10~14. (in Chinese))
- [2] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. Problems of expansive soil in engineering construction[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 刘涛, 王勇, 孙吉主, 等. 吸湿环境下膨胀土与桩接触面强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 1): 161~166. (LIU Tao, WANG Yong, SUN Ji-zhu, et al. Experimental study on pile-soil interface strength of expansive soil under environment of moisture absorption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 161~166. (in Chinese))
- [4] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 71~75. (MIAO Lin-chang, ZHONG Xiao-cheng, YIN Zong-ze. The relationship between strength and water content of expansive Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(2): 71~75. (in Chinese))
- [5] Poulos H G, XU K J. 3-D elastic analysis of vertical piles subjected to "passive" loadings[J]. Computers & Geotechnics, 2001, 28(5): 349~375.
- [6] NELSON J D, THOMPSON E G, SCHAUT R W, et al. Closure of "design procedure and considerations for piers in expansive soils"[J]. Journal of Geotechnical & Geo-environmental Engineering, 2014, 140(8): 07014019.
- [7] 程永锋, 邵晓岩, 朱全军. 我国输电线路基础工程现状及存在的问题[J]. 电力建设, 2002, 23(3): 32~34. (CHENG Yong-feng, SHAO Xiao-yan, ZHU Quan-jun. Current situation of foundation works and existing problems for transmission lines in China[J]. Electric Power Construction, 2002, 23(3): 32~34. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)