

# 膨胀土中桩侧阻力的静载试验研究

曾庆国, 何杰, 张春顺

(湖南工业大学 岩土工程研究所, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 通过室内模型试验, 研究和分析了不同荷载以及不同时间条件下膨胀土地基中桩侧阻力的时程性。试验研究发现: 相同时间、不同荷载作用下, 桩身不同深度处侧阻力随荷载增加呈线性分布, 靠近桩顶截面的侧阻力增加趋势更快, 靠近桩端截面的侧阻力增加趋势相对较慢; 在同级荷载不同时间条件下, 桩身不同深度处的侧阻随时间增加变化不大。在试验研究的基础上, 还对桩侧阻力的影响因素作了相关的理论分析和探讨。

**关键词:** 模型试验; 膨胀土; 桩侧阻力; 线性拟和

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-2611(2007)01-0097-04

## Study on the Static Loading Test of Pile Lateral Friction in Expansive Soil

Zeng Qingguo, He Jie, Zhang Chunshun

(Geotechnical Engineering Institute, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** An indoor experiment was made to analyze lateral friction of pile in expansive soil under the condition of different loads and time. The fitting curves of the obtained results of the relationship between lateral friction and loads or times showed as follows: given the same time, the lateral friction along the pile increase almost linearly with the loads, the nearer the parts from the pile top, the faster the lateral friction development of the parts, while for the parts nearer the pile end, their lateral friction increase less fast compared with the parts nearer the pile top, given the same load, the lateral friction along the pile remain unchanged, or at least very little. It makes relative theoretic analysis and discussion of the influencing factors on pile lateral friction in view of the results of the experiment.

**Key words:** model test; expansive soil; pile lateral friction; inearly fitting

## 0 前言

众所周知, 桩的轴向承载力是由桩的端阻和侧阻力共同提供的。在通常粘性土中, 端阻的发挥需要更大的位移量, 故而一般滞后于侧阻力的发挥, 而且当桩的位移较小时, 其在总阻抗中所占的比例也很小。大量工程实践及理论研究表明, 桩侧摩阻力的大小主要受两个因素的影响: 其一是桩周土体与桩体侧面的摩擦性质; 其二是桩与周土体界面上的正应力的大小。在界面上正应力分布规律已知的前提下, 摩阻力的大小仅仅取决于桩土界面上的摩擦特性。膨胀土是一种特殊的粘性土, 主要是由基性火成岩、中酸火山岩以及不同时代的粘土岩、泥岩、页岩风化形成的。研究证实, 膨胀土的形成是分形的<sup>[1]</sup>, 其体积会随着其

含水量的变化而显著变化, 吸水膨胀、失水收缩, 这种特性给许多工程造成了巨大损失。

在处理膨胀土地基时采用桩基特别是短桩是一种十分有效的方法。然而, 目前对膨胀土中桩侧阻力的研究还鲜有报道。国内外许多科研人员只是在一般粘性土或砂性土中对桩侧阻力做了一定的研究: 如, Paolo Carrubba (1997) 在对大直径嵌岩桩的侧摩阻力分析时, 根据实测的桩荷载-沉降曲线, 采用反分析的方法确定桩的侧摩阻力<sup>[2]</sup>, 蔡江东等分析了桩周土侧阻发挥过程及侧阻发挥系数的取值问题, 认为嵌岩桩桩周土侧摩阻力发挥除与桩周土土性、桩端土支承强度有关外, 还与土层相对桩身的位置等诸多因素有关<sup>[3]</sup>, 吴兴序应用土力学原理, 分析了桩端阻和桩侧摩阻力之间相互作用的关系<sup>[4]</sup>, 李发明等根据一些现

收稿日期: 2006-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50378097)

作者简介: 曾庆国 (1982-), 男, 河南信阳人, 湖南工业大学05级硕士研究生, 主要研究方向为桩基理论及软土地基处理。

场试验资料及室内模型试验的分析,认为桩侧阻力存在着几种退化效应,即局部侧阻力随桩入土深度的增加发生退化、超过临界位移后侧阻出现退化现象以及在循环荷载作用下侧阻发生退化<sup>[5]</sup>,张明义等通过试验研究,得出了桩承载力的提高主要是因为桩侧阻力的提高,桩端阻力的贡献较小的结论<sup>[6]</sup>。以上研究都未涉及到膨胀土的情况。而事实表明,由于膨胀土具有的超固结性、多裂隙性及吸水膨胀、失水收缩等不良工程性质,对膨胀土中的桩基产生的危害较大,对桩侧摩阻力影响也不同于一般粘性土,其机理值得研究。

## 1 试验模型设计

### 1.1 试验模型制作

本试验模型制作及相关试验条件参见文献[7]。

### 1.2 试验土样配置及土层制作

土样配置:试验所用的土样为广西南宁膨胀土,土体呈灰白色,属中等膨胀土。土样液限48.10%,塑限21.22%,塑性指数26.78%,最优含水率15.8%,最大干密度1.89 g/cm<sup>3</sup>。土样化学成分见表1。

表1 土样化学成分全分析结果

Table 1 Chemical constituents

阳离子名称	AL <sup>3+</sup>	Si <sup>4+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
质量分数/%	23.64	57.63	8.85	4.24	1.37	2.32
阳离子名称	Ti <sup>4+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Cr <sup>2+</sup>	S <sup>2+</sup>	
质量分数/%	0.91	0.73	0.09	0.03	0.19	

土层制作:1)将碾碎的风干土样过2 mm筛,充分拌匀;2)测定风干土样的含水率,计算配置一定含水率的土样所须的加水量;3)用喷雾器喷水,使风干土样的含水量达预计值,然后用编织袋将搅拌后的土样封装,扎紧袋口后放置于试验室闷制48 h,以确保土样含水量均匀;4)用烘干法量测土样的含水量( $\theta = 105 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t \geq 8 \text{ h}$ ),按设计干密度计算制备土层所需土样量;5)用人工击实器将定量的土击实至预定的设计高度,并保证土层的平整。

## 2 桩身侧摩阻力试验结果分析

### 2.1 试验及加载方式说明

本次模型试验采用慢速维持加载法加载。事先估算桩的破坏荷载后,分7级逐级加载。在每级荷载作用下,当桩顶沉降稳定,即桩顶沉降在1 h内的变化量不超过0.01 mm时,分别记录桩顶荷载、桩顶沉降、桩身应变和桩端轴力,然后施加下一级荷载,直到模型桩达到破坏为止。5号应变片处于半入土中状态,可能由于无桩周土的约束,而桩本身预埋时不可避免的产生了倾斜,致使加载时露出土表面的模型桩产生

轻微的晃动,从而使5号应变片的读数也呈现出不规则的跳动,故5号应变片的读数不具备参考价值。在研究和分析时,只考虑1~4号应变片之间的桩身截面(侧摩阻力)。为表述方便,取1~2号应变片间的桩身部分为截面1;取2~3号应变片间的桩身部分为截面2;取3~4号应变片间的桩身部分为截面3。

### 2.2 桩轴力和桩侧阻力之间的换算关系式

桩段侧阻力 $Q_s$ 可根据桩身不同截面处的轴力计算(为表述方便,文中不区分侧阻和侧阻应力),关系式如下:

$$Q_s = -\frac{1}{u} \frac{\Delta Q_z}{\Delta Z} \quad (1)$$

式中: $\Delta Q_z$ 为桩段轴力; $u$ 为桩周长, $u = \pi \times d$ , $d$ 为桩径; $\Delta Z$ 为两断面间桩段长度。

### 2.3 在相同时间条件下,桩侧阻力随桩顶荷载的变化与分析

根据试验数据可得不同截面处的侧阻力与桩顶荷载的关系曲线及其拟和图如图1~3。

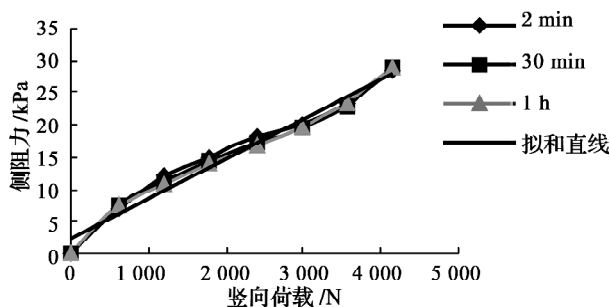


图1 截面1侧阻力和竖向荷载关系曲线

Fig. 1 Curves of lateral friction and vertical load in section 1

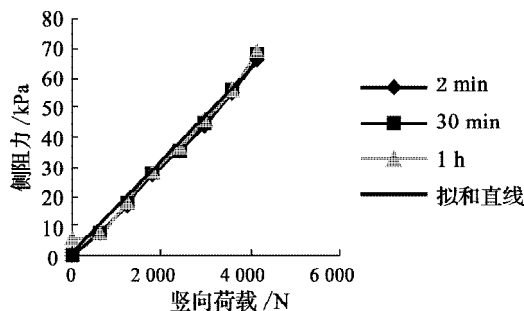


图2 截面2侧阻力和竖向荷载关系曲线

Fig. 2 Curves of lateral friction and vertical load in section 2

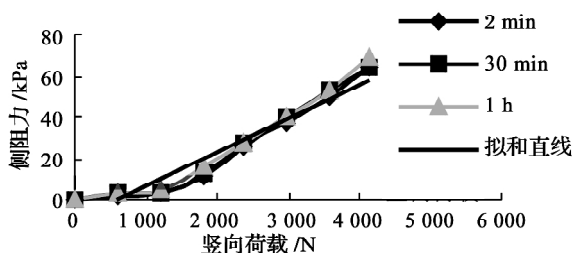


图3 截面3侧阻力和竖向荷载关系曲线

Fig. 3 Curves of lateral friction and vertical load in section 3

由图 1~3 可以看出: 1) “竖向荷载-侧阻力”曲线是一簇曲线, 随竖向荷载的增大及时间的增长, 曲线凹向侧阻力轴。这反映了土体具有明显的非线性特征, 但通过线性拟和, 也能很好地反映膨胀土中桩顶荷载和侧摩阻力的线性关系。2) 在“竖向荷载-侧阻力”曲线上有明显的拐点, 拐点前后的斜率有明显的变化, 这反映了膨胀土是一种粘、弹、塑性体。

根据试验数据, 对各截面的桩身侧阻力与竖向荷载关系曲线进行拟和(给定时间为 2 min、30 min、60 min 时), 可得侧阻力与竖向荷载关系线性回归方程如表 2。

**表 2 不同时段侧阻力与竖向荷载关系线性回归方程**  
**Table 2 The linear regression of lateral friction versus vertical load**

截面位置	时段 /min		
	2	30	60
1	$y=0.0062x+2.6344$	$y=0.0062x+2.3195$	$y=0.0062x+2.1246$
2	$y=0.0159x-1.6554$	$y=0.0162x-1.7455$	$y=0.0164x-1.7415$
3	$y=0.0161x-9.4415$	$y=0.0165x+8.9635$	$y=0.0168x+8.4376$

于是, 桩身侧阻力与竖向荷载的表达关系式为:

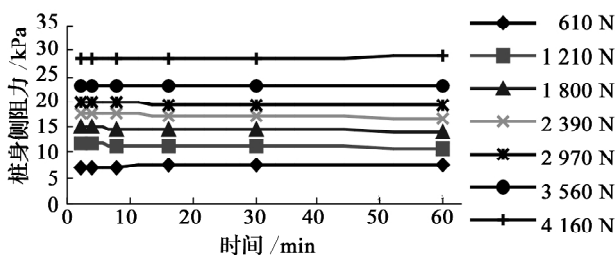
$$y=ax+b, \tag{2}$$

式中:  $y$  是侧阻力;  $x$  是竖向荷载;  $a$  和  $b$  均为回归系数, 见表 2。

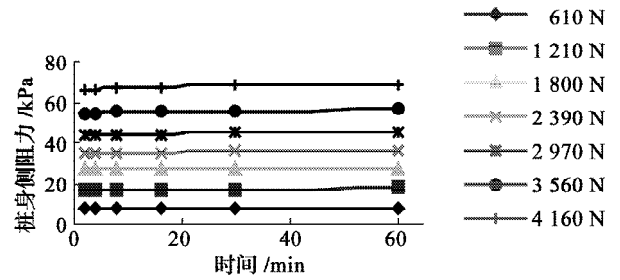
由表 2 可得, 截面 1~3 处侧阻力与桩顶荷载的关系曲线拟和后直线的斜率的递增率在 2 min、30 min、60 min 时分别为: 0.0097, 0.0002; 0.01, 0.0003; 0.012, 0.0004。通过分析以上试验数据, 并对相同时间条件下, 桩身不同截面的侧阻力和桩顶荷载关系曲线进行拟和, 发现: 1) 桩身不同入土深度处, 截面侧阻力和桩顶荷载呈线性关系, 且线性关系较明显。2) 随保载时间的延长, 靠近桩顶的截面, 其拟和直线的斜率增加较大; 而靠近桩端的截面, 拟和后直线的斜率增加较小。这说明膨胀土中桩侧阻力在桩身上部易发挥, 在桩身下部发挥滞后, 属典型的摩擦桩。

### 2.4 在同级荷载、不同的时间条件下, 桩侧阻力的变化与分析

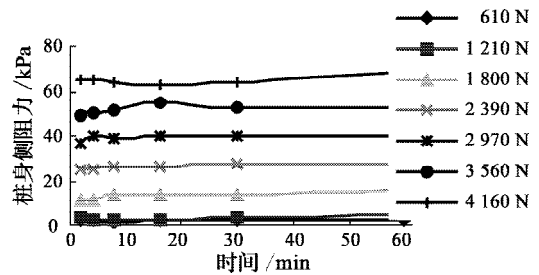
由实验数据可得, 同级荷载下, 不同截面处桩身侧阻力和时间的变化关系曲线如图 4~6。



**图 4 同级荷载下, 截面 1 处侧阻力和时间变化关系**  
**Fig. 4 The relationship between lateral friction and time in section 1 on the same load**



**图 5 同级荷载下, 截面 2 处侧阻力和时间变化关系**  
**Fig. 5 The relationship between lateral friction and time in section 2 on the same load**



**图 6 同级荷载下, 截面 3 处侧阻力和时间变化关系**  
**Fig. 6 The relationship between lateral friction and time in section 3 on the same load**

由以上各图中曲线可以看出: 1) 在桩身同一截面处, 随桩顶荷载的增加, 桩侧阻力均匀增加; 2) 桩侧阻力随桩身截面入土深度的增加呈递减趋势; 3) 在每级荷载的加载初期, 桩侧阻力有明显的波动, 随时间增长趋于稳定的直线; 4) 同级荷载下, 桩身不同截面处的侧阻力随时间的增加变化不大, 近似直线关系。

### 3 膨胀土中桩侧摩阻力变化机理分析

膨胀土中桩侧阻力的变化规律总体上与其它粘性土中桩侧阻力类似, 但其变化更明显, 机理也更复杂。结合本次试验, 笔者认为, 膨胀土中桩侧阻力变化特点主要受几个方面影响:

1) 膨胀土的强固结效应。在加载过程中, 桩周膨胀土受挤压, 从而使土体的总应力、孔隙水压力迅速增加。在每级荷载下桩顶沉降稳定后, 不同孔压区的压差促使孔隙水压力消散更快, 又由于膨胀土固结时间更短, 强度恢复更快更高, 从而引起桩侧阻力明显增加。

2) 桩周土的触变效应。桩周土在桩沉降过程中被挤压扰动, 强度明显降低, 粘性土尤其是膨胀土, 其时效作用使损失的强度逐步恢复。桩-土摩阻力的提高与土的时效恢复规律基本相同, 都符合双曲线规律<sup>[8]</sup>。

3) 桩周土在桩顶受竖向荷载过程的变化可划分为塑性区和弹性区, 按土的扰动程度的不同又可分为 3 个区: 重塑区 I; 部分扰动区 II; 非扰动区 III。重塑

区由于受沉桩过程竖向剪切、径向挤压作用而完全重塑。由于桩土界面的挤压应力最大，超孔隙水压力也最大，因而不断产生相对位移。粘聚力最小的桩土界面上将形成“水膜”。该水膜不仅起到降低沉桩贯入阻力的作用（若打桩中途停歇，水膜消散，便会使沉桩阻力大大增加），而且在桩表面形成排水通道，使重塑区土体快速固结，并随静置和固结时间延长，逐步形成紧贴于桩表面的硬壳。该硬壳的厚度通常为3~20 mm<sup>[6]</sup>，随土性、桩表面粗糙程度而变化。本次试验结束后，测得模型桩表面的硬壳厚度约为12 mm，这与文献[6]的论述一致。

4) 膨胀土的蠕变效应。土的蠕变过程可能减速进行，应变速率逐渐减小，最后趋于零，达不到破坏，这种情况称为衰减蠕变过程（如图7所示）；土的蠕变过程也可能加速进行，这种情况称为非衰减蠕变过程（如图8所示）。非衰减蠕变过程包括3个阶段：第1阶段为衰减阶段，即非稳定蠕变阶段（AB段）。在这一阶段，变形以减速发展；第2阶段为稳定蠕变阶段，也称为稳定流动阶段（BC段）。这一阶段，变形基本上恒定不变；第3阶段为急剧流动阶段。这一阶段，变形速度逐渐增长，最后导致土的破坏，因此也成为破坏阶段（CD段）。本次模型试验采用的膨胀土是一种特殊土，粘粒成分主要由强亲水矿物组成，尤其是以蒙脱石、伊利石或蒙脱-伊利石混层矿物为主，这些矿物的流变特性都非常明显，属于灵敏度较高的土体。

在桩顶作用不同级别荷载过程中，桩周土受挤压，随受荷时间的增加，桩周土的骨架结构、粘聚力、颗粒形状以及密实度、饱和度、渗透性质都发生了变化，易引起桩周膨胀土产生非衰减蠕变，从而影响土的长期强度。本次实验由于时间限制，未能得出膨胀土中桩周土的应变-时间关系和长期强度。

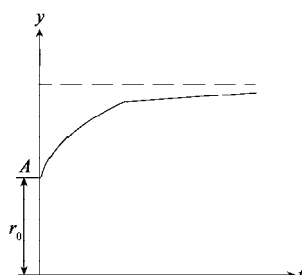


图7 软土的衰减蠕变  
Fig.7 Attenuation creep of soft soil

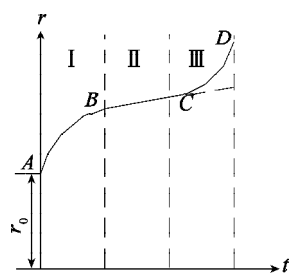


图8 软土的非衰减蠕变  
Fig.8 Non-attenuation creep of soft soil

## 4 结论

根据膨胀土中桩侧阻力室内模型试验研究，得出

以下结论：

1) 相同时间不同荷载条件下，膨胀土中桩侧阻力随桩顶荷载增加呈线性分布，靠近桩顶的桩身截面，侧阻力增加较快，而靠近桩端的截面次之。

2) 在同级荷载不同时间条件下，膨胀土中桩侧阻力随时间增加变化不大。

3) 膨胀土中桩侧阻力主要受桩周土的触变效应、固结效应、桩周土的弹、塑性变形以及桩周土的蠕变效应等因素的影响。不同土类后期桩侧阻力的提高幅度不同，粘性土特别是膨胀土的提高幅度相对较大。

4) 从目前情况看，虽然我国膨胀土分布广泛，但对膨胀土以及膨胀土中桩侧阻力的研究仅局限于从传统的弹塑性理论出发，分析其应力-应变本构关系。事实上，粘性土特别是膨胀土，流变效应非常明显，是一种粘弹塑性体，时间因素必须被考虑在膨胀土的本构关系研究中，即应力-应变-时间关系。所以，许多工作有待于进一步继续和开展，未来的研究主要集中在3个方面：一是从试验和理论上对膨胀土中桩侧阻力的动态特性进行研究，分析桩周土的长期强度、蠕变效应的机理和本质；二是结合流变模型如元件模型、屈服面模型、内时模型、经验模型<sup>[9]</sup>等分析膨胀土中桩侧摩阻力；三是有限元、无限元、边界元方法及相应的软件将为膨胀土中桩侧阻力的研究提供更科学、更精确的分析和计算。

## 参考文献:

- [1] Ochiai M, Ozao R, Yamazaki Y. Self-similarity law of particle size distribution and energy law in size reduction of solids[J]. *Physica A*, 1992, 191:295-300.
- [2] Paolo Carrubba. Skin friction of large-diameter piles socketed into rock[J]. *Can Geotech*, 1997, 34:230-240.
- [3] 蔡江东, 姜振泉. 大直径软岩嵌岩桩侧阻发挥系数取值分析[J]. *工程勘察*, 2006(2):15-18.
- [4] 吴兴序. 桩的端阻和侧摩阻的相互作用及其工程应用价值[J]. *西南交通大学学报*, 1997, 32(3):313-318.
- [5] 李发明, 陈竹昌, 刘利民. 桩侧阻力的几种退化效应简述[J]. *土工基础*, 1998, 12(1):41-46.
- [6] 张明义, 时伟, 王崇革, 等. 静压桩极限承载力的时效性[J]. *岩土力学与工程学报*, 2002, 21(增2):2601-2604.
- [7] 张国强, 张春顺, 肖宏彬. 膨胀土中桩的荷载传递模型试验研究[J]. *株洲工学院学报*, 2006, 20(4):90-93.
- [8] 张明义, 邓安福. 桩-土滑动摩擦的实验研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(2):246-249.
- [9] 袁静, 龚晓南, 益德清. 岩土流变模型的比较研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6):772-779.