膨胀土中单桩性状的模型试验研究

王年香，顾荣伟，章为民，顾行文
（南京水利科学研究院，江苏 南京 210029）

摘 要：桩基是一种有效处理膨胀土的方法，膨胀土中桩基的工作性状会受到膨胀土浸水膨胀的影响。通过大型模型试验分析了浸水对膨胀土中单桩承载特性的影响，研究了浸水过程中单桩的上升和胀切力的变化规律。试验结果表明：由于膨胀土浸水软化作用，膨胀土中桩的侧摩阻力和承载力明显降低，而由于膨胀作用，桩中产生胀切力而使桩上升。

关键词：膨胀土；浸水；单桩；性状；模型试验
中图分类号：TU443 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2008)01－0056－05

作者简介：王年香(963－)，江西信丰人，博士，教授级高级工程师，主要从事岩土工程科学研究和技术咨询工作。Email: nxwang@nhri.cn。

Model tests on behaviour of single pile in expansive soil

WANG Nian-xiang, GU Rong-wei, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen
(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Piles are usually used to improve expansive soil. The behavior of piles in expansive soil will be influenced by the inundation swelling deformation of expansive soil. Large scale model tests were carried out to study the influence of inundation swelling deformation on the bearing capacity of single pile in expansive soil. The heave and swelling shear force of single pile were studied during inundation. It was indicated that the shaft resistance and bearing capacity of single pile would decrease and the heave and swelling shear force in piles would increase due to the inundation swelling deformation of expansive soil.

Key words: expansive soil; inundation; single pile; behaviour; model test

0 前 言

膨胀土是一种具有裂隙性、胀缩性和超固结性的高塑性黏土，在天然状态下强度很高，但其对气候环境变化特别敏感。当含水率变化时，膨胀土遇水发生膨胀、失水发生收缩变形，表现出明显的胀缩性。膨胀土的这种不良性质给大量工程造成了巨大损失，如铁路、公路、渠道边坡、路面等会因此受到严重危害；在地下工程中，因围岩膨胀导致底鼓破坏、围岩失稳引起工程事故；膨胀土地基的胀缩导致建筑物基础升降、建筑物及地坪开裂变形、甚至破坏等[1]。处理膨胀土最有效的方法之一就是采用桩基础。然而，膨胀土含水率变化会影响桩基的工作性状，如膨胀土遇水膨胀将对桩产生上拔力，失水收缩又将对桩产生下拉力（负摩阻力），从而使得膨胀土中的桩－土共同作用比一般土中的要复杂得多，但这方面的研究甚少[2]。因此，开展膨胀土与桩的共同作用机理的研究具有重要的工程意义。本文通过大型模型试验，研究浸水前后膨胀土中桩的承载特性和浸水过程中桩的上升和胀切力的变化规律，对完善膨胀土中桩基础设计计算具有一定的指导意义。

1 模型试验方法

试验在内部尺寸长×宽×高为 10 m×2.5 m×4.1 m 的大型模型槽里进行。研究了深层浸水条件下膨胀土变形规律及其对构造物的影响[3]。试验布置了静止挡墙、可动挡墙、桩基础等构造物，进行了膨胀土地基含水率、表面膨胀、深层膨胀、挡墙水平位移、挡墙土压力、地基承载力、桩基承载力、桩基胀切力等测试。本文主要介绍有关单桩性状的试验内容，试验布置见图 1。

试验用膨胀土取自南京汤山的灰白色膨胀土，其主要性质指标见表 1。土料经过烘干、粉碎，含水率约为 17%。将模型槽分隔成 2 个区，其中一区长 7.5m，填筑土层干密度为ρ_d=1.45 g/cm^3，另一区长 2.5 m，填筑土层干密度为ρ_d=1.6 g/cm^3。土料分层填筑，采用振动碾进行碾压夯实，每层控制压实后的厚度为 20 cm，填土总高度为 3.6 m。

基金项目：交通部西部交通建设科技资助项目（200231874616）
收稿日期：2007－02－25

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

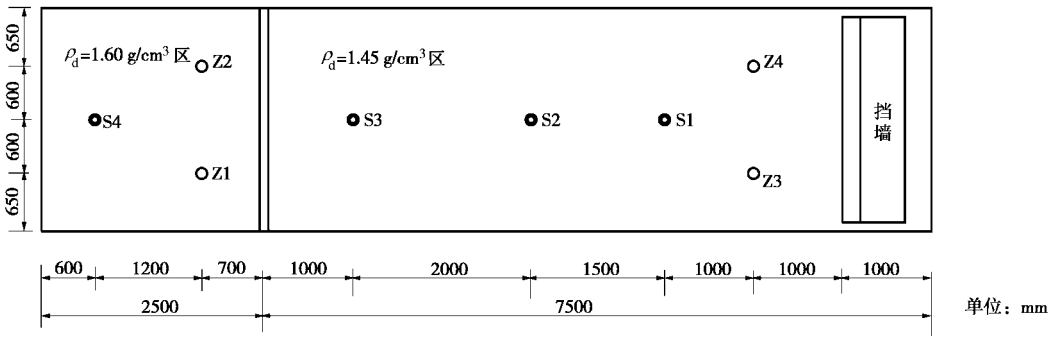


图 1 试验布置图

Fig. 1 Layout of model tests

表 1 膨胀土的主要性质指标

Table 1 Main indices of expansive soils

液限	塑限	自由膨胀率	最大干密度	最优含水率	w_0=17%，ρ_d=1.45 g/cm³		w_0=17%，ρ_d=1.6 g/cm³	
/%	/%	/%	/(g·cm⁻³)	/%	无荷膨胀率/%	膨胀力/kPa	无荷膨胀率/%	膨胀力/kPa
102	46	140	1.77	15.5	7.8	463	11.9	701

试验布置了 4 根桩（Z1～Z4），ρ_d=1.45 g/cm³ 区和ρ_d=1.6 g/cm³ 区各 2 根。桩采用外径 50 mm、壁厚 5mm 的铝合金管模拟，桩底开口以模拟摩擦桩，桩侧粘粉砂以模拟侧壁摩阻力。每根桩贴有 12 组电阻应变片，测量桩身轴力，间距为 25 cm 或 50 cm。电阻应变片帖成全桥电路，温度互为补偿，并可消除弯曲影响。电阻应变片选用基底为 3 mm×5 mm、电阻值为 120±0.1%Ω、具有一定防水性的聚胺脂精密级应变片。应变片测试灵敏系数为 2，最大应变 2%。用 502 胶水粘贴，703 胶防水。试验前对桩上的电阻应变片进行了标定，线性关系良好。

模型试验中布置了 4 根深层沉降管（S1～S4），其中ρ_d=1.45 g/cm³ 区 3 根，ρ_d=1.6 g/cm³ 区 1 根。每根沉降管设 10 个沉降环，环间距约为 32 cm。深层土体隆起采用电磁式沉降仪测量。

试验模拟膨胀土深层浸水，共设置了 25 根浸水管，4 根沉降管亦作浸水管。浸水管采用 PVC 管，在管上密部出水小孔，管外包土工滤膜。浸水管主要布置在模型槽槽壁和中部，垂直埋设于土中，高出土面 50 cm。浸水时，往管内注水，以保持管内水位。浸水历时达 3 个多月。

单桩承载力试验采用分级加荷，每级荷载增量为预计极限荷载的 1/8～1/12。每级荷载稳定 1 h，每 10 min 测读一次数。测量荷载、沉降、桩身轴力。

2　浸水对单桩承载特性的影响

浸水前后分别进行了单桩承载力试验，图 2 为单桩的荷载沉降曲线。从此可以看出，荷载－沉降曲线存在明显的拐点，在拐点之前，曲线比较平缓，之后，沉降急剧增大。在平缓段，浸水前比浸水后平缓。由表 2 可见，浸水使极限承载力明显下降，ρ_d=1.45 g/cm³ 时下降 47%，ρ_d=1.6 g/cm³ 时下降 29%。

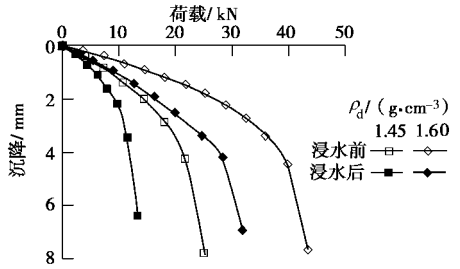


图 2 膨胀土浸水前后单桩荷载沉降关系曲线

Fig. 2 Load-settlement curves of single pile in expansive soil before and after inundation

表 2 膨胀土浸水前后单桩的承载变形特征值

Table 2 Bearing capacity and settlement of single pile in expansive soil before and after inundation

ρ_d	极限承载力/kN		沉降/mm	
/(g·cm⁻³)	浸水前	浸水后	浸水前	浸水后
1.45	21.6	11.4	4.2	3.4
1.60	39.6	28.2	4.4	4.2

从桩身轴力随桩顶荷载的变化和沿深度的分布可以看出，桩身轴力随着桩顶荷载的增大而增大，但不同深度增长规律不同，深度越浅，增长幅度越大，越深增长幅度越小。靠近桩顶，桩身轴力随桩顶荷载几乎是线性增长，而靠近桩底，则在桩顶荷载较小时，桩身轴力增长不明显，超过一定荷载时，才有所增长。达到极限荷载时，桩身荷载沿深度几乎是线性分布（图 3），表明桩侧摩阻力发挥到极限值。

从桩侧摩阻力随桩顶荷载的变化可以看出，桩侧

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

摩阻力随着桩顶荷载的增大而增大，但不同荷载和深度条件下增长规律不同，当荷载较小时，深度越浅，增长幅度越大，越深增长幅度越小。当荷载较大时，深度越浅，增长幅度越小，越深增长幅度越大，表明桩中上部的侧摩阻力先于中下部侧摩阻力发挥并先达到极限值。图 4 为极限荷载下桩侧摩阻力沿深度的分布，表明不同干密度、浸前后桩侧摩阻力相差较大（见表 3），浸水后桩侧摩阻力只有浸水前的 50%～70%。

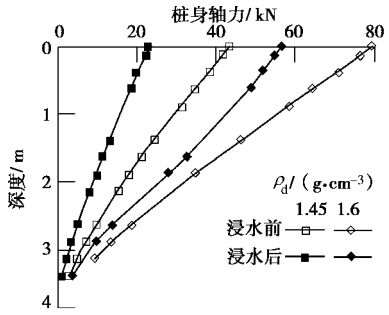


图 3 极限荷载下桩身轴力随深度的变化

Fig. 3 Axial force-depth curves of single pile under the ultimate load

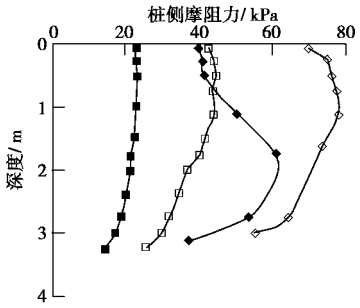


图 4 极限荷载下桩侧摩阻力随深度的变化

Fig. 4 Shaft resistance-depth curves of single pile under the ultimate load

表 3 极限荷载下桩侧平均摩阻力

Table 3 Average shaft resistance of single pile under the ultimate load

ρ_d/(g • cm^{-3})	浸水前/kPa	浸水后/kPa	浸水后/浸水前
1.45	38.2	20.8	0.54
1.60	71.5	50.0	0.70

3 浸水过程中桩的上升

膨胀土浸水过程中，随着土体膨胀，土层产生隆起，桩和土之间将产生摩阻力使桩上升。图 5 为浸水过程中桩顶上升量过程线，图 6 表示相对上升量（桩顶上升量与地表隆起量之比）过程线，从图中看出，桩的上升与土层的隆起是同时发生的，且桩的上升量均大于桩底处土层隆起量。开始时相对上升量随着浸水时间的增加而迅速增大，浸水达到一定时间后，相对上升量基本保持不变，约为 0.21～0.24。因此，膨胀时桩尖无土压力，而桩的上升是由桩周土层隆起造成的。

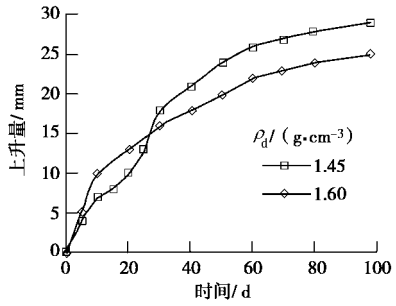


图 5 桩顶上升量过程线

Fig. 5 Pile top heave-time curves

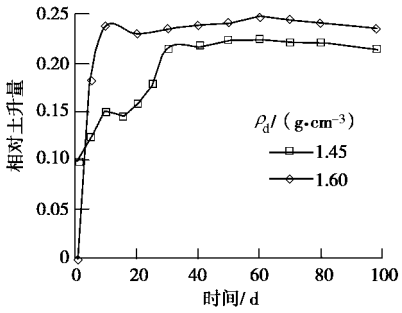


图 6 相对上升量过程线

Fig. 6 Comparative heave-time curves of pile top and soil surface

索洛昌的现场试验表明[4]，桩的上升量取决于很多因素，特别取决于桩长和桩顶荷载。在各种土中桩的相对上升量与桩长之间呈非线性关系。即桩的相对上升量随着桩长的增加而降低，但短桩的降低要大。显然在桩长大于一定值时，桩将不发生升高现象。

桩长增加时，桩上升量减小的原因可以解释如下：假设桩未打穿膨胀土层，然后整个膨胀土层浸水，土层的隆起量将决定桩的上升量。然而不同深度土层的隆起是不相同的，上部土体的隆起量最大，并随着深度的增加而减小。因此，上部土层力求把桩抬升到最大限度，而下部土层又使桩的上升最小，结果下部阻碍了桩的上升。所以不同深度土层的不均匀隆起产生了这种“锚固效应”。

我们以ρ_d=1.45 g/cm^3 土体中桩为例说明这一现象。在桩顶无荷载条件下，由于土体膨胀，土层隆起，其隆起量随深度而减小。图 7 中的 *CD* 曲线系膨胀稳定后土层隆起量沿深度的变化，而 *AB* 直线表示桩的上升量，在本试验条件下，桩上升 29 mm。从图中看出上部土层的隆起大大超过桩的上升量。土层隆起量和桩上升量之间差异随着深度的增加而缩小，在 *AO* 深度时（即“中性点”*O* 点），桩的上升量等于土层的隆起量。因此，*AO* 段土的隆起导致在桩侧产生力图

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

把桩抬高的垂直胀切力。中性点以下的隆起量比桩的上升量小，因此，在 *OB* 段上产生阻碍桩上升的“负”摩擦力。这就是说，在土膨胀时桩上存在切向力方向相反的二个区，一个是 *OA*“主动区”，另一个是 *OB*“被动区”。

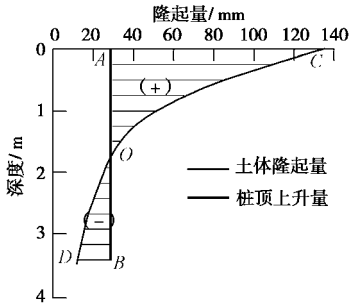


图 7 土体隆起量和桩的上升量

Fig. 7 Heave-depth curves of expansive soil and pile

在土膨胀过程中，中性点是上下移动的，并改变“主动区”和“被动区”之间的比例，也就是说改变锚固力与力图使桩上升的切向力之间的关系。

现在来探讨不同时间内这两个区的变化特征，即土膨胀时中性点的移动。为此目的在图 8 绘制了从开始浸水到土膨胀稳定之间不同时间的土层隆起曲线组。在这些曲线上标出了桩的中性点位置。将这些符号连成线后，得到桩在浸水过程中的中性点位移曲线。从图中看出，*AO*“主动区”的大小随着土层的隆起而减小，但接近某一值后，虽然土继续隆起，它保持不变。在作用区之间的比例不变之后，桩的上升量约等于 0.5 桩长深度处的土层隆起量。

从图中曲线看出，桩的上升量大于桩尖处土层隆起量。在这种情况下，桩尖无附加土压力。桩的上升只是由于“主动区”内桩周土隆起造成的。桩的这一工作特点，对于桩长小于膨胀土层是真实的，假如桩的一部分埋在非膨胀土层内，那末在浸水过程中，非膨胀土层将阻碍桩的上升。显然，在非膨胀土层内可以选择合适的锚固深度，使锚固力等于胀切力。

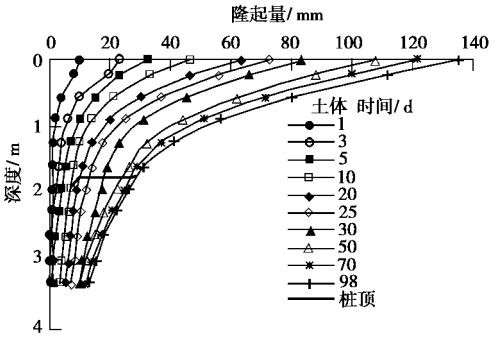


图 8 土体膨胀过程中桩中性点的移动

Fig. 8 Movement of neutral point of pile in expansive soil

4　浸水过程中桩的胀切力

试验表明，浸水后膨胀土中桩将出现拉力，浸水初期桩身轴力随时间增大，并达到最大值，然后虽然土继续隆起，但桩身轴力却缓慢减小。土体干密度越大桩身轴力也越大。从桩身轴力沿深度的分布（图 9）可以看出，桩身轴力呈中间大、两端小的分布形态，在中性点以上，桩身轴力随深度的增加而增大，在中性点处达最大值，然后随着深度的增加而减小。最大桩身轴力就是胀切力，如图 10 所示，胀切力随着浸水时间增大，达到最大值后随着时间有所减小，最小胀切力与最大胀切力之比约为 0.9（表 4）。胀切力与浸水后单桩极限承载力有关，约为单桩极限承载力的 1/3 左右。

表 4 膨胀土中桩的胀切力

Table 4 Swelling shear force of single pile in expansive soil

ρ_d	胀切力/kN		胀切力/浸水后极限承载力	
/(g·cm^{-3})	最大值	最小值	最大值	最小值
1.45	4.2	3.8	0.37	0.33
1.60	9.1	8.2	0.32	0.29

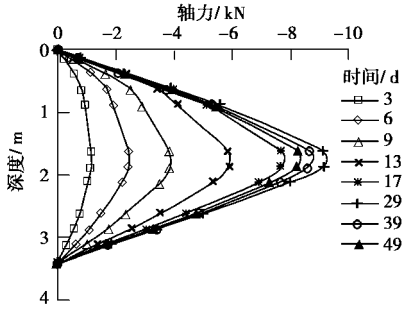


图 9 浸水过程中桩身轴力随深度的变化

Fig. 9 Axial force-depth curves of pile during inundation

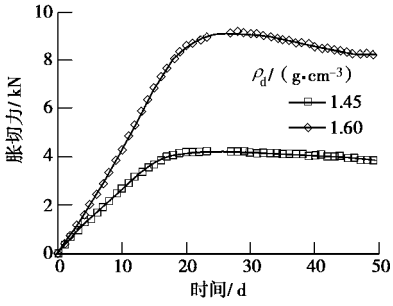


图 10 浸水过程中桩胀切力过程线

Fig. 10 Swelling shear force-time curves of pile during inundation

根据桩身轴力可以计算出桩侧摩阻力的变化情况，如图 11 所示。从图中看出，浸水初期桩侧摩阻力随时间增大，并达到最大值，然后虽然土继续隆起，但桩侧摩阻力却缓慢减小。从桩侧摩阻力沿深度的分布（图 12）可以看出，桩侧摩阻力呈反“S”形分布，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在中性点处桩侧摩阻力约为 0，以上为正摩擦，以下为负摩擦。桩侧胀切摩阻力正部分与负部分绝对值相等，大小相互抵消。最大胀切摩阻力约等于浸水后桩侧侧摩阻力。

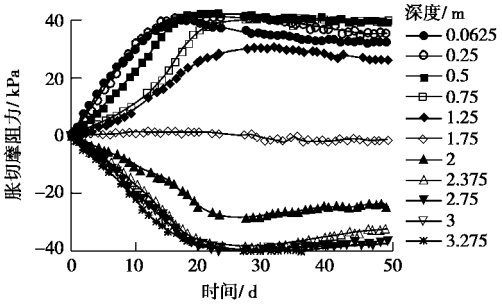


图 11 桩侧胀切摩阻力过程线

Fig. 11 Swelling shear shaft resistance-time curves of pile during inundation

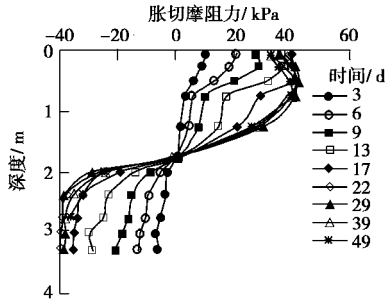


图 12 桩侧胀切摩阻力随深度的变化

Fig. 12 Swelling shear shaft resistance-depth curves of pile during inundation

5 结 论

（1）浸水后膨胀土中单桩极限承载力降低 29%～47%，桩侧平均摩阻力只有浸水前的 54%～70%。

（2）桩和土层的隆起不相同，桩上形成主动区和被动区。在主动区土层隆起将桩抬起，而被动区土层产生“负”摩擦力阻碍桩上升。

（3）浸水后膨胀土中桩将产生胀切力，胀切力大小与浸水后单桩极限承载力有关，约为单桩极限承载力的 1/3 左右。

（4）浸水后桩侧摩阻力呈反“S”形分布，在中性点以上为正摩擦，以下为负摩擦，大小相互抵消，最大胀切摩阻力约等于浸水后桩侧摩阻力。

参考文献：

[1] 李上红. 公路工程施工常见地质病害处治技术[M].北京: 人民交通出版社, 2003. (LI Shang-hong. Treatment technique of geological defects in the construction of highway engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))

[2] 陆忠伟. 膨胀土地基中桩的设计与计算[J]. 建筑结构, 1992(2): 35－40. (LU Zhong-wei. Design and calculation of pile in expansive soil foundation[J]. Building Structure, 1992(2): 35－40. (in Chinese))

[3] 王年香, 章为民, 顾行文. 膨胀土公路构造物地基与基础相互作用大型物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen. Large scale model test on interaction between foundation and expansive soil in highway engineering[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))

[4] 索洛昌. 膨胀土上建筑物的设计与施工[M]. 徐祖森, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982. (СОРОЧАН Е А. Design and construction of buildings on expansive soil[M]. XU Zu-sen, et al, translators. Beijing: China Architecture & Building Press, 1982. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net