

DOI: 10.11779/CJGE201710003

高液限膨胀性黏土基桩工作性状的离心机试验研究

杨 军¹, 张大峰¹, 李连友², 沈兆普²

(1. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011)

摘 要: 通过离心机试验研究高液限强膨胀性黑棉土地基中 4 根模型基桩在浸水条件下桩头位移和桩身轴力的变化规律, 考虑的影响因素包括桩长、桩头荷载以及是否采用隔胀措施。通过自主设计制作离心机内降雨装置和模型土层中的渗流通道实现黑棉土地基浸水条件。试验发现, 黑棉土浸水后对桩身轴力的影响分为两阶段: 前期土体刚度降低阶段, 黑棉土遇水刚度降低后能提供的摩阻力明显降低, 使得桩身轴力增大; 后期胀拔阶段: 黑棉土遇水膨胀隆起, 对桩基产生向上的胀拔力, 桩身轴力减小。此外, 浸水引起的桩头位移变化与桩顶受荷情况密切相关: 未受荷桩发生上拔位移, 而荷载为 625 kN 的桩发生沉降位移。在桩周采取隔胀措施可以削弱甚至消除黑棉土变形对桩基的不利影响。
关键词: 黑棉土; 膨胀土; 基桩; 离心机; 浸水

中图分类号: TU437.1; TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)10 - 1770 - 07

作者简介: 杨 军(1974 -), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 从事地下工程方面的教学和科研工作。E-mail: junyang@tsinghua.edu.cn。

Centrifuge modelling of working performance of foundation pile embedded in expansive clay with high liquid limit

YANG Jun¹, ZHANG Da-feng¹, LI Lian-you², SHEN Zhao-pu²

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Beijing 100084, China; 2. China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011)

Abstract: The centrifuge tests are carried out to study the change of displacements of pile head and axial forces of four single piles embedded in strong expansive black cotton soil with high liquid limit after being submerged considering the influences of pile length, pile head load and expansion isolation measures. The self-developed rainfall facility in the centrifuge and the artificial seepage path in the model stratum control the submerging condition of the black cotton soil foundation. It is found that the effects of rainfall condition on the axial forces of piles can be divided into two phases. In the first softening phase, the wetted expansive soil provides less friction resistance, which increases the axial forces of piles. And in the second expansion draft phase, the swelling uplift of expansive soil produces more friction resistance and the axial forces of piles decrease. In addition, the displacement of pile head caused by the submerging is closely related to its load. Under rainfall conditions, the pile without load is uplifted, while the pile with load of 625 kN settles. Taking expansion isolation measures around the pile body will decrease or even eliminate the negative effects of expansive soil deformation on pile foundations.

Key words: black cotton soil; expansive soil; foundation pile; centrifuge; submerging

0 引 言

黑棉土是一种广泛分布在中东非和印度等地的特殊的高液限强膨胀土, 具有遇水膨胀、失水收缩的性质, 因外表呈黑色、适宜种植棉花而得名^[1-2]。在旱雨季交替时, 膨胀土地基将发生较大的不均匀变形, 易导致建筑物破坏, 道路裂缝以及边坡失稳等工程问题, 比多数的自然灾害(洪水和地震)更为普遍和严峻^[3]。郑健龙等^[4]指出, 中国约有超过 3 亿人口生活在膨胀土地区, 包括云南、贵州、广西等 20 多个省, 每年因膨胀土造成的经济损失估计达数百亿。

黑棉土的工程性质较差, 表现出的低承载力、低渗透性和强胀缩性^[5]使得桩基成为有效的处理深厚黑棉土主要方式, 可以将建筑和道路荷载传递至较深的非膨胀土或岩石持力层, 有效减少膨胀土变形下结构物的位移。膨胀土地基中桩的工作性状相当复杂: 吸水膨胀时, 桩受到胀拔力; 失水收缩时, 土体作用在桩周的水平压力降低甚至脱离, 使得桩体丧失部分或

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB047003)

收稿日期: 2016 - 07 - 08

者全部侧摩阻力和端承力^[6]。中国是世界上较深入研究并在膨胀土地区成功使用桩基础的国家,《膨胀土地区建筑技术规范》已规定相应的设计方法、现场试验方法和施工措施,考虑了桩周土胀缩变形对其承载力的不利影响^[7]。Nelson 等给出了以有限元为基础的能考虑较复杂条件下膨胀土中的桩基设计方法^[8],但现场和模型试验仍然无可替代。

1967 年, Donaldson^[9]在南非膨胀土地区开展现场试验,发现土体膨胀对直径 23 cm 桩产生 80 kN 拉力。2008 年,王年香等^[10]开展模型试验,测定研究了土体浸水时胀拔力、桩头上拔量和中性点位置等的变化规律。2012 年,吴志伟等^[11]在老挝开展现场试验,发现膨胀土浸水产生的地表隆起达到 8 mm 时,桩被抬升 0.66 mm,并产生 0.2 MPa 附加拉应力。谢立安^[12]和 Xiao 等^[13]学者开展大量试验,深入研究了膨胀土地基中单桩行为,揭示浸水条件下膨胀土地基中桩-土的荷载传递规律。刘涛等^[14]还开展了吸湿环境下膨胀土与桩接触面强度特性试验研究。但上述试验一般无对照组,桩顶荷载为零,无法分析桩长、荷载大小等因素的影响。而且常重力条件下室内试验膨胀土常处于较低的应力,表现出比实际更大的膨胀性质。这些因素均将对试验分析和试验结论产生影响。

离心机试验基于应力一致的原则,可以减小模型尺寸,并缩短试验时间,是岩土工程中较为成熟和可靠的试验手段^[15],本文在离心机中设计膨胀土地基模型,研究浸水条件下桩头位移和桩基轴力的变化规律,测试了 4 根单桩,研究参数包括桩长、桩头荷载和是否采用隔胀措施。有助于理解浸水对黑棉土中基桩工作性能的负面影响以及采用隔胀措施的有效性。

1 试验设计

1.1 离心机相似关系

本试验采用清华大学 TH-50 g-t 土工离心机,规格为 50 g-t,最大加速度为 250g,最大模型质量为 0.5 t,有效半径 2 m。试验中加速度采用 50g,相似关系如表 1,试验模型尺寸为原型的 1/50,试验时间缩短为原型的 1/2500。

1.2 试验用膨胀土

试验用黑棉土取自非洲肯尼亚内罗毕南环项目,自由膨胀率达 173%,塑限 44.8%,液限 112.7%,塑性指数 67.9,是一种高液限膨胀性黏土。在含水率为 19.5%,密度为 1.48 g/cm³ 时,该膨胀土无荷载膨胀率达到 36%,膨胀力为 300 kPa。

采用重塑手段,将原状膨胀土充分烘干、粉碎,过 1 mm 筛,并喷洒纯净水将含水率配置为 23.0%。

表 1 离心机试验相似关系

物理量	模型/原型	试验取值
长度、位移	1/n	1/50
加速度	n	50
弹性模量	1	1
应力、应变	1	1
时间(固结)	1/n ²	1/2500
时间(渗流)	1/n ²	1/2500

1.3 桩基设计

试验中共设置 4 根桩:基准桩、无荷载桩、短桩和隔胀桩,桩的详细信息如表 2。

基准组桩长 200 mm,直径 19 mm,等效为原型长度为 10 m,直径为 0.95 m。参考文献[16]计算桩基承载力,砂土侧摩阻和端阻分别取为 30 kPa 和 1000 kPa,膨胀土侧摩阻取为 30 kPa。原型桩的承载力为 1600 kN,换算为模型桩的承载力 640 N,若不考虑膨胀土范围内的摩阻力,模型桩的承载力为 460 N。

$$Q = u \sum q_s l + q_p A = 1600 \text{ kN} \quad (1)$$

表 2 模型桩信息汇总表

组别	名称	桩长	桩径	桩荷载	隔胀	备注
		/mm	/mm	/N		
第一组	基准桩	200	19	250	无	基准桩
	无荷载桩	200	19	0	无	改变压重
第二组	短桩	120	19	250	无	改变桩长
	隔胀桩	200	19	250	有	隔胀措施

注:①隔胀措施指使用塑料套管使桩-土脱开,如图 1;②桩长值指埋入土体部分的长度,为安装测量设备需要,桩头高出土体表面 100 mm。

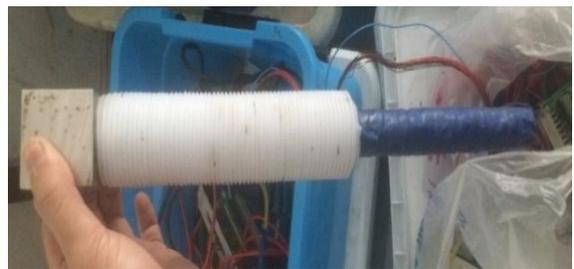


图 1 采用大直径套管实现隔胀

Fig. 1 Separating pile from surrounding soil by larger-diameter casing

模型桩直径为 19 mm,与混凝土的骨料粒径相当。基于加工方便、等效性好原则,模型桩采用不锈钢管制作。钢材弹性模量 200 GPa,原型桩为 C30 混凝土,弹性模量为 30 GPa。为保证截面抗压刚度 EA 不变,钢管壁厚度 t 通过式(2)计算为 0.74 mm,本试验中使用现有钢管型号,直径 19 mm,壁厚 0.8 mm。

$$t = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{E_c}{E_s}} \right) \frac{d}{2} \approx 0.74 \text{ mm} \quad (2)$$

在桩外表面粘贴应变片测量桩身应变, 同一深度对称位置各布置一片 (减少测试误差并消除桩身弯矩影响), 每对应变片距离 40 mm。长度 200 mm 桩共布置 6 对应变片, 布置位置为深 190, 150, 110, 70, 30 mm 及高出地表 10 mm; 长度 120 mm 桩共布置 4 对应变片, 布置位置为深 110, 70, 30 mm 及高出地表 10 mm。高出地表的应变片在离心机运转稳定后轴力保持不变, 在试验中作为补偿片。粘贴好应变片后, 用 302 胶水、防水胶带和绝缘胶带对模型桩作封闭处理, 防止试验过程中雨水渗入导致应变片失效。

1.4 模型设计

如图 2 所示, 共完成两组模型箱试验, 每组模型箱中设置两根模型桩。土体分为两层, 上层膨胀土厚度为 110 mm, 密度控制为 1.35 g/cm^3 , 含水率 23%; 下层砂土厚度为 190 mm, 密度控制为 1.70 g/cm^3 , 采用分层击实方法制作模型。

重塑膨胀土的渗透系数极低, 为了模拟现实中存在的裂隙, 加快雨水渗入, 设置两层水平砂层 (每层 10 mm 厚) 和竖向砂井, 将膨胀土分为 3 层, 每层厚度为 30 mm。降雨后雨水先浸湿表面膨胀土, 同时沿竖向砂井进入水平砂层, 并通过多个渗透面向膨胀土内部渗透, 实现浸湿深度与工程实际接近。

本试验中模型桩的直径 d 为 19 mm, 离模型箱长边 90.5 mm, 约 $4.5d$; 距模型箱短边 140.5 mm, 约 $7d$; 两模型桩间距为 300 mm, 大于 15 倍桩径。试验中桩受模型边界和相邻桩影响很小, 可以认为是单桩条件。

1.5 浸水设计

内罗毕一年有两次雨季, 三月到五月的长雨季和十月到十二月的短雨季。雨季每月降雨超过 20 d, 日降雨量最高达 100 mm, 等效至离心机模型中降雨强度为 3.9 mm/min 。

采用自主设计制作的离心机降雨装置 (如图 3) 实现离心机运转过程中的降雨控制。该降雨装置通过电磁阀控制水流开闭, 并使用水箱加压系统控制降雨速度。降雨装置上安装 3 个相同的喷头, 每个喷头喷洒区域为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 喷洒强度取为日最大降雨强度的一半, 即 2 mm/min 。

在离心机运转稳定后, 接通外置电源打开电磁阀, 并对水箱施加 0.25 MPa 压力, 形成降雨。降雨持续 30 min (原型时间为 52 d) 后, 关闭电磁阀继续运转 25 min (对应原型时间为 43 d), 见图 4。

2 浸水条件下的基桩工作性状分析

开展两组离心机试验, 通过埋置土压力盒、位移

传感器和应变片等 (图 2), 测定了地表位移、膨胀土的水平应力、桩头位移和桩身轴力等物理量, 以下为试验结果和分析。

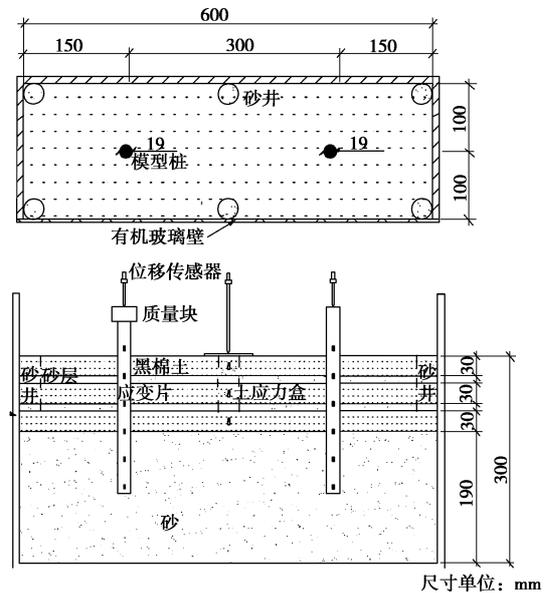


图 2 试验模型设计

Fig. 2 Design of centrifuge test model



图 3 自主设计制作的降雨装置

Fig. 3 Self-developed rainfall control facility



图 4 制作完成的模型顶面和侧面

Fig. 4 Top and side views of completed model

2.1 地表位移

图 5 为不同的分级加速度下, 两组离心机试验的地表沉降曲线; 图 6 为降雨过程中两组试验的地表隆起位移曲线。离心机加速过程中地表沉降约 160 mm, 每 10g 产生的地表沉降约为 33 mm; 降雨过程中土体隆起约 150 mm。

膨胀土渗透系数极低, 雨水入渗慢, 试验中形成了地表积水, 在停雨后水的入渗和土体膨胀仍继续发展。降雨 52 d 时, 土体隆起约为 100 mm, 而在停雨

后的 40 d 里, 土体表面的隆起量也超过 50 mm。

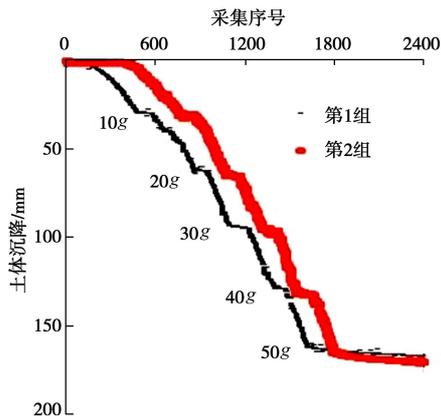


图 5 离心机加速过程中地表位移曲线

Fig. 5 Surface settlements during acceleration

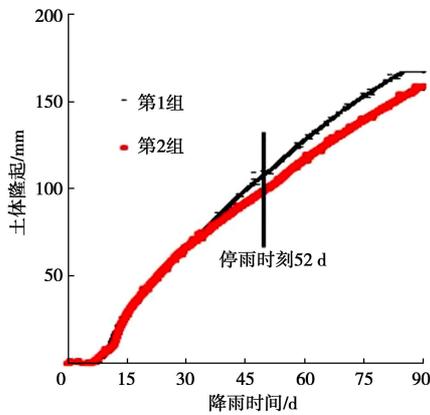


图 6 降雨过程中地表位移曲线

Fig. 6 Surface heaves during rainfall

两组离心机试验的曲线趋势几乎相同, 说明试验条件基本一致, 4 根模型桩的行为具有可比性。

2.2 膨胀土水平应力

通过埋设土压力盒, 测量不同深度的膨胀土水平应力变化。第 1 组试验在 3 m 和 5 m 深度各埋置一枚土压力盒, 第 2 组试验在 1 m 和 3 m 深度各埋置两枚土压力盒。降雨过程中水平应力变化如图 7 所示。

随着雨水的入渗, 膨胀土发生体积膨胀, 在侧限条件下, 水平方向的膨胀受到约束, 水平应力增大。1 m 处的浅部膨胀土水平应力增大最为明显, 超过 50 kPa; 在稍深的 3 m 深度, 膨胀土的水平应力也增加了 30 kPa 以上; 由于雨水未渗入至 5 m 深度的膨胀土中, 该处土体的水平应力变化不大。

2.3 桩头位移

离心加速过程中, 4 根模型桩沉降不断增加, 如图 8 所示。在 50g 条件下, 基准桩发生 42.4 mm 的沉降; 无荷载桩的沉降为 28.9 mm, 仅为基准桩的 68%; 隔胀桩的沉降有所增加, 为 50.5 mm; 短桩的沉降最大, 达到 71.0 mm, 比基准桩大 67.4%。

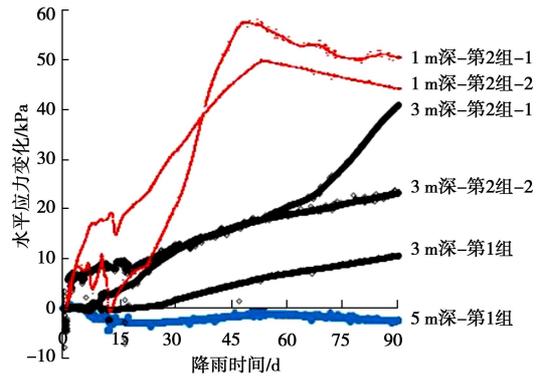


图 7 降雨过程中土体水平应力曲线

Fig. 7 Horizontal stresses of soil during rainfall

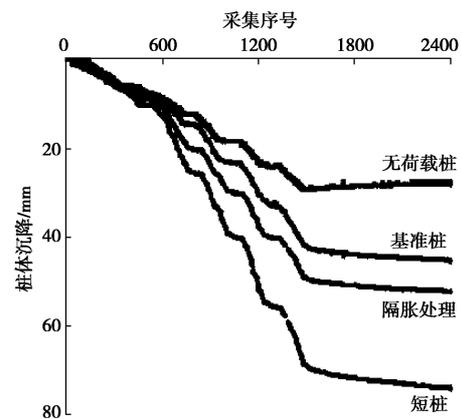


图 8 离心机加速过程中桩头位移曲线

Fig. 8 Settlements of pile head during acceleration

图 9 为降雨过程中 4 根模型桩的沉降发展曲线。由于桩周土层在雨水自重的作用下整体被压缩, 4 根桩均沉降增加。基准桩发生的沉降最大, 达到 27.1 mm; 其次为隔胀处理, 为 12.3 mm; 短桩发生 7.7 mm 的沉降, 不到基准桩的 1/3; 无荷载桩的沉降最小, 仅为 1.8 mm, 且在停雨后桩被明显上拔。

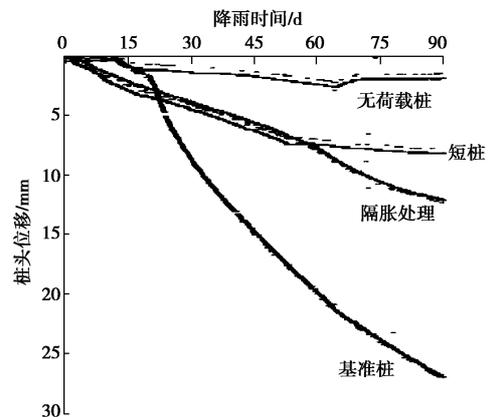


图 9 降雨过程中桩头位移曲线

Fig. 9 Settlements of pile head during rainfall

从图 10 可以看出, 浸水条件下不同荷载作用下桩位移变化规律不同。荷载为 625 kN 的基准桩则由于土体弱化, 发生 14.8 mm 的沉降, 而无荷载桩受到土体

胀拔作用，发生较大的上拔位移，达到 10.5 mm。荷载较大即便膨胀土浸水时，桩仍然发生沉降，这在文献中较少报道。短桩大部分锚固在膨胀土里，在浸水过程中发生 4.0 mm 的上拔位移。

产生桩位移主要因素有：膨胀土浸水后摩阻力变化、雨水自重造成土体压缩等。为了分析膨胀土浸水的影响，需要将次要因素的影响分离。本文将膨胀桩作为对照组，认为其不受膨胀土浸水摩阻力变化的影响，用图 9 中基准桩、无荷载桩和短桩的沉降数据均扣除隔胀桩的沉降，得到桩头位移曲线如图 10 所示。

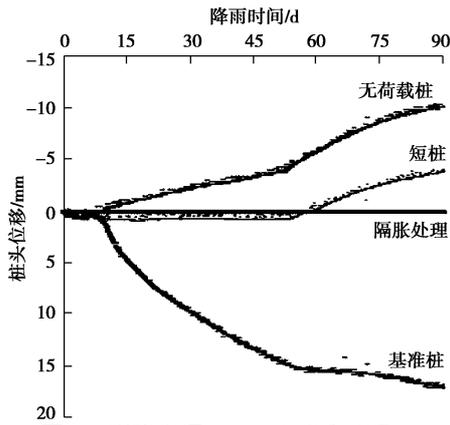


图 10 膨胀土浸水对桩头位移的影响

Fig. 10 Effects of submerging expansive soil on displacements of pile head

2.4 桩身轴力

在浸水过程中，桩身应变均呈现出先增大后减小

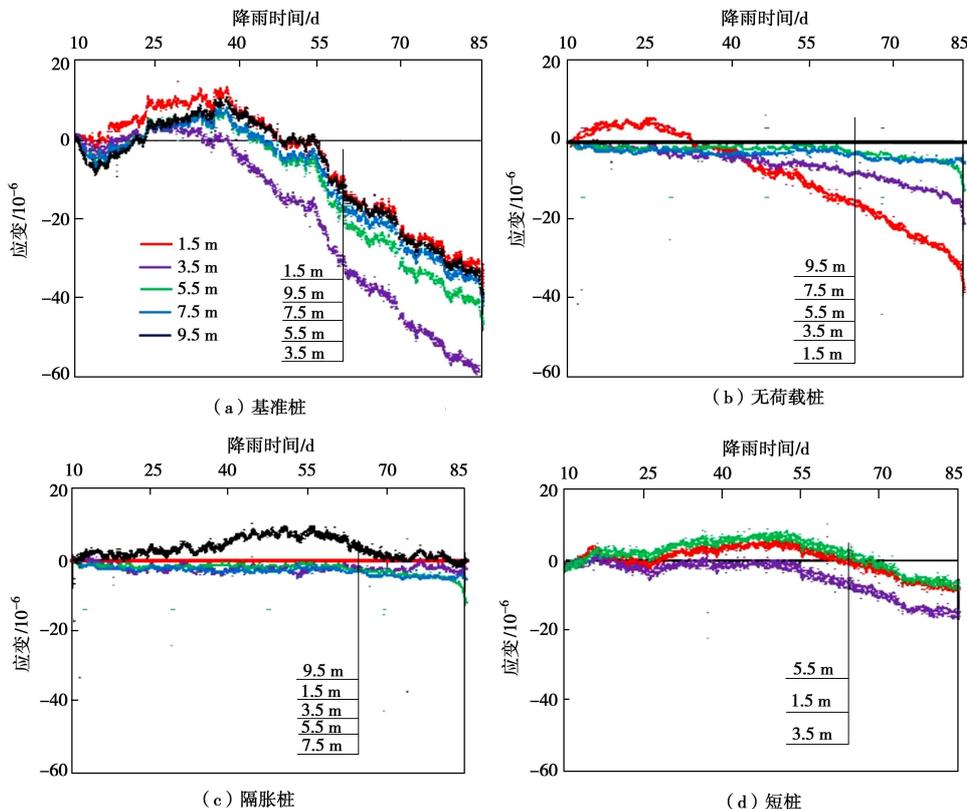


图 11 降雨过程模型桩在不同深度的应变曲线

Fig. 11 Strains of piles at different depths during rainfall

的变化趋势，如图 11 所示。因此将桩的轴力发展分为前期土体刚度降低和后期胀拔两个阶段。前期的土体刚度降低阶段：膨胀土浸水后发生刚度降低，提供的摩阻力降低，桩身轴力和轴应变增加。后期的胀拔阶段：膨胀土浸水隆起产生胀拔作用，并由于下层土的锚固作用，在桩的内部形成附加拉力，桩身轴力和轴应变减小。

对于桩长 10 m、荷载 625 kN 的基准桩，初期土体刚度降低阶段产生的轴向应变达 13×10^{-6} ，并在降雨 33 d 进入后期的胀拔阶段，应变减小至 -60×10^{-6} 。

对于无荷载桩，初期土体刚度降低阶段引起轴向应变相比基准桩较小，仅为 4×10^{-6} ，并在降雨 18 d 进入后期的胀拔阶段，相比基准桩提前 15 d。胀拔阶段无荷载桩的应变变为 -35×10^{-6} 。

对于 6 m 短桩，初期土体刚度降低阶段产生的轴向应变为 7×10^{-6} ，并在降雨 48 d 进入后期的胀拔阶段，相比基准桩推后 15 d。胀拔阶段短桩的应变减小为 -16×10^{-6} 。

对于隔胀桩，浸水引起的应变变化很小，在 9.5 m 深度变化不到 10×10^{-6} ，其他位置变化基本变化为 0。

模型桩刚度为 9.1 GPa，由此可以得到在降雨 30 d、52 d（停雨时刻）和 85 d 时模型桩的轴力分布曲线，如图 12 所示。在降雨 85 d 时刻，4 根模型桩的附加轴力为拉力，且均呈现出中间大、两头小的趋势。

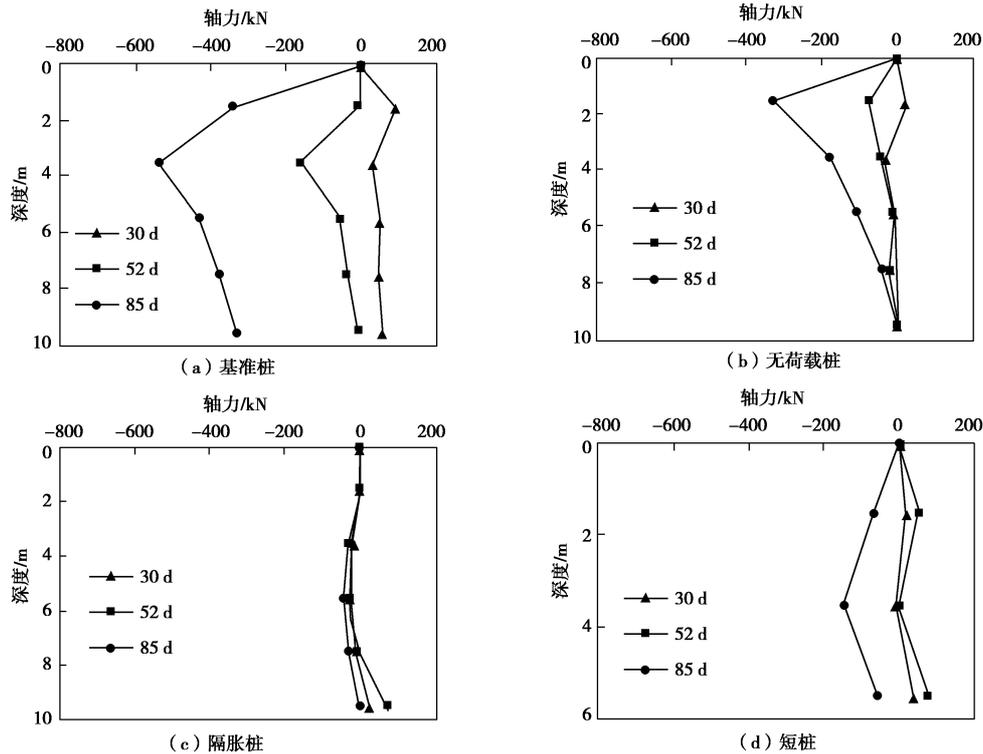


图 12 不同降雨时间模型桩的轴力分布曲线

Fig. 12 Distribution of axial forces of piles at different rainfall time

浸水后膨胀土膨胀隆起,对桩形成向上的胀拔力,桩的轴向拉力随深度不断增加;深层土体对桩产生锚固作用,阻止桩的上拔,形成向下的摩阻力,桩的轴向拉力随深度不断减小,由此形成中间大、两头小的典型轴力分布模式。这种分布模式在理论和试验^[13,17]中均得到了验证。

浸水引起基准桩的轴力变化最大达-540 kN,对应的深度为 3.5 m。无荷载桩由于发生了较大的上拔位移,与膨胀土的相对位移较小,胀拔力较小,最大为-330 kN,对应深度为 1.5 m。短桩与无荷载桩相似,较大的上拔位移使得膨胀土胀拔提供的胀拔力较小,仅为-150 kN,对应深度为 3 m。

隔胀桩在 30 d, 52 d 和 85 d 的轴力变化小于 100 kN,表明在膨胀土地基中采用桩基隔胀措施,可以很好地消除浸水的影响,建议在工程中采用。

3 结 论

(1) 膨胀土浸水膨胀将导致土体的水平应力增加,试验中 1 m 深度处水平应力增加超过 50 kPa,而 3 m 深度达到 30 kPa。

(2) 浸水条件下,桩头位移变化与桩顶荷载密切相关:试验中无荷载桩产生 10.5 mm 的上拔位移,而 625 kN 的基准桩产生 14.8 mm 沉降。

(3) 浸水条件下桩的轴力变化分为两个阶段:

前期土体刚度降低,膨胀土对桩提供的摩阻力降低,桩身轴力增加;后期胀拔,膨胀土膨胀隆起产生胀拔力,桩身轴力减小。

(4) 浸水引起基准桩的附加胀拔力达 540 kN;无荷载桩和短桩附加胀拔力较小,分别为 330 kN 和 150 kN。

(5) 建议在膨胀土地基中采用桩基隔胀措施,可以很好地消除浸水带来的影响。

本模型试验采用的是重塑土,未能考虑原状膨胀土的结构性、裂隙性和超固结性等^[18],应用中需注意其适用范围。

参考文献:

- [1] RAMESH H N, KRISHNA K V M, MAMATHA H V. Compaction and strength behavior of lime-coir fiber treated Black Cotton soil[J]. Geomechanics & Engineering, 2010, 2(1): 19 - 28.
- [2] 张大峰, 杨 军, 李连友, 等. 东非地区黑棉土工程特性和桩基病害处理[J]. 建筑结构, 2015, 45(1): 72 - 76. (ZHANG Da-feng, YANG Jun, LI Lian-you, et al. Engineering properties of black cotton soil in East Africa and pile foundation disease treatment[J]. Building Structure, 2015, 45(1): 72 - 76. (in Chinese))
- [3] 黄 卫, 钟 理, 钱振东. 路基膨胀土胀缩等级的模糊评

- 判[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(4): 408 - 413. (HUANG Wei, ZHONG Li, QIAN Zhen-dong. Fuzzy judgment about the grade of shrink and expansion for the expansive soil in the subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(4): 408 - 413. (in Chinese))
- [4] 郑健龙, 杨和平. 公路膨胀土工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (ZHENG Jian-long, YANG He-ping. Highway expansive soil engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [5] MANELI A, KUPOLATI W K, ABIOLA O S, et al. Influence of fly ash, ground-granulated blast furnace slag and lime on unconfined compressive strength of black cotton soil[J]. Road Materials & Pavement Design, 2015, **17**(1): 1 - 9.
- [6] 肖宏彬, 苗 鹏. 膨胀土地基中大比例模型桩浸水试验研究[J]. 自然灾害学报, 2007, **16**(6): 122 - 127. (XIAO Hong-bin, MIAO Peng. Soaking test of a large-scale modelling pile embedded in expansion soil ground[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, **16**(6): 122 - 127. (in Chinese))
- [7] GB50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 2013. (GB50112—2013 Technical code for buildings in expansive soil regions[S]. 2013. (in Chinese))
- [8] NELSON J D, THOMPSON E G, SCHAUT R W, et al. Design procedure and considerations for piers in expansive soils[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(8): 945 - 956.
- [9] DONALDSON G W. The use of small-diameter piles in expansive soil[M]. South African Council for Scientific and Industrial Research, 1967.
- [10] 王年香, 顾荣伟, 章为民, 等. 膨胀土中单桩性状的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(1): 56 - 60. (WANG Nian-xiang, GU Rong-wei, ZHANG Wei-min, et al. Model tests on behaviour of single pile in expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(1): 56 - 60. (in Chinese))
- [11] 吴志伟, 宋汉周, 王宏宇, 等. 膨胀土中基桩胀拔力原型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(增刊 2): 173 - 177. (WU Zhi-wei, SONG Han-zhou, WANG Hong-yu, et al. Prototype experimental study of expansive force of pile embedded in expansive soil[J]. Rock & Soil Mechanics, 2012, **33**(S2): 173 - 177. (in Chinese))
- [12] 谢立安. 浸水膨胀土对桥梁桩基承载力与摩阻力影响的研究[J]. 中外公路, 2013, **33**(3): 193 - 196. (XIE Li-an. Influence of submerging to the bearing capacity and friction resistance of bridge piles[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, **33**(3): 193 - 196. (in Chinese))
- [13] XIAO H, ZHANG C, WANG Y, et al. Pile-soil interaction in expansive soil foundation: analytical solution and numerical simulation[J]. International Journal of Geomechanics, 2011, **11**(3): 159 - 166.
- [14] 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))
- [15] 杜延龄. 大型土工离心机基本设计原则[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(6): 10 - 17. (DU Yan-ling. Fundamental design principles of large geotechnical centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(6): 10 - 17. (in Chinese))
- [16] JGJ94—2008 建筑桩基规范[S]. 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [17] 张春顺. 膨胀土地基中桩的荷载传递特性研究[D]. 长沙: 湖南工业大学, 2006. (ZHANG Chun-shun. Research on load transfer character of pile in expansive soil foundation[D]. Changsha: Hunan University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [18] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201 - 272. (in Chinese))