

湿陷性黄土场地竖向承载灌注桩浸水试验研究

张磊^{1,2}, 罗少锋^{1,2}, 鲁洁^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究自重湿陷性黄土场地中钻孔灌注桩的竖向承载性状, 开展了 3 根试桩在天然、先加载后浸水和预浸水 3 种工况下的静载荷试验。试验结果表明, 桩顶沉降随桩顶荷载的增加而增大, 桩侧摩阻力随桩土相对位移的增加而增大, 某些深度处桩侧摩阻力在达到峰值后甚至减小。桩顶荷载传至桩底后桩端反力随桩顶荷载的增加而增大, 其变化速率逐渐增大。在本试验小试坑浸水及场地地层条件下, 桩顶未施加荷载时桩侧未产生负摩阻力; 桩顶维持 4 000 kN 荷载不变时桩周土体浸水湿陷, 桩侧正摩阻力减小, 桩顶沉降增大, 但也未在桩侧产生负摩阻力。桩周土体浸水软化, 其所能提供的最大侧摩阻力减小。

关键词: 桩基础; 湿陷性黄土; 浸水试验; 竖向荷载; 侧摩阻力

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0532-06

Immersion tests on vertically loaded cast-in-place piles in collapsible loess

ZHANG Lei^{1,2}, LUO Shaofeng^{1,2}, LU Jie^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Field tests were conducted to investigate vertical bearing behaviors of the cast-in-place pile in collapsible loess site under natural, post-soaked and pre-soaked conditions. Test results show that the settlement at pile top increases when the vertical load applied at pile top increases. The skin friction increase with the increase of the relative displacement between pile and soil, while at some depths, they even decrease after reaching their peaks. The pile tip resistance increases with the increase of the vertical load after the applied load was transferred to pile tip, and the changing rate increases gradually. On conditions of the relatively small soaking pit and the stratum of the test site, there is no occurrence of the negative skin friction during soaking with no vertical load applied at pile top. When maintaining a 4 000 kN load at pile top, after soaking the loess around pile collapses, the positive skin friction decreases, and the settlement at pile top increases, while the negative skin friction does not occur. The loess was softened after soaking, leading to the decrease of the maximum skin friction provided by it.

Key words: pile foundations; collapsible loess; immersion test; vertical loads; skin friction

随着我国经济建设的快速发展, 修建于湿陷性黄土场地的高层建筑、大荷载构筑物、高速公路、高速铁路等越来越多; 这些工程荷载较大或对沉降要求较高, 桩基础为其主要基础形式^[1]。由于地下管道破坏长期漏水、建筑物地面经常受水浸湿或大面积积水、农田灌溉及各种水利设施的兴建等原因, 湿陷性黄土场地有受水浸湿的可能性^[2]。很多学者^[3-4]通过现场浸水试验对黄土的湿陷特性展开研究, 并得到一些有益的结论。湿陷性黄土在天然含水量下工程性质良好, 浸水后发

生湿陷变形使桩侧产生负摩阻力; 负摩阻力对桩产生下拉作用, 不但不会对施加于桩顶的竖向荷载起抵抗作用, 反而导致桩基承载力下降, 桩身沉降增大^[5]。刘争宏等^[6]和刘明振^[7]分别提出了黄土浸水湿陷使桩侧产生负摩阻力时单桩和群桩的沉降计算方法; 李晋等^[8]建立了有限元模型, 并分析了黄土湿陷特性对桩基竖向承载性状的影响规律; 王长丹等^[9]利用重塑黄土代替原状黄土, 通过离心模型试验分析了基桩负摩阻力分布规律和中性点位置的变化规律。由于目前研究浸水条件下

收稿日期: 2018-05-18

修改稿日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508455); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-232); 西安建筑科技大学青年科技基金项目(QN1614)

第一作者: 张磊(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要研究桩基础。E-mail: zh888lei@163.com

湿陷性黄土地桩基竖向承载的计算方法和室内试验尚不成熟, 现场试验仍是最有效的研究手段. 黄雪峰等^[10]结合宁夏扶贫扬黄工程, 研究了自然状态下及浸水条件下大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩竖向承载性状. 曹卫平等^[11]研究了湿陷性黄土地基中人工挖孔扩底灌注桩在先加载后浸水和预浸水条件下桩身摩阻力、桩端反力及桩身中性点深度的发展变化规律, 并将试验结果与我国现行规范的规定进行对比. 宗雪梅等^[12]取消了浸水场地常用的浸水孔, 分析了自然条件下和浸水条件下桩顶沉降、桩侧摩阻力及桩端反力的发展规律, 发现浸水湿陷时全厚黄土层内桩侧摩阻力并非全为负值; 而朱彦鹏等^[13]采用直径为 2 m 的小直径试坑浸水, 并在桩身上钻注水孔, 在注水孔不同深度处设置若干个渗水孔以向桩周黄土浸水, 试验结果发现桩身正、负摩阻力交替出现. 刘飞等^[14]在自重湿陷性黄土地(经由室内试验结果判定)上研究了天然、预湿、后湿三种工况下 PHC 管桩的竖向承载性状, 但在试验中并未检测出桩侧负摩阻力, 指出根据室内试验结果判定场地湿陷类型并不可靠; 而李大展等在非自重湿陷性黄土地(经由现场实测结果判定)的浸水试验结果^[15]表明, 扩底灌注桩的桩侧负摩阻力及由浸水引起的桩顶附加沉降仍较为显著, 且施加垂直荷载的桩顶附加沉降量比无垂直荷载作用的桩大得多. 由现有的研究成果可以看出, 虽然目前湿陷性黄土地桩基竖向承载现场浸水试验研究已有很多, 但浸水方法和黄土湿陷性评价方法尚不成熟, 浸水条件下桩基竖向承载规律尚未被研究人员和设计人员掌握. 因此, 有必要继续对不同的黄土地及不同的桩型采用不同的浸水方法开展现场试验研究.

本文通过对自重湿陷性黄土地中 3 根钻孔灌注桩在天然、先加载后浸水和预浸水 3 种工况下的静载荷试验, 分析了加载及浸水过程中桩顶沉降、桩身轴力、桩侧摩阻力及桩端反力等的发展变化规律, 所得成果可为类似工程设计提供参考.

1 试验概况

1.1 试验场地地质条件

试验场地位于陕西省铜川市董家河循环经济示范园区内, 地貌属渭北黄土塬, 塬面地形平坦、开阔. 场地地下水为孔隙型潜水和基岩裂隙水, 埋藏较深, 本次试验不受其影响. 地层结构在地面以下 45 m 以内均为黄土与古土壤的互层, 其中

上部 6.8 m 为马兰黄土, 下部为离石黄土. 自上而下, 各土层物理性质指标如表 1 所示. F5 层及以下地层可不考虑湿陷性. 试桩附近自重湿陷量计算值为 635 mm, 总湿陷量计算值为 1 814 mm; 由此判定场地湿陷类型为自重湿陷性黄土地, 地基湿陷等级为 IV 级, 湿陷程度很严重.

表 1 地基土物理性质指标汇总表
Tab. 1 Physical properties of soils

层号	岩性	厚度/m	w/%	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e	I_L
L1	黄土	5.30	16.2	14.7	1.130	-0.179
F1	古土壤	1.50	17.3	15.9	1.007	-0.145
L2	黄土	4.50	14.4	15.3	1.123	-0.376
F2	古土壤	1.70	18.3	16.2	0.983	-0.019
L3	黄土	4.50	16.6	16.0	0.968	-0.149
F3	古土壤	1.60	19.2	17.0	0.906	0.078
L4	黄土	2.20	19.6	16.8	0.922	0.170
F4	古土壤	1.90	20.2	17.5	0.868	0.096
L5	黄土	4.10	18.6	17.2	0.865	0.039
F5	古土壤	4.25	19.3	17.6	0.828	0.084
L6	黄土	9.65	19.4	18.0	0.791	0.130
F6	古土壤	2.30	20.3	18.3	0.775	0.214
L7	黄土	1.50	18.3	18.0	0.784	0.020

1.2 试验方案

试验采用锚桩横梁式. 共安排试桩 3 根, 排列成“一”字形, 编号依次为 A1、A2 和 A3, 直径均为 800 mm, 桩长为 41.5 m, 桩端持力层为 F6 古土壤, 混凝土强度等级为 C35. 安排锚桩 8 根, 桩径为 800 mm, 桩长为 41 m, 混凝土强度等级为 C35. 锚桩分为两排, 每排 4 根, 与试桩平行排列, 且试桩位于相邻 4 根锚桩的中心处. 相邻试桩及相邻锚桩之间的间距均为 5 m, 锚桩排距为 5 m, 相邻试桩与锚桩之间的距离为 3 536 mm. 试桩和锚桩均为干作业旋挖钻孔灌注桩. 低应变测试结果表明试桩和锚桩均为基本完整桩, 即桩身缺陷轻微, 不会影响桩身结构承载力的正常发挥.

试验选取 A2 和 A3 两根试桩进行桩周土浸水. 由于工期紧迫, 只在桩周小范围内浸水. 浸水坑形状为以桩体中心为圆心的圆形, 直径为 2 m, 坑深 1 m. 试坑内均匀布置直径为 78 mm、深度为 20 m 的渗水孔 4 个, 孔内填充粒径为 5~20 mm、含泥量小于 1% 的砂砾石. 浸水坑坑底铺设 30 cm 厚的卵砾石层, 粒径 5~20 mm, 含泥量小于 1%.

试验加载方式为慢速维持荷载法. A1 试桩在桩周土为天然状态下分级施加至 11 000 kN, 然后分级卸荷到零. A2 试桩先加载至 4 000 kN, 桩沉降稳定后在桩周连续浸水 7 d, 继续加载至 11 000 kN 然后分级卸荷到零, 试验过程中继续浸水. A3 试桩先在桩周连续浸水 14 d, 在继续浸水的情况下加载至 12 000 kN, 然后分级卸荷到零. 在 A2 和 A3 试桩主筋不同部位的断面上对称安装 2 只钢筋应力计, 钢筋计的设置间距根据地层分布确定, 埋设位置如图 1 所示, 每根桩共设置钢筋应力计 28 个. 静载试验开始前测量一次钢筋计读数, 作为初读数, 以后每级荷载下桩沉降稳定后进行测量; 浸水期间每隔一定时间测量一次. 根据测量结果, 可以计算得到桩侧摩阻力、桩身轴力及桩端反力.

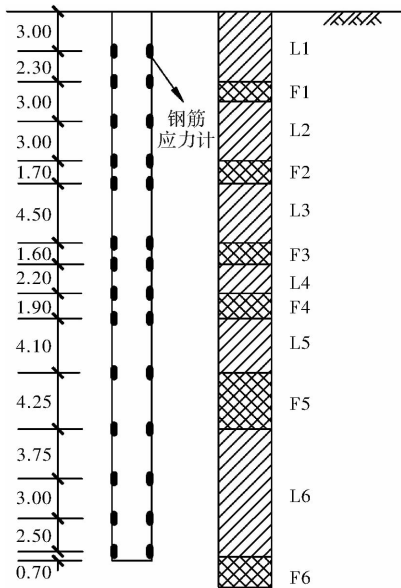


图 1 钢筋应力计埋设截面(单位: m)

Fig. 1 Layout of stress meters for steel bars (unit: m)

2 试验结果及分析

2.1 桩顶沉降特征

A1、A2 和 A3 试桩的桩顶沉降 s 与荷载 Q 关系曲线如图 2 所示. 考虑设计要求荷载及设备疲劳原因, A1 和 A2 试桩加载至 11 000 kN, A3 试桩加载至 12 000 kN, 均未加载至桩体破坏. 由图 2 可见, 当荷载较小时, 三根试桩的桩顶沉降 s 随荷载 Q 的增加均成线性增长; 随着荷载的继续增加, 沉降增速逐渐增大, $Q \sim s$ 曲线呈非线性. 当加载至 11 000 kN 时, A1 试桩的沉降为 17.58 mm, A2 试桩由于桩周土体浸水沉降达到 27.29 mm, 约为 A1 试桩的 1.55 倍. 同样由于桩周土体浸水的原因, A3 试桩在加载至 12 000 kN 时沉降为

27.2 mm. 卸载到 0 时 A1、A2 和 A3 试桩的回弹变形分别为 11.04 mm、14.51 mm 和 14.84 mm, 回弹变形均较大. A2 试桩在荷载为 4 000 kN 的浸水期间, 沉降由 6.21 mm 增至 8.13 mm, 由桩身轴力检测结果表明, 这主要是由于浸水期间桩身上部桩侧正摩阻力减小, 桩身压缩量增大所致. 由于 A3 试桩在荷载为 0 的浸水期间基本未检测到桩侧负摩阻力, 该期间桩顶沉降为 0.

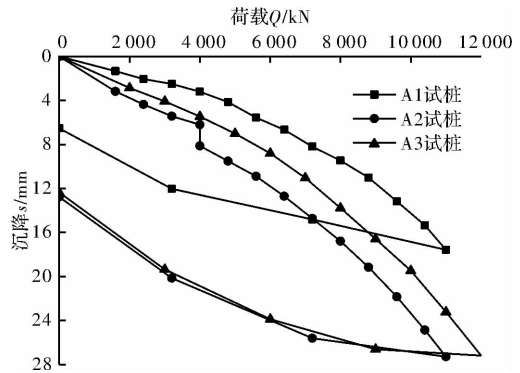


图 2 荷载-沉降曲线

Fig. 2 Load-settlement curves

2.2 浸水期间桩侧摩阻力和桩身轴力演化特征

A3 试桩在桩顶未施加竖向荷载的情况下浸水, 钢筋应力计测试结果表明桩侧基本未出现负摩阻力, 通过观察桩周土也未发现裂缝等浸水湿陷土层具有的外部特征, 因此在本试验小试坑浸水及场地地层条件下, 桩周土层未受到附加应力时浸水未产生湿陷变形, 从而在桩侧也未产生负摩阻力. A2 试桩在桩顶维持 4 000 kN 荷载不变的情况下浸水, 浸水期间桩身轴力及桩侧摩阻力随浸水时间的发展演化规律如图 3 所示. 由图 3 可见, 随着浸水时间的增加, 桩周土层在附加应力的作用下逐渐浸水湿陷, 桩身上部桩土相对位移逐渐减小, 桩侧正摩阻力逐渐减小, 且其变化的速率逐渐减小, 由此导致桩身上部轴力逐渐增大, 且其变化的速率也逐渐减小. 由于桩身上部轴力增大, 桩身中部沉降增大并超过土体湿陷变形, 致使桩侧摩阻力随浸水时间的增加而增大, 但其变化速率逐渐减小; 桩身中部轴力也稍有增大. 由于桩身中部轴力增加, 且 F5 层及以下地层可不考虑湿陷性, 随浸水时间的增加桩身下部桩土相对位移增大, 桩侧摩阻力和桩身轴力也均稍有增加. 由此可以看出, 在本试验小试坑浸水及场地地层条件下, 桩周土层在附加应力的作用下虽有湿陷变形发生, 但湿陷变形量并不大, 并未使桩侧产生负摩阻力, 桩身轴力的最大值仍位于桩顶.

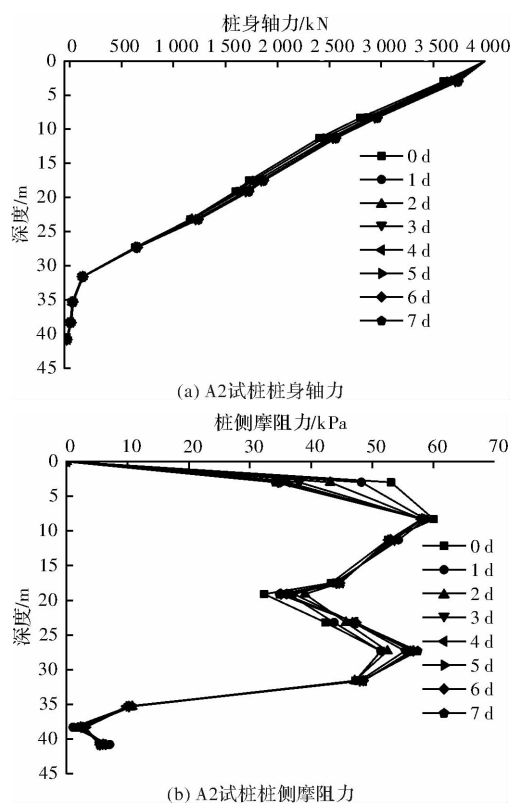


图3 浸水期间 A2 试桩承载性状-时间关系曲线
Fig. 3 Bearing behaviors of No. 2 pile-time curves during immersing

2.3 加载过程中桩身轴力、桩侧摩阻力及桩端反力演化特征

加载过程中 A2 试桩和 A3 试桩的桩身轴力和桩侧摩阻力沿深度的分布分别如图 4 和图 5 所示, 桩端反力与桩顶荷载的关系如图 6 所示. 由图 4 和图 5 可见, 当荷载逐步施加于桩顶, 桩身压缩并相对于桩周土产生向下的位移, 桩周土为抵抗桩土相对位移而对桩侧表面施加向上的摩阻力, 也即正摩阻力, 致使桩身轴力沿深度逐渐递减. 当桩顶荷载较小时, 桩身上部轴力沿深度衰减的很快, 桩顶荷载主要由桩身上部的侧摩阻力承担. 随着桩顶荷载的增加, 桩身上部的侧摩阻力逐渐增大并稳定下来, 某些深度处桩侧摩阻力在达到峰值后甚至随桩土相对位移的增加而减小, 此时桩身轴力逐渐向下传递, 桩身中下部的侧摩阻力也开始发挥, 并最终传至桩底, 这点从图 6 可以看出, 至此桩顶荷载由桩侧摩阻力和桩端反力共同承担. 由于 A2 试桩在桩顶维持 4 000 kN 荷载不变的情况下浸水, 桩周土体软化, 在后续的加载过程中, 桩身上部的侧摩阻力明显减小. 由于 A3 试桩在桩顶施加竖向荷载之前浸水, 相同荷载下桩身上部的侧摩阻力比未浸水条件下同一深度处 A2 试桩的

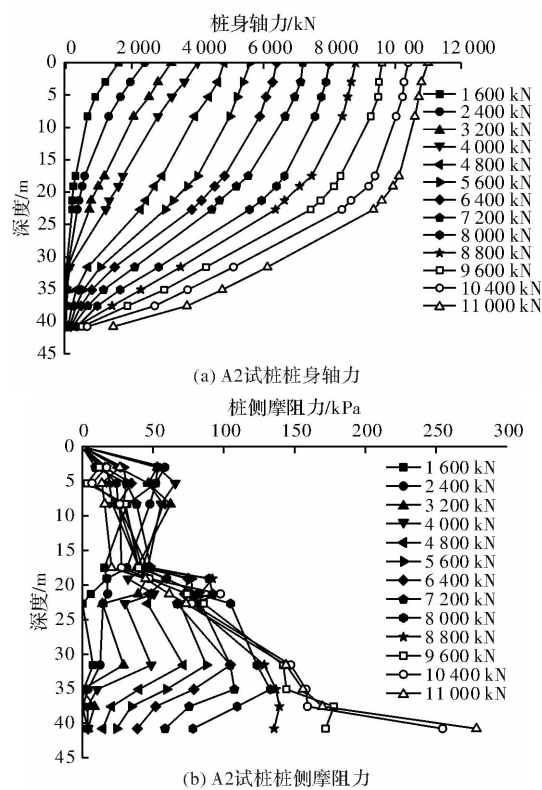
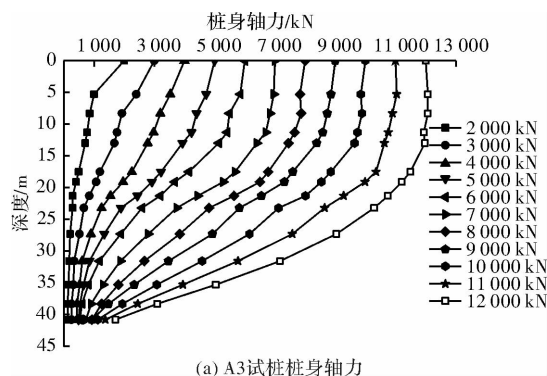


图4 加载过程中 A2 试桩桩身轴力和桩侧摩阻力沿深度分布
Fig. 4 Distributions of axial force and skin friction of No. 2 pile along depth during loading

侧摩阻力小. 由图 6 可见, A2 试桩在桩周浸水并且桩顶荷载超过 4 000 kN 的情况下桩端才开始承担荷载, 且桩端反力随桩顶荷载的增加而增大, 其变化速率随桩顶荷载的增加而增大, 在桩顶荷载施加的后期桩端反力随桩顶荷载的增加而急剧增大. A3 试桩的桩端在桩顶荷载为 3 000 kN 时就承担荷载, 随后 A3 试桩的桩端反力随桩顶荷载的增加而增大, 其变化速率也随桩顶荷载的增加而增大. 桩顶荷载小于 5 000 kN 时, A3 试桩的桩端反力比 A2 试桩的桩端反力大; 桩顶荷载超过 5 000 kN 时, A2 试桩的桩端反力比 A3 试桩的桩端反力大.



(a) A3 试桩桩身轴力

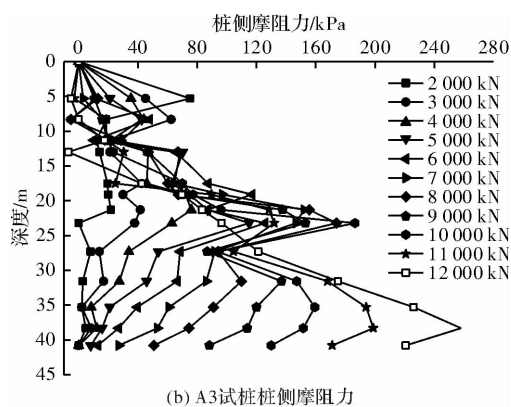


图5 加载过程中 A3 试桩桩身轴力和桩侧摩阻力沿深度分布

Fig. 5 Distributions of axial force and skin friction of No. 3 pile along depth during loading

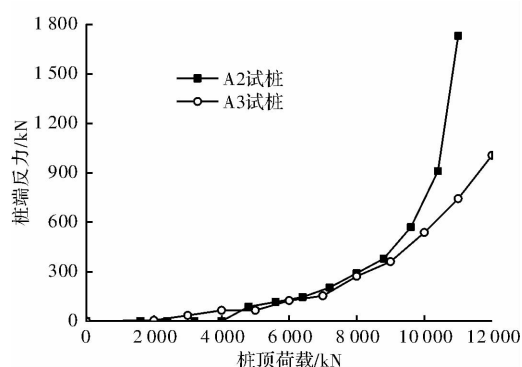


图6 桩端反力-桩顶荷载关系曲线

Fig. 6 End reaction-load curves

3 结论

在天然、先加载后浸水和预浸水 3 种工况下,对自重湿陷性黄土场地中的 3 根旋挖钻孔灌注桩进行静载荷试验,通过分析加载及浸水过程中桩顶沉降、桩身轴力、桩侧摩阻力及桩端反力等的发展变化规律,得到以下主要结论:

(1)随着桩顶荷载的增加,桩顶沉降逐渐增大,其变化速率在初始段为常值,后半段逐渐增大。桩身轴力逐渐向深部传递,桩身上部的侧摩阻力随桩土相对位移的增加而增大并稳定下来,某些深度处桩侧摩阻力在达到峰值后甚至减小。桩身轴力最终传至桩底,且浸水条件下比未浸水条件下桩身轴力先传至桩底。桩端反力随桩顶荷载的增加而增大,其变化速率随桩顶荷载的增加而增大。

(2)浸水使桩周土体软化,导致桩周土所能提供的最大侧摩阻力减小,相同荷载作用下浸水时桩顶沉降比未浸水时桩顶沉降大得多。

(3)在本试验小试坑浸水及场地地层条件下,

桩周土层未受到附加应力时浸水未产生湿陷变形,从而在桩侧未产生负摩阻力,浸水期间桩顶沉降为 0;桩顶维持 4 000 kN 荷载不变的情况下浸水,随着浸水时间的增加,桩身上部正摩阻力减小而轴力增大,桩顶沉降增大,但也未在桩侧检测到负摩阻力,桩身轴力的最大值仍位于桩顶。

参考文献 References

- [1] 刘争宏. 浸水条件下湿陷性黄土场地桩基特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
LIU Zhenghong. Study on characteristics of piles in collapsible loess sites under water immersion condition [D]. Xi'an, Xi'an University of Technology, 2008.
- [2] 何颐华, 闵连太. 湿陷性黄土地基桩的负摩阻力问题[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(6): 69-77.
HE Yihua, MIN Liantai. Problems on negative friction of pile foundation in collapsible loess region[J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(6): 69-77.
- [3] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65-74.
YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65-74.
- [4] 武小鹏, 熊治文, 王小军, 等. 郑西高速铁路豫西段黄土现场浸水自重湿陷特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1769-1773.
WU Xiaopeng, XIONG Zhiwen, WANG Xiaojun, et al. Study of immersion collapsible characteristics under overburden pressure of western Henan loess along Zhengzhou-Xi'an high-speed railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1769-1773.
- [5] 齐静静, 徐日庆, 龚维明. 湿陷性黄土地区桩侧负摩阻力问题的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(S1): 881-884.
QI Jingjing, XU Riqing, GONG Weiming. Experimental study on negative skin friction resistance on piles in collapsible loess area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S1): 881-884.
- [6] 刘争宏, 郑建国, 张继文, 等. 湿陷性黄土地区桥梁桩基工后沉降计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 320-326.
LIU Zhenghong, ZHENG Jianguo, ZHANG Jiwen, et al. Method for post-construction settlement of pile foundation of bridges in collapsible loess area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 320-326.

- [7] 刘明振. 含有自重湿陷性黄土夹层的场地上群桩负摩擦力的计算[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 749-752.
- LIU Mingzhen. A calculation method of negative skin friction on the pile group in the self-weight collapsible loess stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 749-752.
- [8] 李晋, 谢永利, 冯忠居. 自重湿陷性黄土地区合理桩长初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1629-1634.
- LI Jin, XIE Yongli, FENG Zhongju. Study of the proper pile length in the self-weight collapsible loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1629-1634.
- [9] 王长丹, 王旭, 周顺华, 等. 自重湿陷性黄土与单桩负摩阻力离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3101-3107.
- WANG Changdan, WANG Xu, ZHOU Shunhua, et al. Centrifugal model tests on self-weight collapsible loess and negative skin friction of pile foundations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3101-3107.
- [10] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 338-346.
- HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 338-346.
- [11] 曹卫平, 赵敏. 黄土地基中人工挖孔扩底灌注桩负摩阻力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3167-3173.
- CAO Weiping, ZHAO Min. Experiment study of negative skin friction for man-made cast-in-situ belled piles in loess soil foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3167-3173.
- [12] 宗雪梅, 周新平, 狄谨. 湿陷性黄土层桩基侧摩阻力的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(6): 710-716.
- ZONG Xuemei, ZHOU Xinping, DI Jin. Tests in side friction around the pile collapsible loess layers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(6): 710-716.
- [13] 朱彦鹏, 赵天时, 陈长流. 桩基负摩阻力沿桩长变化的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 265-272.
- ZHU Yanpeng, ZHAO Tianshi, CHEN Changliu. Field tests on changes of pile negative friction along its length[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 265-272.
- [14] 刘飞, 郑建国. 湿陷性黄土地 PHC 桩浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2): 362-366.
- LIU Fei, ZHENG Jianguo. Immersion tests on PHC piles in collapsible loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 362-366.
- [15] 李大展, 滕延京, 何颐华, 等. 湿陷性黄土中大直径扩底桩垂直承载性状的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 11-21.
- LI Dazhan, TENG Yanjing, HE Yihua, et al. Vertical bearing behaviour of large diameter belled pile in collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 11-21.

(编辑 桂智刚)