

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.004



降雨过程对兰州黄土中桩基负摩阻力的影响

艾小平¹, 吴亚平¹, 舒春生², 余小龙², 高海平², 陈坤¹, 徐正伟¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃交通规划勘测设计院有限公司, 兰州 730030)

摘要:为了模拟预压工况下非连续降雨对兰州湿陷性黄土对桥梁桩基摩阻力影响,以自然渗透方式进行了现场试坑浸水试验。通过埋设钢筋计测算桩侧摩阻力,埋设水分探头测浸水深度。结果表明,浸水最大深度在 10 m 左右,且在该深度处含水率增量很小,说明浸水主要影响区域已在 10 m 之上。在整个实验过程中,桩侧负摩阻力始终存在,且其峰值随着荷载递增而增大。加载阶段,负摩阻力分布区间长与桩长比值约为 0.24,是一个变化的过程;卸载过程中,也存在负摩阻力,区间长与桩长的比值在 0.28~0.45 范围内波动。试验结果表明,首次降雨对桩基受力影响较大,较长时间的间断性二次降雨影响较小。负摩阻力区间比规范规定的小,在实际桩基设计时,既要充分考虑首次降雨的影响,又可以根据负摩阻力长度和适当调整桩长。

关键词:降雨;桩基;湿陷性黄土;现场试验;负摩阻力

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)05-0027-07

Effect of rainfall on negative frictional resistance of pile foundation in Lanzhou loess

Ai Xiaoping¹, Wu Yaping¹, Shu Chunsheng², Yu Xiaolong²,
Gao Haiping², Chen Kun¹, Xu Zhengwei¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China;

2. Gansu Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, P. R. China)

Abstract: To simulate the influence of non-continuous rainfall on the friction of pile foundation in Lanzhou collapsible loess, field test was carried out via natural infiltration method. The project measures the pile side friction by embedding the steel bar and the immersion depth by water probe. The results show that the maximum water immersion is about 10 meters, and the increase of water content below this depth is marginal. During the test, the negative friction resistance is taking effect, and its peak increases when the load increases. At the loading stage, the length of the negative friction resistance is about 0.24 times the pile length, subjected to certain fluctuation. During the unloading process, there is still negative friction resistance, and the interval length fluctuates within the range of 0.28 ~ 0.45 times the pile length. The results show that the initial rainfall has a significant influence on the pile foundation, and the effect of continuous intermittent rainfall is marginal. The actual negative friction resistance is much smaller than the threshold. Consequently for pile design, it is necessary to fully consider the impact of the initial rainfall.

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 甘肃省重大科技专项(1302GKDA009)

作者简介: 艾小平(1991-),男,主要从事桥梁桩基础研究, E-mail: 2276870117@qq.com。

Received: 2017-05-10

Foundation item: Major Scientific and Technological Special Project of Gansu Province(No. 1302GKDA009)

Author brief: Ai Xiaoping(1991-), main research interest: bridge pile foundation, E-mail: 2276870117@qq.com.

The pice length should also be adjusted based on the negative friction resistance.

Keywords: rainfall; pile foundation; collapsible loess; field test; negative friction

黄土是一种成分复杂的具有独特性状的土,是第四纪地质时期干燥条件下形成的多孔具有柱状节理的沉积物,主要成分是粉土颗粒(粒径 0.05~0.005 mm),约占 60%~70%,可溶盐含量高达 10%~30%,结构疏松,孔隙多而大,具有高压缩性^[1]。实践证明,黄土受到水的浸湿后,结构迅速破坏而产生显著的附加沉降,即湿陷^[2-3]。在实际生产生活中,如果将桩基修建在有明显湿陷性的黄土地区,桩侧土体遇水湿陷较大时,会对桩产生向下的拉力,即负摩阻力,这会极大地降低桩基的承载力。近些年,湿陷性黄土桩基负摩阻力导致的工程问题,引起了相关领域许多学者的关注^[4-9]。

虽然许多学者对湿陷性黄土桩基负摩阻力有研究,包括中国西北地区的一些科研机构 and 高校也做过此类试验,但仍存在一些问题^[10-14]。首先,在已有的大量研究中,如朱彦鹏等^[13]关于负摩阻力随桩长变化的研究,试坑浸水方式大部分是在桩周打泄水孔,这种方法虽然可以使桩周土达到饱和极限状态,研究其充分湿陷的情况,但与实际不吻合。其次,虽然魏进等^[14]做过类似浸水自然渗透的试验,但其摩阻力分布与融土地区类似,有明显分界。考虑到地域的广阔性、复杂性,尤其是在中国大力投资建设的西北部地区,针对其特有的环境(干燥的气候,大厚度高压缩性黄土),现有的研究还不充足。最后,中国现行规范对负摩阻力取值方式的规定过于简单粗略、单一保守,并没有考虑到实际桩基受力过程中中性点的变化。并且在实际工作生产中,不同地区土层状况千差万别。

随着中国生产技术和需求的不断发展,湿陷性黄土中桩基负摩阻力的研究还不足以满足相关需求。鉴于此,笔者结合兰州地区独有的地质与气候条件,模拟兰州非连续降雨,进行较大型的现场桩基预载浸水试验,研究兰州地区湿陷性黄土对桥梁桩基摩阻力的影响。

1 试验场地地质水文概况

试验依托兰州南绕城高速公路部分桥跨段,工程所在地属陇西黄土高原西部,是青藏高原向黄土高原的过渡带。地形地貌总体为南北高(黄土沟梁区),中间低(河谷盆地区),需要较多桥梁沟通连接。

兰州属中温带大陆性气候,冬无严寒、夏无酷暑,气候温和,区内海拔平均高度 1 520 m,年均气温 11.2℃,年均降水量 327 mm,月最大降雨量 123.2 mm。全年日照时数平均 2 446 h,无霜期 180 d 以上。拟建项目在全国公路气候自然分区中属甘东黄土山区Ⅲ3。

依据设计院的勘察资料,将该试验场地黄土自重湿陷最大深度初步确定为 20 m。该工程段自重湿陷等级为Ⅳ级,场地靠近柴家台村,交通便利,故将试验场地选择在西固区柴家台上。

2 试验方案

2.1 试验依据及布置

结合兰州地区降雨少、气候干燥、汇水少的特点,依据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)中有关的湿陷性黄土试验以及附录 H“单桩竖向承载力静载荷浸水试验要点”,由于场地周边道路及其他构筑物的限制,将桩基浸水荷载试验试坑采用长方形以及 4 个小长方形,尺寸为 $L \times b = 20 \text{ m} \times 9 \text{ m} + 4 \times 2.5 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 200 \text{ m}^2$,试坑深度为 0.6 m,整个试坑内铺设 15 cm 厚的细砂砾。布设 S2 试桩,桩长 l_0 为 20.5 m,桩径 800 mm,试桩钢筋笼主筋为 8 ϕ 16,为通长筋,每根试桩在对称钢筋上沿竖向左右对称布置钢筋应变计,从 1 m 开始,前 10 m 每隔 1 m 布置一个,后 10 m 每隔 2 m 布置一个,共计 30 个。试桩之间的距离 8 m,满足《建筑桩基技术规范》有关规定,即桩间距大于 $4d$ 。加载系统采用工字钢堆载及千斤顶加载的形式,桩基设计承载力为 380 t,采用 500 t 的工字钢堆载。该试桩共布置 24 个观测点,采用百分表记录位移,其中浅层标点 12 个,分别沿 120°夹角的 3 条观测线布置,用于测地面的湿陷变化情况;深层标点 6 个,用以观测不同深度土层的自重湿陷情况;桩周土标点 3 个,用以观测桩土相对位移;桩顶 3 个点,以观测桩的位移情况。试坑设有水分探头,以量测水浸入深度。

2.2 试验步骤

1) 试验得到旱地桩极限载荷为 430 t,试桩取旱地桩极限荷载的 0.5 倍(215 t)作为设计荷载进行分级预加载;

2) 第 1 级取分级荷载的 2 倍(86 t)加载,以后按

分级荷载 43 t 加载,共加载 4 级;

3)待加载到设计荷载稳定后,从 10 月 25 日开始分别按照年均降雨量的 2 倍、3 倍慢速浸水,研究预压浸水摩阻力发展情况,停水后继续研究土体失水固结摩阻力的发展情况;

4)11 月 18 日开始按 3 倍年均降雨量浸水,浸水稳定后开始加载,并维持一定水位至试桩破坏。考虑到水分下渗及水分蒸发等,最终浸水量 4 倍多;

5)卸载分级进行,每级卸载量为加载分级载荷的 2 倍,维持 1 h 测读桩顶沉降量。卸载至 0 后,读桩顶残余沉降量,维持至少 3 h。

试验采集数据按前 1 h 每 15 min 读一次数,以后 0.5 h 读一次数,稳定标准为连续 2 h 的位移量不大于 0.1 mm^[15]。

试验现场如图 1 所示。



图 1 现场布置图
Fig.1 Site layout diagram

3 结果分析

3.1 加载结束的判定

通过试验数据整理计算,得到位移随时间变化以及荷载与位移的关系,如图 2 所示。

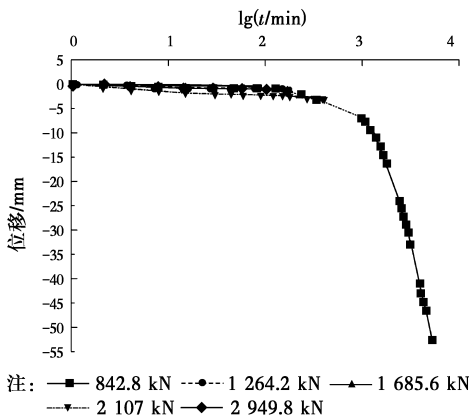


图 2 S2 桩加载时间对数-位移关系

Fig.2 S2 pile time logarithm-displment diagram when loaded

S2 桩从预压到浸水加载破坏,结果如图 2 所示。从图 2 可看出,第 5 级荷载之前,各级荷载下 $S-lg t$ 关系图线较平直,无明显的波折点。随着荷载

的增大,位移随时间对数的增长数值基本保持不变。在第 6 级荷载作用下,加载初期, $S-lg t$ 关系曲线基本没有变化,仅表现为微降,但当 $lg t$ 数值在 3 附近时,位移曲线出现明显拐点,表现为陡降,且超过 24 h 位移没有达到稳定的标准,故判定此时试桩破坏,停止加载。

3.2 轴力及摩阻力沿桩身分布分析

3.2.1 预压阶段分析 试验通过钢弦式应变计测得应变,利用厂家提供的参数及公式计算得到轴力和摩阻力,结合 Origin 软件对数据进行处理,得到 S2 试桩预压阶段如图 3 所示。

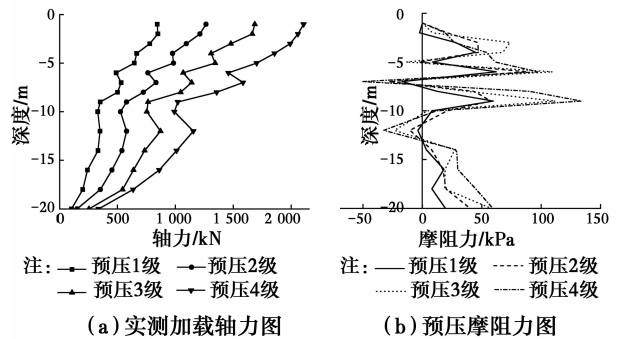


图 3 预压阶段图

Fig.3 Pre-loaded phase diagram

由图 3 可知,轴力沿桩深下降呈非线性衰减。随着加载量增加,桩土相对位移增大,桩侧摩阻力充分发挥效应,从而使轴力衰减速率增大。在桩体中上部 5~11 m 范围,轴力有类似于正弦形的波动。分析其原因,可能是该深度的土层与其他土层承载特性相比存在明显差异,以及试桩在浇筑时,桩侧平整度对桩土接触也有一定影响;计算所得摩阻力沿桩深变化趋势是先增大后减小,靠近桩端再次增大,这与西北地区部分科研机构在类似土体试验所得结果(摩阻力在桩下部逐渐减小,在桩端接近于零)有一定差别^[14],主要是土体的特性差异,桩体下部土层与桩的剪切弹性接触良好,从而使摩阻力再次递增。摩阻力数值基本为正,最大峰值位置基本都在 9 m 处,且最大值未超过 150 kPa。桩侧局部出现负值,但数值较小,负摩阻分布长度约 3 m,基本可忽略不计,这与已有的桩基试验结果基本吻合。摩阻力出现多个峰值且局部出现负值可能与土层性质和密实度有关,不同土层桩土粘结性能不同。此阶段土体持力层主要在 5~10 m 及 15~20 m 处。

3.2.2 恒压浸水阶段分析 恒压浸水阶段的轴力及摩阻力分布如图 4 所示。

从图 4(a)可以看出,在试坑浸水后,桩顶以下

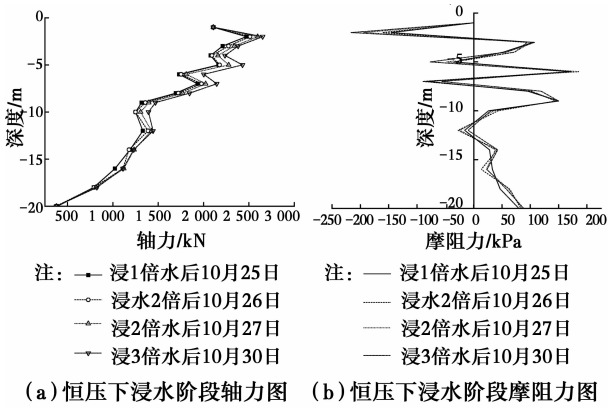


图 4 S2 桩恒压浸水阶段图

Fig. 4 S2 pile constant pressure immersion stage diagram

轴力随即增大。在恒压作用下,随着浸水量和浸水时间的增长,桩身每个截面的轴力都在逐渐增大,轴力较桩顶荷载大的区间也在向下发展,且主要集中在桩中上部,桩端力几乎没变化。这主要是因为,随着浸水时间和浸水量的增加,桩侧土产生自重湿陷,且湿陷深度随土浸水深度发展而增大。当土层的沉降大于桩体时,对桩产生向下的拉力,其数值随着桩土相对位移增大而增大,这就相当于对桩二次加载,因而桩端力随之增加。由图 4(b)可知,摩阻力沿桩身向下正负交替,土体浸水立刻产生负摩阻力,且负摩阻力主要分布在桩上部。通过计算后,负摩阻力分布长度和主要在 4.66~5.04 m 区间内,负摩阻力数值随着时间因子增大和浸水量增加而增大,但增量不大。其主要原因是,随着浸水量增加和时间延长,水浸入深度增大,浅层下的土层也产生较大沉降。此阶段土体持力层与预压基本一致,也主要在 5~10 m 及 15~20 m 处。

3.2.3 停水阶段分析 试坑停水阶段的轴力及摩阻力分布如图 5 所示。

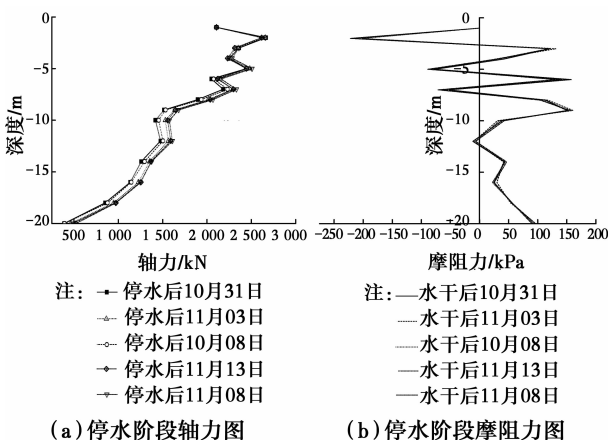
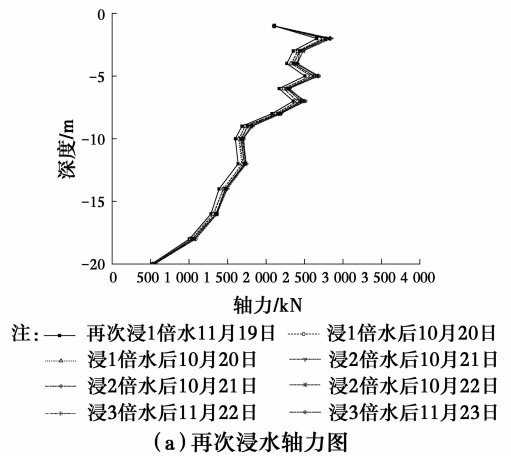


图 5 停水阶段图

Fig. 5 Diagram without water

由图 5 可知,当试坑地表无积水时,轴力沿桩身仍有增加,但随着时间的延长,增量逐渐减小。此阶段桩身上部轴力增大值较小,主要表现为桩体中下部轴力增大,可能是在停水初期,随着时间增长,深层土体也逐渐受到水分下渗造成的影响。此阶段的桩端反力有一定量的增长,桩侧摩阻力分布规律在此阶段基本变化不大,仍呈现正负交替,个别截面摩阻力数值先增大后减小。负摩阻力分布长度和在 5.04~5.1 m 范围内波动,初期先增大,随着时间延长,逐渐有微量的衰减。说明土体在停水固结初期蓄水量大。由于试验时间在秋冬季节,气温低,地层水分散失少,浅层土基本处于饱和状态,使得桩土相对位移的变化很小,负摩阻力区段继续发展。但后期随着时间增长,部分水分散失,上部土层含水率降低,土体沉降速率降低,桩土相对位移减小,从而使负摩阻力分布长度和减小。此阶段持力层基本无变化。

3.2.4 再次浸水阶段分析 试坑再次浸水阶段的轴力及摩阻力分布如图 6 所示。



(a) 再次浸水轴力图

(b) 再次浸水摩阻力图

图 6 再次浸水阶段图

Fig. 6 Diagram when flooded again

当试坑再次浸水时,此阶段整个桩深轴力都有微量增大。轴力增量随着时间逐渐减小,总体数值

递增量较小,其原因可能是长时间停水后,试坑再次浸水使得土体再次湿陷。但沉降在首次浸水及停水阶段已基本完成,故轴力变化较小,这一点可以通过桩土位移得到印证。此阶段摩阻力沿桩长的分布规律及分布区间长度基本无变化,说明较长时间的非连续性二次降雨对桩基摩阻力影响不大。

3.2.5 加载持续浸水阶段分析 试坑再次加载持续浸水阶段的轴力及摩阻力分布如图 7 所示。

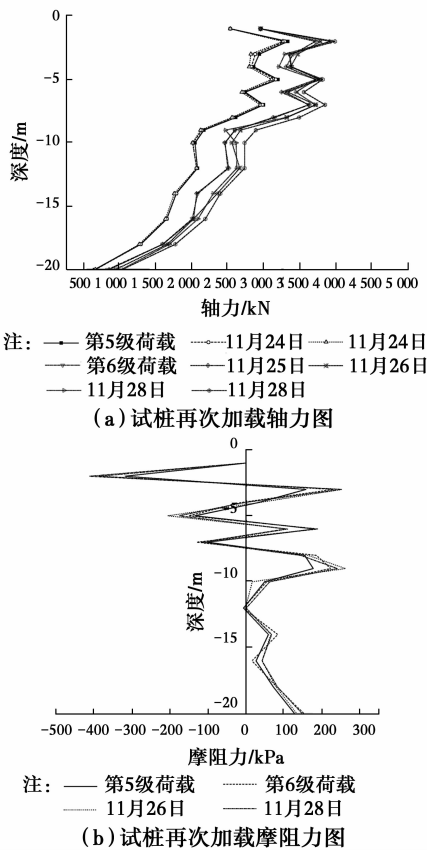


Fig. 7 Diagram of re-loaded under continuous flooding phase

试桩再次加载至破坏阶段,在极限荷载作用下,轴力基本保持不变。而在破坏荷载作用下^[15],桩体中下部轴力明显递增,此阶段负摩阻力峰值出现较大数值,主要是由于桩体产生较大的位移,扰动了桩侧土体水分下渗,从而使下部土体湿陷。负摩阻力分布长度和先减小后增大,在极限荷载下,长度约 5.14 m。破坏荷载下,桩端反力发挥到最大程度。土体的持力层主要在桩 8 m 以下的位置,这与埋设水分探头所测水浸入土层深度结果基本一致,可见,水的影响深度主要在前 8 m 的位置,具体变现为土体浸水后,出现明显的沉降,对桩施加负摩阻力,同时,水使得桩土接触相互作用弱化。

3.2.6 卸载阶段分析 试坑再次浸水阶段的轴力及摩阻力分布如图 8 所示。

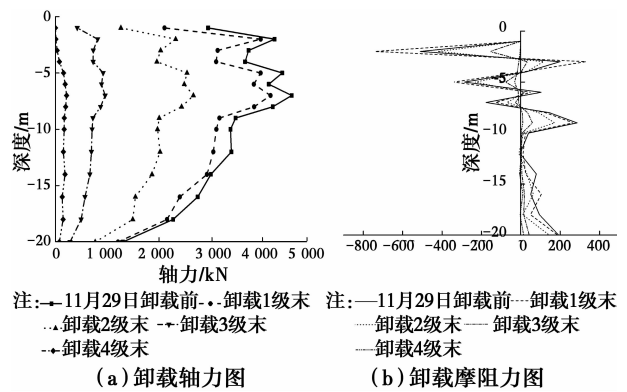


图 8 实测卸载图

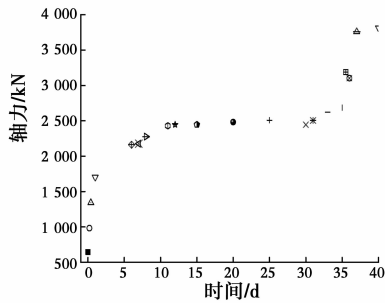
Fig. 8 Actually measured unloaded diagram

由图 8 可知,卸载过程中轴力沿桩向下先增大后减小,在桩上部出现 3 个峰值,最大峰值位置与预载时峰值有一定差异,基本处在 7 m 位置,7 m 以下逐次递减。较为反常的是在卸第 1 级荷载时,桩顶以下轴力较卸载前变化较小,而且测得桩体回弹位移值较小,甚至仍有沉降趋势。其原因可能是桩在破坏荷载作用下,卸载时桩周土对桩有较大的约束,限制了桩的回弹,从而使桩土相对较小^[16]。此阶段摩阻力分布规律与加载阶段基本一致,负摩阻力沿桩深分布区段和随着卸载量的增加数值增大,从 5.74 m 变化到 9 m。相比加载阶段,变化明显,空载时,数值达到最大。可能是卸载过程中,由于土处于浸水状态,仍会产生沉降,但桩体随着荷载降低产生回弹,即产生向上的位移,如此便会产生负摩阻力,并且桩体回弹量随着卸载等级增加而增大。此时,桩侧土体持力层主要在 10 m 以下位置。

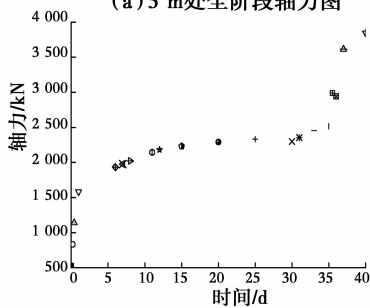
为了研究全阶段变化情况,选取 5 m 及 7 m 处绘制轴力图,结果如图 9 所示。

结合前 5 个阶段分析结果图,由图 9 可知:试桩 5 m 处,在浸水后轴力就开始增大,且随着水量的增加及时间的延续,增大趋势逐渐向桩下部发展。试坑无明水时,轴力仍有增长,相对于试坑浸水状态,数值较小,可能是受到试坑水头小的影响。再次浸水时,轴力继续微量增大。再次施加荷载时,在每级荷载下,随着时间的延长,轴力又再次增大。说明在破坏荷载下,负摩阻力仍然存在,可能是由于该位置处的土层在之前受到水的影响并不明显,在此时,由于桩基对土的扰动,导致该土层 C 、 φ 等承载特征值减小,从而下沉速率大于桩基,产生加载效应。

综合以上分析可知,随着浸水时间延长,正摩阻力发挥度在逐渐减小,而桩端力发挥度在增加,在破坏荷载下桩端力发挥度到达极限时,摩阻力发挥度



(a) 5 m处全阶段轴力图



(b) 7 m处全阶段轴力图

注: ■ 1级荷载 ○ 2级荷载 △ 3级荷载 ▽ 4级荷载 ◆ 浸1倍水后10月25日
 × 浸水2倍水后10月26日 ◐ 浸2倍水后10月27日 ◑ 浸水3倍水后10月30日
 ★ 水干后10月31日 ◒ 水干后11月03日 ● 水干后11月08日
 + 水干后11月13日 × 水干后11月18日 * 再次浸1倍水后11月19日
 - 浸2倍水后11月21日 ◓ 浸3倍水后11月23日 ▨ 11月23日第5级荷载
 ■ 11月24日 ▲ 11月25日第6级荷载 ▾ 11月28日

图9 试桩5 m及7 m处全阶段轴力图

Fig. 9 Axial force diagram at 5 meters and 7 meters

达到最小。

4 结论及展望

1) 试验模拟降雨的浸水方式下,通过埋设水分探头测得浸水最大深度在10 m左右,且在该深度处含水率增量很小,说明浸水主要影响区域已在10 m以上,并且桩基在浸水期间持力层也主要分布在10 m以下,这印证了试验结果的正确性。

2) 在浸水过程中,由于浸水方式不同,水影响深度较浅,使桩侧正摩阻力呈现先增大、左右波动达到峰值后、经过减小后再次有增大的现象。

3) 试桩在恒压浸水至破坏过程中,桩侧负摩阻力始终存在,且其峰值随着荷载递增而增大。桩身负摩阻力区段长度 l_n ,与桩长比值 l_n/l_0 为0.23~0.26,是一个变化的过程;卸载过程中,存在较大面积负摩阻力, l_n/l_0 为0.28~0.45。设计时,可以考虑中性点区间特点,达到安全、经济、合理。

4) 在试验过程中,首次降雨对桩基轴力及摩阻力影响较大。间隔20 d左右,试坑水干,再次降雨对摩阻力影响较小。鉴于此特点,设计时可以主要考虑首次降雨对桩基影响。

5) 试桩在短期浸水后,主要由于负摩阻力的影响,试桩的极限承载力只有自然条件下的60%。而

试桩在极限荷载下的沉降量约自然条件下的1.73倍。设计时,在以承载力为主要控制参数时,要同时考虑桩基沉降的影响,保证承载力又兼顾桥梁路线的平顺。

参考文献:

- [1] 钱鸿缙,王继唐,罗宇生,等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1985.
QIAN H J, WANG J T, LUO Y S, et al. Collapsible loess foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,1985. (in Chinese)
- [2] FRANCISCA F M. Evaluating the constrained modulus and collapsibility of loess from standard penetration test [J]. International Journal of Geomechanics,2007,7(4): 307-310.
- [3] 湿陷性黄土地区建筑规范: GB 50025—2004 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2004.
Code for construction of collapsible loess area; GB 50025-2004 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2004. (in Chinese)
- [4] ELLIS E A. Briefing: Serviceability of piles with negative skin friction [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering,2013,166(1): 3-7.
- [5] HAERI S M, GARAKANI A A, KHOSRAVI A, et al. Assessing the hydro-mechanical behavior of collapsible soils using a modified triaxial test device [J]. Geotechnical Testing Journal,2014,37(2): 190-204.
- [6] JEONG S, KO J, LEE C, et al. Response of single piles in marine deposits to negative skin friction from long-term field monitorin [J]. Marine Georesources & Geotechnology,2014,32(3): 239-263.
- [7] HAERI S M, SABERI S, BEIGI M, et al. Study on the behavior of a collapsible soil under constant matric suction loading implementing an unsaturated framework [C]//15th Pan-American Conference on Soil Mechanics & Geomechanical Engineering,2015.
- [8] SCHIAVA R, ZARAZAGA G. Argentinean collapsibility loess: Characterization and evaluation on the constrained modulus [J]. Geological Resources and Engineering,2016(7): 345-351.
- [9] 夏力农,杨秀竹. 桩顶荷载影响负摩阻力的现场试验与数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报,2008,5(5): 46-49.
XIA L N, YANG X Z. Field test and numerical simulation of negative friction resistance affected by pile top load [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2008,5(5): 46-49. (in Chinese)

- [10] 张永宁,湿陷性黄土场地钻孔灌注桩负摩摩擦力试验研究[D]. 兰州:兰州大学,2012.
ZHANG Y N. Experimental study on negative friction of bored pile in collapsible loess field [J]. Lanzhou: Lanzhou University,2012. (in Chinese)
- [11] 赵天时. 大厚度自重湿陷性黄土场地桩基负摩阻力试验研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2013.
ZHAO T S. Experimental study on negative friction resistance of pile foundation with large thickness and self-weight collapsing loess soil [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2013. (in Chinese)
- [12] 谢立安. 湿陷性黄土浸水湿陷对桥梁桩基负摩阻力影响深度的研究[J]. 公路,2016(1): 118-121.
XIE L A. Study on the influence depth of collapsible loess collapsibility on the negative skin friction of pile foundation [J]. Highway, 2016 (1): 118-121. (in Chinese)
- [13] 朱彦鹏,赵天时,陈长流. 桩基负摩阻力沿桩长变化的实验研究[J]. 岩石力学,2013,34(Sup1): 265-272.
ZHU Y P,ZHAO T S,CHEN C L. Experimental study on the change of negative friction resistance of pile foundation along pile [J]. Rock Mechanics, 2013, 34 (Sup1): 265-272. (in Chinese)
- [14] 魏进,李哲,郝忙利,等. 自重湿陷性黄土场地的桩基浸水荷载试验[J]. 长安大学学报,2011,31(5): 63-67.
WEI J,LI Z,HAO M L,et al. Preparation test of pile foundation for self-weight collapsible loess field [J]. Journal of Chang'an University,2011,31(5): 63-67. (in Chinese)
- [15] 建筑桩基技术规范: JGJ 106—2014 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
Technical code for building pile foundation: JGJ 106-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2014. (in Chinese)
- [16] 聂如松,冷伍明,吴爱红,等. 单桩残余应力实测分析[J]. 公路交通科技,2014,31(1): 61-66.
NIE R S,LEN W M,WU A H,et al. An investigation on residual stress of single pile [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014,31 (1): 61-66. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)