

地面水对黄土地区桥梁桩基承载力影响试验研究

冯忠居, 谢永利, 张宏光, 张绍新, 李哲

(长安大学 教育部特殊地区公路工程重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:黄土因其特有的工程性质,使位于黄土地区的桥梁桩基础在桩周土受地面水浸湿后产生湿陷变形,该变形引起桩的负摩阻力,降低了桩的承载力。通过陕西芝川河特大桥桩周浸水前、后的荷载试验,对黄土区域桩基浸水前、后的承载性状进行了分析研究,揭示了地面水对黄土区域桥梁桩基承载力性状具有较大的影响;分析了桩及桩周土浸水期间的沉降变化规律。研究成果对黄土区域公路桥梁桩基础的设计与施工具有重要理论价值与指导意义。

关键词:土力学;黄土浸水试验;静载试验;桩基承载力;负摩阻力

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)10-1758-08

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF SURFACE WATER ON BEARING CAPACITY OF PILE FOUNDATION IN LOESS AREA

FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, ZHANG Hong-guang, ZHANG Shao-xin, LI Zhe

(Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang an University, Xi an 710064, China)

Abstract: The special engineering feature of loess leads to the collapsible deformation of the pile foundation when the soil around piles is saturated. The deformation usually leads to negative friction and reduces bearing capacity of piles. Based on the loading test before and after saturation of pile foundation of Shaanxi Zhichuanhe Bridge, the bearing capacities before and after saturation are analyzed. It is found out that effect of surface water on the property of bearing capacity of pile foundation in loess area is significant. The regularity of settlement of pile foundation and soil around is summarized. The results can provide references to the design and construction of pile foundation in loess area.

Key words: soil mechanics; loess saturated test; static loading test; bearing capacity of pile foundation; negative friction

1 引言

由于各种因素的影响,桩侧摩阻力常出现负值的情况,这对桩的承载力是不利的^[1-10]。为探讨湿陷性黄土地区桥梁桩基荷载传递规律,分析浸水前、后桩-土相互作用机理及单桩竖向承载力的差异,判明各种情况下工程用桩的桩侧摩阻力、桩底反力,验证湿陷性黄土区域桥梁桩基设计参数是否

合理,进一步优化桩基础设计,获得在设计荷载作用下桩基产生的沉降变形,为桥梁上部结构的施工控制提供合理的控制指标,根据现场实际情况,在考虑影响桩基础承载力的相关因素后,本文通过现场静载试验,研究桩在浸水前、后:(1)桩侧摩阻力沿桩长的分布性状及其负摩阻力影响范围;(2)桩在荷载作用下的桩身轴力分布性状;(3)桩在荷载作用下桩端反力分布规律;(4)各土层桩侧摩阻力的建议值及既定荷载作用下的有效桩长。

收稿日期: 2004-07-05; **修回日期:** 2004-09-20

基金项目: 交通部西部建设资助项目(2001 318 000 17)

作者简介: 冯忠居(1965-),男,博士,1988年毕业于西安公路学院桥梁工程专业,现任副教授,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhongjufeng@tom.com.

2 试验概况

芝川河特大桥是二连浩特—河口国道主干线 (GZ40) 禹门口—阎良高速公路上的一座特大桥梁, 该桥左半幅 3 034.190 m, 右半幅 3 039.843 m。主桥为 12 联主跨 50 m 预应力混凝土 T 梁, 下部结构采用桩基础, 每幅承台下布置 9 根长 60 余米、直径 1.5 m 的桩基。

试验区位于 K29+455 ~ K30+160 范围, 该区地段为黄土, 属湿陷性黄土, 层厚约 15 m, 下部为粉质粘土和细砂。

试桩采用旋挖钻成孔, 桩长为 35.0 m, 桩径为 1.2 m。沿桩身分布有 156 个钢弦式钢筋应力计。所有预埋件测试元件的数据均采用 QLA-2 型钢弦式智能测频仪采集。试验的预期加载极限为 8 000 kN, 设计每根锚桩所提供的抗拔力大于 5 000 kN。

3 试验设计

3.1 试桩设计

试桩位于芝川河特大桥下行线靠黄河一侧, 现场试验试桩 2 根、锚桩 3 根, 呈“一”字形布置, 锚桩与试桩的桩径 1.20 m、桩长 35.0 m。

3.2 浸水试验方案设计

(1) 浸水范围: 以试桩为中心, 开挖一长 19.2 m、宽 10.0 m、深 0.8 m 的基坑, 如图 1 所示。

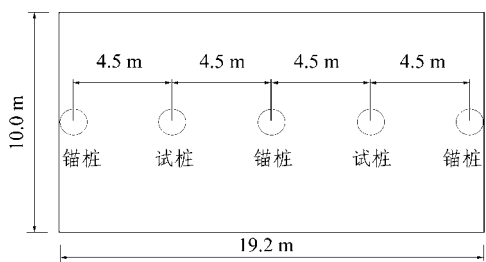


图 1 注水范围示意图

Fig.1 Schematic of water injection range

(2) 注水孔设计参数

注水孔孔深 15.0 m、孔距 2.0 m、直径 10 cm; 注水孔成孔后孔内填中粗砂或碎石。

(3) 测点布设

浸水试验测点共 32 个, 其中 24 个测点布设沉降标, 8 个布设在试桩桩顶, 见图 2。

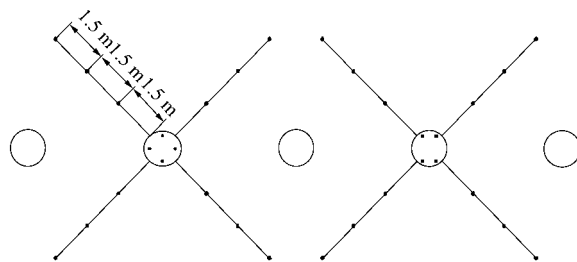


图 2 沉降标布设示意图

Fig.2 Schematic of arrangement of settlement marks

3.3 测试要求

桩周浸水期间应保证某一固定水位, 以确保浸水效果和测试成果的规律性。利用测试成果判定黄土浸水后的湿陷变形是否完成并进一步确定桩的静载试验日期; 浸水期间每天早晚各测量一次测点沉降量, 采集一次桩身预埋测试元件数据。

4 桩的承载力性状

4.1 浸水前桩的承载力分析

2[#] 试桩浸水前的 $Q-S$ 分布曲线如图 3 所示, 从图中可以看出, 随着荷载的增加, 桩的沉降变形近似呈线性增加, 没有明显的反弯点, 即使施加荷载达最大值 9 600 kN, 桩的沉降量仅为 6.04 mm, 很难直接由曲线确定出桩的极限承载力。结合图 4, 在排除因温度影响而出现的沉降反弹情况外, 亦未见有明显的变化特征显示桩达极限状态, 说明浸水前 2[#] 试桩极限承载力大于 9 600 kN, 这一结果明显大于芝川河特大桥黄土区桩的极限承载力设计值 8 000 kN。

4.2 浸水后桩的承载力

1[#] 试桩浸水后当荷载达 8 800 kN 时曲线出现明显的反弯点, 如图 3(图中 3 条实线和 3 条虚线是对应关系, 前者是加载曲线, 后者是卸载曲线) 所示,

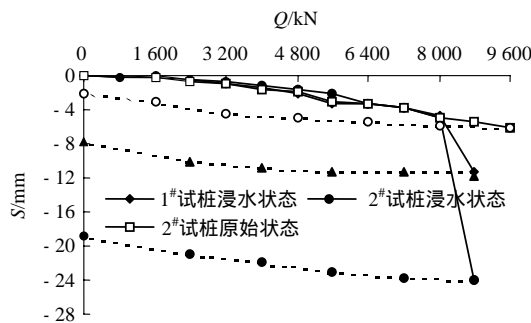


图 3 荷载沉降曲线

Fig.3 Load-settlement curves

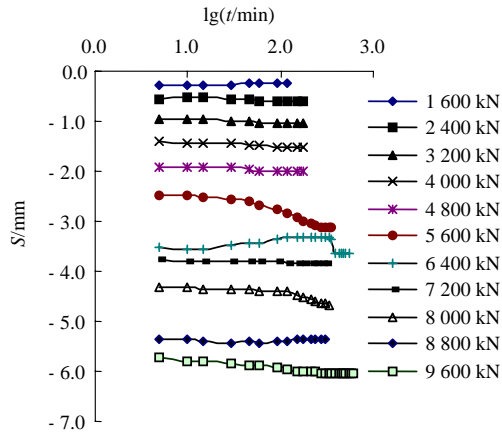


图4 2# 试桩(原始状态) $S-lgt$ 分布曲线

Fig.4 Curves of $S-lgt$ of No.2 test pile (original condition)

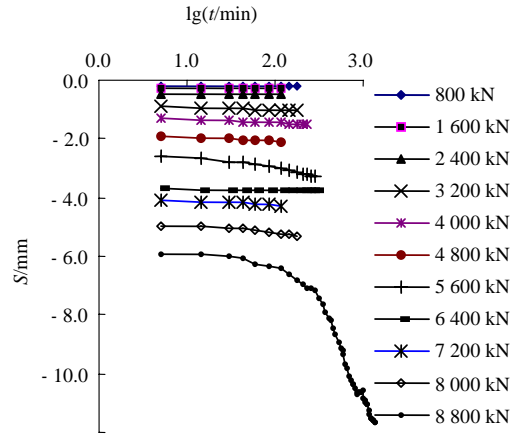


图6 1# 试桩(浸水状态) $S-lgt$ 分布曲线图

Fig.6 Curves of $S-lgt$ of No.1 test pile (saturated condition)

由此可以初步判断浸水后 1# 桩的极限承载力为 8 000 kN，此时桩的沉降量为 5.30 mm。

对 2# 试桩浸水前的静载试验完成后，将其与 1# 试桩一并浸水后又对其进行了静载试验，其荷载沉降曲线及 $S-lgt$ 曲线见图 3，5，从中可以看出，浸水后其极限承载力亦为 8 000 kN，此时的沉降量为 5.97 mm。

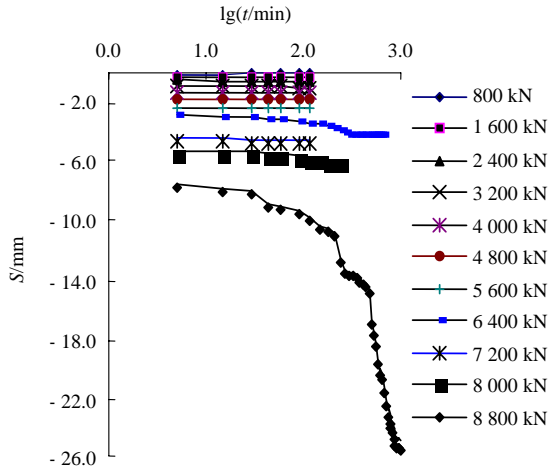


图5 2# 试桩(浸水状态) $S-lgt$ 分布曲线

Fig.5 Curves of $S-lgt$ of No.2 test pile (saturated condition)

由图 3，5，6 可以看出，尽管 1# 桩先浸水后加载，2# 桩先加载后浸水，但它们的承载力是相同的，沉降变形量亦基本相同，这说明湿陷性黄土地区的桩基无论是先加载后浸水还是先浸水后加载，黄土的湿陷性对桩承载力和沉降变形量的影响程度一致。值得说明的是，若按沉降标准确定桩承载力^[3, 8]，1#，2# 试桩的承载力大于 8 000 kN。

4.3 浸水前、后桩承载力的变化

2# 试桩浸水前的承载力与 1#，2# 试桩浸水后的承载力明显不同，前者远大于后者；而在相同荷载下，桩浸水前的沉降量远小于浸水后的沉降量，如表 1 所示，这说明桩周浸水引起桩侧黄土产生湿陷，对桩承载力影响明显。同时试验结果也反映出试验区域桩侧的负摩阻力较小，说明试验区的黄土属于弱湿陷性黄土或非自重湿陷性黄土。

表 1 浸水前后桩承载力与沉降量

Table 1 Bearing capacity and settlement of piles before and after saturation

试桩号	极限承载力/kN	沉降量/mm
1(浸水状态)	8 000	5.30
2#(浸水状态)	8 000	5.97
2#(原始状态)	9 600	6.04

5 桩身轴力及桩端阻力发挥性状

5.1 浸水前桩的轴力及端阻力发挥性状

由 2# 试桩(原始状态)轴分布曲线(图 7)可以看出，在各级荷载作用下，随着桩入土深度的增加，桩身轴力逐渐减小，说明桩在传递竖向荷载过程中，大部分荷载转嫁给了桩侧土体，桩端承受的荷载很小，随着荷载的增加，传至桩端的荷载也增加，当加载至次最大值 8 800 kN 时，桩端荷载达 763.47 kN，仅占总荷载的 8.7%，试桩显示出摩擦桩的力学特性。

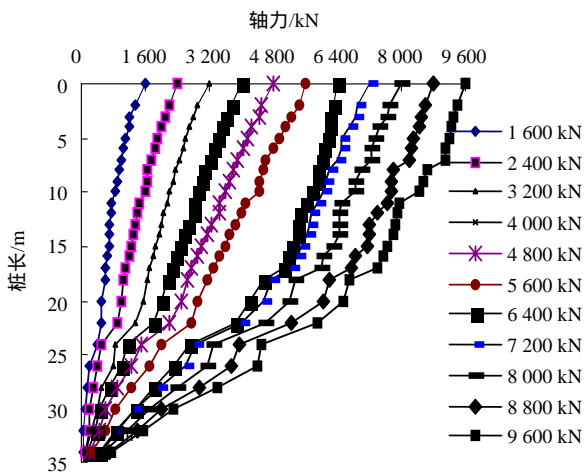


图 7 2# 试桩(原始状态)轴力分布曲线

Fig.7 Curves of axial force of No.2 test pile(original condition)

5.2 浸水后桩的轴力及端阻力发挥性状

由 1[#], 2[#] 试桩(浸水状态)轴力分布曲线图 8, 9 可以看出, 桩周黄土在浸水后其轴力的分布性状总体趋势从地面向下逐渐减小, 但沿桩长向下某些断面区间的轴力相对提高, 其原因是在相应断面区间产生了负摩阻力。同时, 传至桩端的荷载随着加载等级的提高而提高。当加载至 8 800 kN 时, 1[#], 2[#] 试桩端阻力分别为 1 415.94, 1 933.76 kN, 分别占所加荷载的 16.1%和 22.0%。2[#]试桩较 1[#]试桩的端阻力大些的原因是 2[#]试桩在浸水前已进行了一次原状土情况下的静荷试验, 且其加载最大达 9 600 kN, 桩周与桩侧土已产生了部分塑性变形。

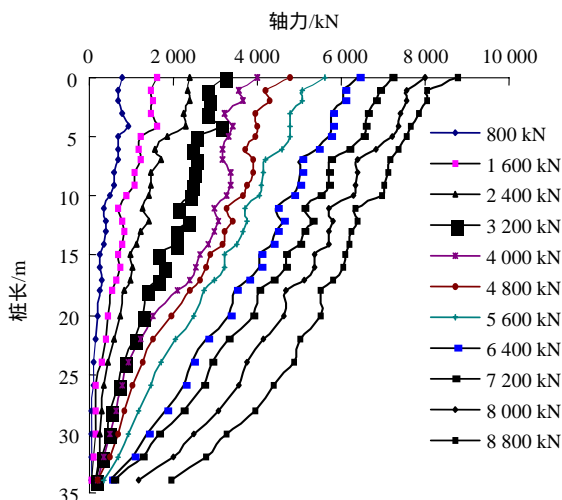


图 8 2# 试桩(浸水状态)轴力分布曲线

Fig.8 Curves of axial force of No.2 test pile (saturated condition)

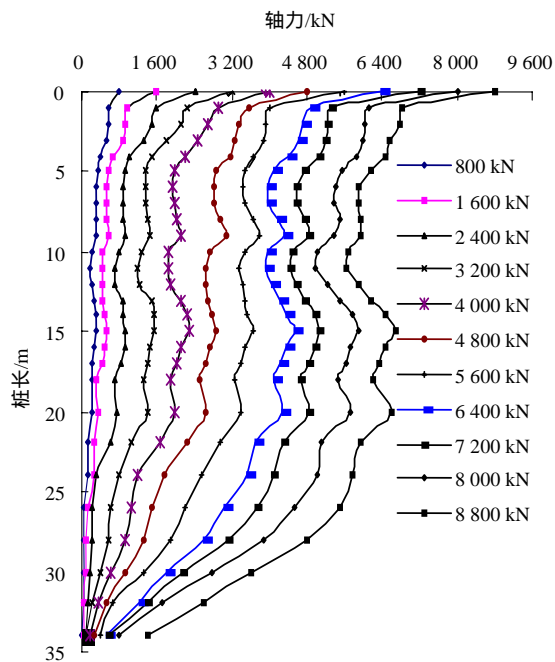


图 9 1# 试桩(浸水状态)轴力分布曲线

Fig.9 Curves of axial force of No.1 test pile(saturated condition)

5.3 浸水前、后桩轴力与端阻力的对比分析

图 7~9 桩的轴力分规律及图 10 桩端阻力分布规律表明: 桩周土浸水前、后轴力的分布规律有较大的差异, 在各级荷载作用下, 前者是随着桩的入土深度的增加轴力减小, 而后者则是随着桩的入土深度的增加, 轴力不减反增, 说明桩周黄土浸水后的湿陷变形产生负摩阻力。桩的端阻力均是随着加载等级的增大而增大, 当荷载较小时, 浸水后桩端阻力较未浸水的桩端阻力小, 但当荷载超过某一值时, 浸水后的桩端阻力较未浸水时的大。

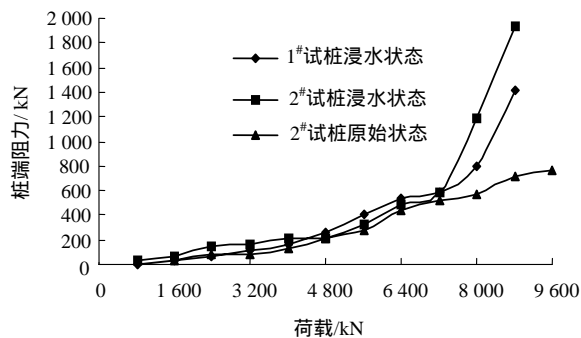


图 10 桩端阻力分布图

Fig.10 Curves of pile end resistance

6 桩侧摩阻力发挥性状

6.1 浸水前桩的桩侧摩阻力发挥性状

由图 11 可以明显看出, 2[#] 试桩(原始状态)加载较小时, 桩侧摩阻力发挥较小, 随着加载等级的增大, 桩侧摩阻力逐渐增大, 当加载至 4 800 kN 时, 桩侧摩阻力在局部范围内的土层已达极限桩侧摩阻力值, 加载达最大 9 600 kN 时, 桩 26 m 以上大部分土层的桩侧摩阻力达到了极限, 而 26 m 以下则仍未达到极限值。桩侧土层达到极限状态桩侧摩阻力, 为 29.75 ~ 99.87 kPa。

6.2 浸水后桩的桩侧摩阻力发挥性状

1[#] 试桩在部分土层产生负摩阻力(如图 12 所示), 随着荷载的增大, 桩的沉降变形量也增大, 相应的负摩阻力减小; 当不同土层荷载增大不同值后, 桩的沉降量大于桩周土层的沉降量, 大部分原产生负摩阻力的土层开始提供正摩阻力, 而部分未出现负摩阻力的土层, 其桩侧摩阻力达极限状态。

另外, 地质勘察表明桩在 20.0 m 以上为湿陷性黄土, 桩在 20.0 m 以下未见有负摩阻力出现。1[#] 试桩的负摩阻力为 - 5.20 ~ - 69.44 kPa, 正极限摩阻力为 29.39 ~ 86.71 kPa。

2[#] 试桩是完成静载试验以后浸水, 之后再进行一次静载试验, 因此其桩侧摩阻力分布(如图 13 所示)和 1[#] 试桩的情况相比有一定差异, 但由于 2[#] 试桩桩侧的地质情况和 1[#] 试桩的基本相同, 因此浸水后桩侧亦出现负摩阻力, 但负摩阻力出现的部位有差异。2[#] 试桩的负摩阻力为 - 2.18 ~ - 38.82 kPa, 正极限摩阻力则为 16.53 ~ 71.20 kPa。

6.3 浸水前、后桩侧摩阻力对比分析

由图 10 ~ 13 可以看出: (1) 桩在浸水前桩侧土层提供的都是正摩阻力, 而浸水后桩侧在 20.0 m 以上的大部分土层产生了负摩阻力, 20.0 m 以下的土层都为正摩阻力; (2) 浸水前、后在 20.0 m 以下桩侧达极限摩阻力的土层不同, 且后者较前者的多, 这是由负摩阻力引起的; (3) 浸水前、后桩侧极限

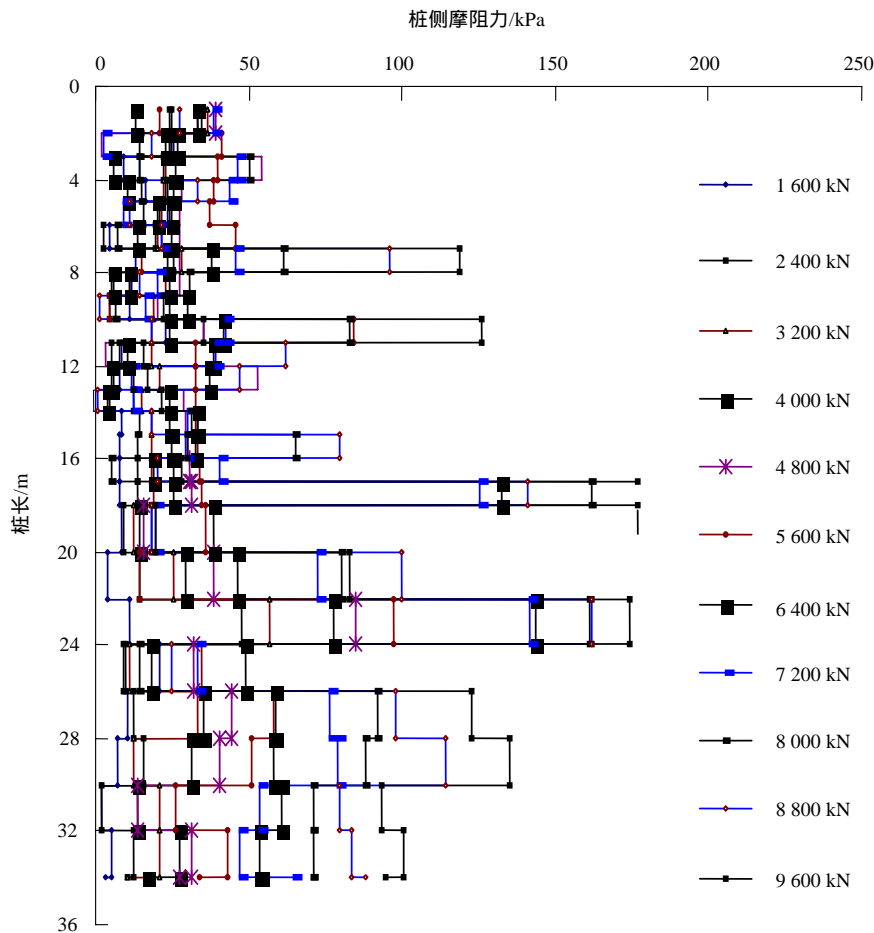


图 11 2[#] 试桩(原始状态)桩侧摩阻力分布曲线

Fig.11 Curves of side resistance of No.2 test pile (original condition)

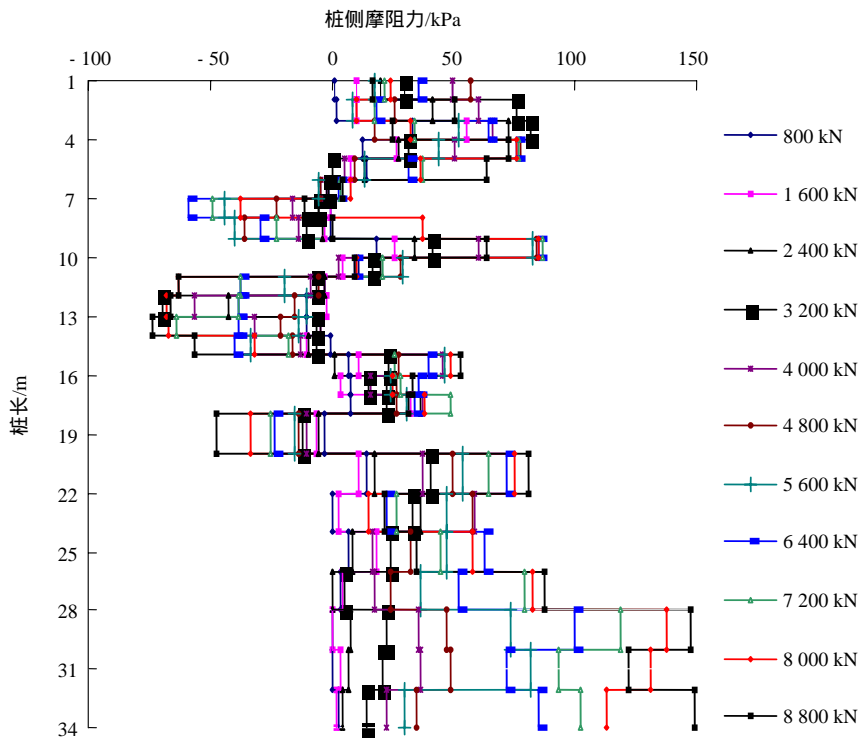


图 12 1[#] 试桩(浸水状态)桩侧摩阻力分布曲线

Fig.12 Curves of side resistance of No.1 test pile (saturated condition)

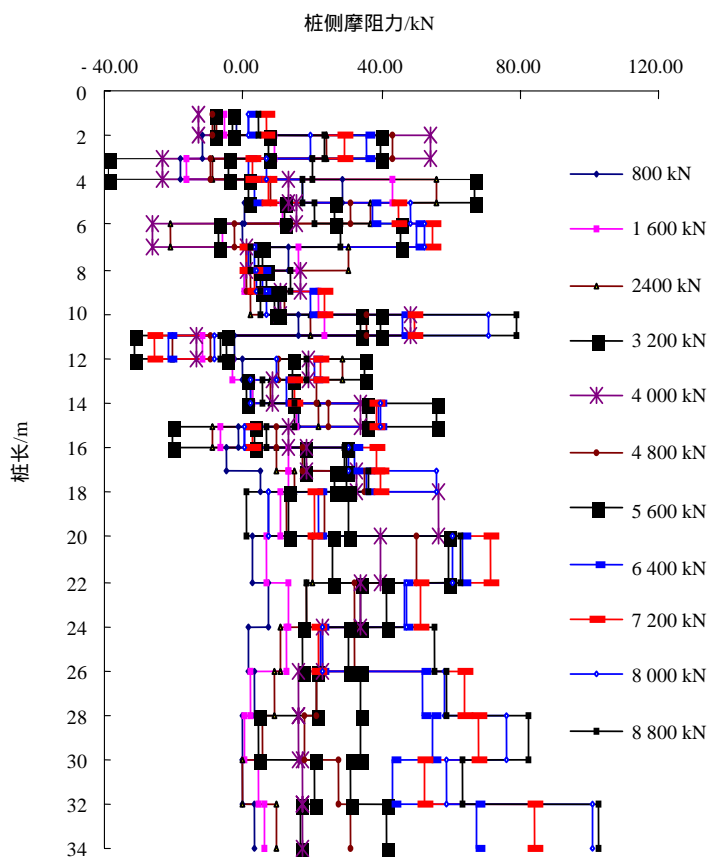


图 13 2[#] 试桩(浸水状态)桩侧摩阻力分布曲线

Fig.13 Curves of side resistance of No.2 test pile (saturated condition)

摩阻力的范围差异不大,前者为 29.75 ~ 99.87 kPa,后者则为 29.39 ~ 86.7 kPa。

7 桩的浸水特性

7.1 桩周土的浸水特性

桩侧负摩阻力是由于桩侧土的沉降变形量大于桩沉降变形量引起的,因此,试验通过桩周浸水,研究负摩阻力的变化性状。浸水历时 61 d,浸水量超过 6 000 m³,浸水后桩周土的沉降量平均值达 1.4 cm,说明试验桩区域的黄土属弱湿陷性黄土或非自重湿陷性黄土,浸水完成后桩径向沉降变形规律如图 14 所示,从图中可以看出,桩周土在浸水期间沉降变形因气候因素的影响有较大的波动,亦即有反弹的情况出现,但最终是产生向下的沉降量;沉降沿桩的径向向外的分布情况则表明:受边界条件的影响,桩位处及基坑边缘处的沉降变形较小,中间部位的沉降量则相对大些。

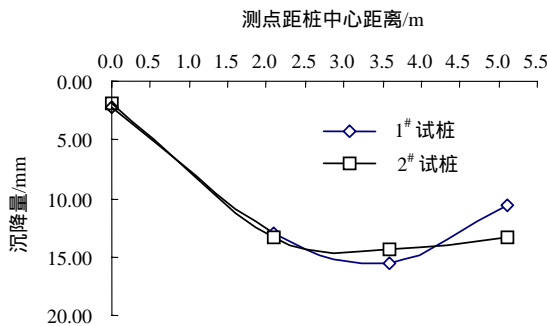


图 14 桩周土沿径向沉降分布曲线

Fig.14 Curves of soil radial settlement around pile

7.2 桩的浸水特性

桩顶沉降观测点的沉降分布曲线如图 15 所示,浸水期间桩的沉降变形量和其周围土的浸水

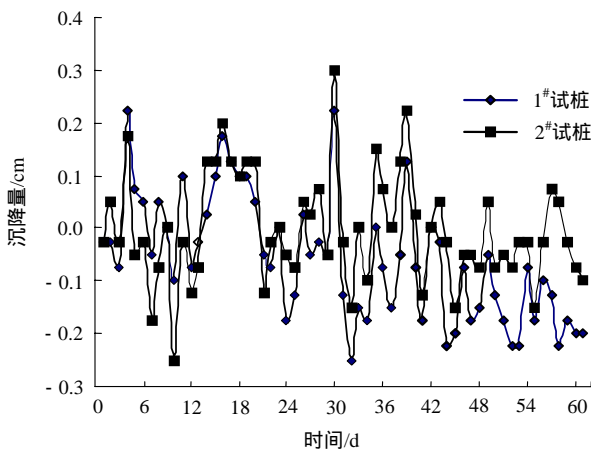


图 15 桩顶沉降-时间分布曲线

Fig.15 Settlement-time curve of pile end

特性一致,即随时间的变化因温度等因素的影响,沉降变形有反弹,但从量的角度而言,桩顶的沉降量 1# 桩 0.2 mm、2# 桩 0.1 mm,较桩周土的沉降变形量小得多。

8 结 语

(1) 浸水前、后桩的极限承载力明显不同,前者大于 9 600 kN,后者为 8 000 kN;对桩浸水前加载、卸载并浸水,之后再次进行承载力试验,和直接浸水之后再对桩的承载力试验相比较,其极限承载力完全一致。

(2) 未浸水桩轴力分布规律和浸水后桩轴力分布规律有差异,未浸水桩轴力沿桩长逐渐减小,浸水后桩轴力沿桩长在湿陷范围内降低程度不明显甚至有些增加,超过湿陷范围后,其轴力分布规律与未浸水的一致。未浸水桩端阻力小于浸水后的桩端阻力,且其相差较大。

(3) 桩侧摩阻力的充分发挥与其周围土层的工程特性及其土层所处的位置有关,未浸水前,桩侧部分土层的极限桩侧摩阻力为 29.75 ~ 99.87 kPa;浸水后桩的负摩阻力为 - 5.20 ~ - 69.44 kPa,正摩阻力为 29.39 ~ 86.71 kPa。因此,浸水前、后桩侧土层的极限桩侧摩阻力差异明显,前者大于后者。

(4) 桩侧土层浸水后,因黄土的湿陷性使桩和其周围土均有不同程度的沉降变形量,桩与桩周土的平均沉降量分为 0.15, 14 mm。桩周土的沉降变形量是由黄土的湿陷性引起的,桩的沉降变形量则是由于湿陷性在桩体上产生的负摩阻力引起的。

参考文献(References) :

[1] Combarieu O. Pressiometer test and the end-bearing load of piles[J]. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1996, (203) : 61 - 73.

[2] 冯忠居,黄安录. 大直径钻孔灌注桩承载力的研究[A]. 见:第九届全国结构工程学术会议论文集[C]. 北京:清华大学出版社,2000. 449 - 453.(Feng Zhongju, Huang Anlu. Study on bearing capacity of large diameter bored piles[A]. In: Proceedings of the Ninth National Conference on Structural Engineering[C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 449 - 453.(in Chinese))

[3] 冯忠居. 基础工程[M]. 北京:人民交通出版社,2001.(Feng Zhongju. Foundation Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.(in Chinese))

[4] 冯忠居,张永清,李晋. 堆载引起桥梁墩台与基础的偏移与防治技术研究[J]. 中国公路学报,2004, 17(3): 74 - 77.(Feng Zhongju, Zhang Yongqing, Li Jin. Study of displacement of bridge and abutment

- foundation caused by earth piling load and its prevention technique[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 74-77.(in Chinese)
- [5] 李素华, 周健, 殷建华, 等. 摩擦型单桩承载性能设计理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2659-2664.(Li Suhua, Zhou Jian, Yin Jianhua, et al. Study on bearing performance of friction pile foundation in complicated soil-layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2659-2664.(in Chinese))
- [6] 胡庆立, 张克绪. 大直径桩的竖向承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 491-495.(Hu Qingli, Zhang Kexu. Research on axial bearing behavior of large diameter piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 491-495.(in Chinese))
- [7] 王国强, 吴道祥, 赵华宏, 等. 水位消涨对地基侵蚀作用及实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1276-1279.(Wang Guoqiang, Wu Daoxiang, Zhao Huahong, et al. Erosive effect of water level's rising and descending on foundation and relative case study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1276-1279.(in Chinese))
- [8] 曾国熙, 冯国栋, 刘金砺. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.(Zeng Guoxi, Feng Guodong, Liu Jinli. Manual of Pile Foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.(in Chinese))
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路桥涵地基与基础设计规范(JTJ024-85)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Design of Ground and Foundation of Highway Bridge and Culvert(JTJ024-85)[S]. Beijing: China Communications Press, 1985.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路桥涵设计通用规范(JTJ021-85)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. General Specifications for Design of Highway Bridge and Culvert(JTJ021-85)[S]. Beijing: China Communications Press, 1985.(in Chinese))

《岩石力学与工程学报》2005 年第 4 期被 EI 收录论文(30 篇)

No.	论文题目	作者名	页码
1	基于随机-模糊理论的岩石抗剪强度参数的确定	王鹏 李安贵 蔡美峰等	547-552
2	基于模式-遗传-神经网络的流变参数反演	陈炳瑞 冯夏庭 丁秀丽等	553-558
3	岩体 p 型自适应块体单元法研究	汪卫明 陈胜宏	559-564
4	结构性黄土的本构模型	胡再强 沈珠江 谢定义	565-569
5	岩石类非均质脆性材料破坏过程的数值模拟	张德海 朱浮声 邢纪波等	570-574
6	复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用	钟登华 李明超 杨建敏	575-580
7	下凹地形下采空区处理方案的相似模拟研究	李俊平 周创兵 李向阳	581-586
8	风化岩石的破碎分形及其工程地质意义	涂新斌 王思敬 岳中琦	587-595
9	红砂岩膨胀力学特性试验研究	朱珍德 邢福东 刘汉龙等	596-600
10	岩体裂缝面数量三维分形分布规律研究	冯增朝 赵阳升 文再明	601-609
11	多功能共振柱刚性试件试验的可靠性分析	袁晓铭 孙静	610-615
12	岩石统计损伤本构模型及其参数反演	刘齐建 杨林德 曹文贵	616-621
13	裂隙岩体三维网络流的渗透路径搜索	赵红亮 陈剑平	622-627
14	金口垃圾填埋场内大型建筑物地基基础及安全性研究	杨明亮 骆行文 喻晓等	628-637
15	冻土路基地震破坏判别方法研究	王丽霞 凌贤长	638-642
16	双层介质抗爆炸震塌结构的性能研究	李欢秋 吴祥云 李永池	643-648
17	支持向量机在隧道围岩变形预测中的应用	赵洪波	649-652
18	黄麦岭磷矿边坡岩体抗剪强度参数的随机-模糊法取值研究	刘春	653-656
19	堆石料的强度与应力-应变特性	田堪良 张慧莉 骆亚生	657-661
20	岩体非连续裂隙网络三维面状渗流模型	于青春 刘丰收 大西有三	662-668
21	偏应力往返作用下饱和砂土变形特性的试验研究	陈存礼 谢定义	669-675
22	基于混合遗传算法岩土抗剪指标参数识别方法	李守巨 上官子昌 刘迎曦	676-680
23	桩基码头岸坡整体稳定分析的修正	周锡初 王乐芹 王晖等	681-686
24	加筋风积砂地基承载力试验研究及计算分析	李驰 王建华	687-691
25	潮州供水枢纽西溪厂房基坑支撑的优化	吴海峰 曹洪 潘泓等	692-696
26	土质边坡加固中预应力锚索框架内力分布的试验研究	朱宝龙 杨明 胡厚田等	697-702
27	地震作用下土坡可靠度风险分析	贾超 刘宁 陈进	703-707
28	类土质边坡开挖的卸荷作用及卸荷带宽度的确定	赵晓彦 胡厚田 庞烈鑫等	708-712
29	弹丸对混凝土薄板的冲击破坏效应	董军 邓国强 杨科之等	713-720
30	能量法在土钉支护结构分析中的应用	梁仕华 应宏伟 谢康和等	721-728