

方法系统研究了饱和粉土中单桩在长期竖向循环荷载作用下的承载和变形性状及累积沉降调控方法.郭鹏飞^[12]选取兰州黄河沿岸某单层工业厂房作为实例,研究不同循环荷载幅值、不同桩周土对单桩承载性质的影响.

现有的循环荷载下的承载性能试验初步揭示了桩基在循环荷载作用下的沉降与静力计算结果有差异.但现有的研究多是针对建筑工程、海洋工程及厂房荷载开展的,对桥梁承受的活载对桩基础的作用特性,活载作用频次、频率等对沉降及桩侧、桩端阻力的影响尚未开展深入研究.室内模型试验中不同的桩基模型材料、桩的入土模式、桩土接触的密实程度和数据采集设备及测试手段均会影响桩壁阻力、桩底反力以及桩顶累积沉降达到稳定时的循环次数.从现有服役桥梁技术状况评定和承载力评定的研究来看,这些领域目前的深入研究很少,不能满足对服役桥梁桩基础承载力做出科学的诊断与评价的需求.本文主要采用自制加载设备,外径为 48 mm,壁厚 3.5 mm 钢管外包 16 mm 厚的玻璃纤维水泥砂浆作为模型桩,桩长为 1 600 mm,在砂土地基进行静载及循环加载试验,研究砂土中的复合材料模型桩在静载、循环荷载下的承载变化机理,为服役桥梁基础承载力的评定提供服务.

1 模型试验简介

1.1 试验设计

试验采用长×宽×高=2 000 mm×2 000 mm×3 000 mm 的模型试验槽^[11-13].模型试验槽底部和 3 个侧面均为带肋钢板拼接而成,每块钢板长×宽=500 mm×500 mm;最后一个侧面为角钢配合钢化玻璃拼接而成,如图 1 所示.砂土采用苏北地区建筑用砂,含水率为 7.9%,密度为 1.6 g/cm³,内摩擦角为 49.05°.

为了更好地模拟钻孔桩表面与砂土间的粗糙接触,采用水泥砂浆内包钢管的形式.内包钢管外径为 48 mm,壁厚 3.5 mm,将 DY. E. 44 型新一代环氧树脂胶与 DY. EP 型新一代环氧固化剂按 1:1 进行混合后涂于钢管表面,并在水泥砂浆中掺加早强剂和玻璃纤维,将水泥砂浆涂于混合剂表面,外包水泥砂浆厚度为 16 mm,最终形成的

复合模型桩的外径为 80 mm,埋入砂土地基中深度为1 600 mm,形成桩径桩长比为 1:20,如图 2 所示.

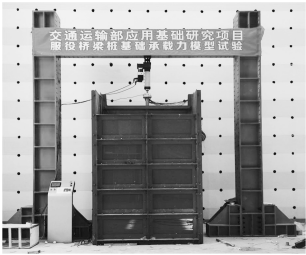


图 1 模型试验槽立面图

Fig. 1 Elevation of model test box



图 2 模型桩图

Fig. 2 Photo of model pile

桩身轴力的量测采用粘贴应变片的方式.应变片在浇水泥砂浆前贴在钢管外侧,采用 201 胶水粘贴应变片和接线片,烘干后焊接导线,然后把 703 胶涂在应变片、接线片和接点表层,最后把 DY. E. 44 型新一代环氧树脂胶与 DY. EP 型新一代环氧固化剂按 1:1 进行混合后涂在导线外侧,使其与钢管粘接牢固,固化后,它既能隔水防潮,又能保护应变片不受外界的影响,同时也增强了水泥砂浆和钢管间的黏接.

1.2 加载及采集系统

采用特制电动循环加载设备进行加载.在桩身上首先分级施加一个轴向静载,直至桩基出现破坏,然后再进行循环加载.循环加载时,在桩身上首先分级施加一个轴向静载,其值为桩基极限荷载的 40%;然后再施加一个频率为 0.25 Hz 的正弦荷载,其幅值为桩基极限荷载的 10%,以模拟服役期桩基上活载情况.数据采集采用静态和动态应变仪,可以采集桩身应变、桩顶沉降以及桩底土压力,如图 3 所示.



图3 数据加载及采集系统

Fig.3 Data loading and data acquisition system

本试验中加载分为静载、循环加载、卸载三个环节,加载公式如下:

$$P(t) = P_s + \frac{1}{2}P_c + \frac{1}{2}P_c\sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为实际加载在模型桩顶荷载值; P_s 为为模型桩恒载设计值; P_c 为循环荷载幅值,即单桩承担的活载值; ω 为循环荷载角频率, $\omega = 2\pi f$, $f = 0.25\text{ Hz}$; t 为加载时间.

所施加的循环荷载如图4所示.

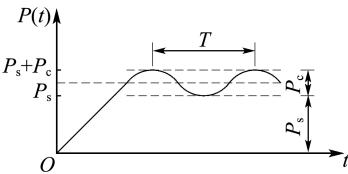


图4 循环加载示意图

Fig.4 Sketch map of cyclic loading

1.3 量测仪器布置

分别采用应变片、土压力盒和位移计3种测量仪器.测试的内容主要有桩身应变、桩底土压力以及桩顶位移沉降量.其立面布置如图5(a)所示.桩身应变片布置如图5(b)所示.其应变片沿桩身纵向每200 mm的每一断面上安装4片,共8层.最下层距桩底为100 mm.

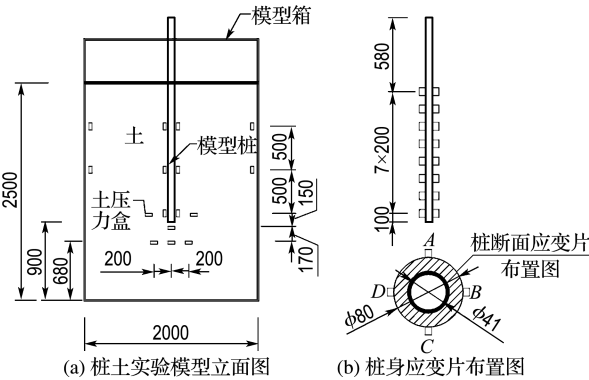


图5 测量仪器布置图(单位:mm)

Fig.5 Map of measuring instrument (unit: mm)

2 试验结果及分析

2.1 数据处理依据

为了确定桩的极限承载力,试验过程中应随时整理试验资料并作如下的一些初步判断:

(1)破坏荷载.为确定桩的极限承载力,模型桩须加载到破坏.

(2)极限荷载.破坏荷载前一级的荷载,为极限荷载.

(3)桩侧摩阻力的计算.根据实测的桩顶荷载 P 、桩底反力 R 和桩身轴力 N_i 计算桩侧摩阻力 F_i 的方法如图6所示.先计算桩身轴力,在桩埋入砂土前对桩进行加载试验,得到桩身的刚度,然后在桩埋入砂土后进行加载试验,根据桩身应变及刚度计算桩身轴力,再将桩进行分段计算桩侧摩阻力.

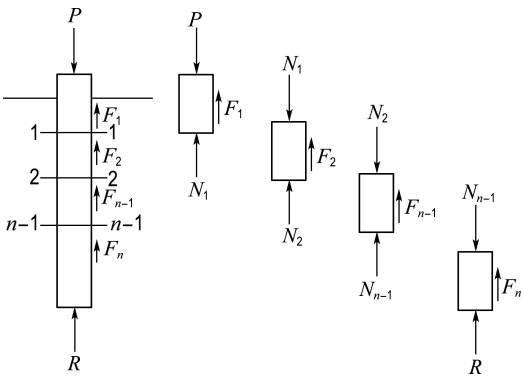


图6 桩侧摩阻力计算简图

Fig.6 Sketch of calculation of pile wall resistance

2.2 静载试验结果分析

试验加载前对加载反力架进行了强度、刚度验算,因加载力相对其刚度很小,故反力架变形不予考虑.模型试验采用定做的伺服电动缸按慢速维持荷载法进行逐级加载.并根据所加荷载与桩顶沉降值,通过绘测 $P-s$ 曲线确定桩端土体的破坏状态.本试验最终加载到9 kN,且沉降不稳定,故确定此复合桩基的极限承载力为上一级荷载8 kN,所对应的最大沉降量为7.21 mm,静载试验中荷载与沉降曲线见图7,桩侧摩阻力随桩身入土深度 h 变化曲线如图8所示,桩底反力与荷载间关系曲线如图9所示,桩身轴力沿桩身深度变化曲线如图10所示.

由图 7~10 可知,桩在工作荷载作用下,桩顶 P - s 曲线呈直线,表明桩基基本处于弹性工作状态. 桩侧摩阻力随着桩身入土深度及所加荷载大小不同而不同,荷载小时,桩侧摩阻力较小,沿深度变化不明显,表明此时桩侧摩阻力没有发挥作用;而随着荷载的加大,桩侧摩阻力变化明显,表明在竖向加载过程中,桩与土间的相对位移,使得桩侧摩阻力逐步发挥出来. 桩底反力也随着荷载

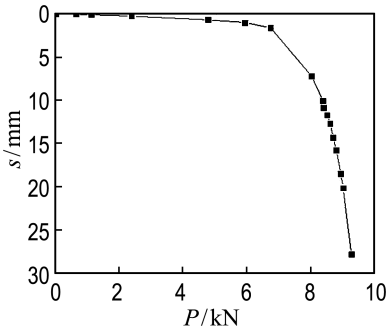


图 7 静载试验 P - s 曲线

Fig. 7 P - s curve of static loading

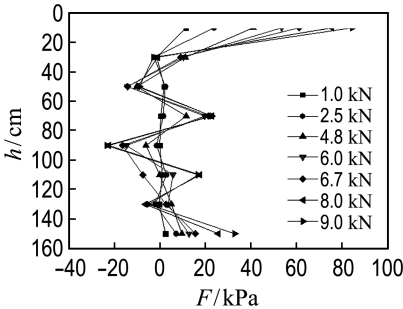


图 8 桩侧摩阻力随桩身入土深度变化曲线

Fig. 8 Change curve of pile wall resistance with the depth of pile into soil

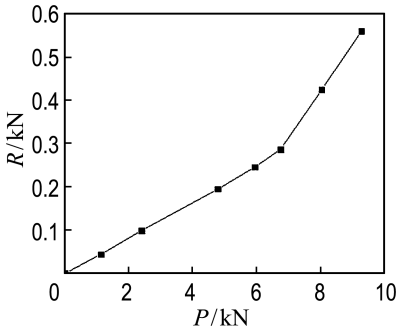


图 9 桩底反力随桩顶荷载变化曲线

Fig. 9 Change curve of pile bottom reaction force with the pile top load

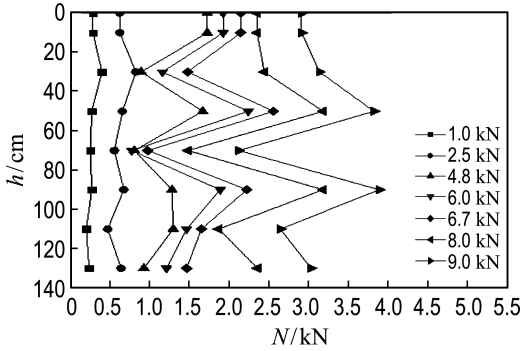


图 10 桩身轴力沿桩身深度变化曲线

Fig. 10 Change curve of axial force along the depth of pile

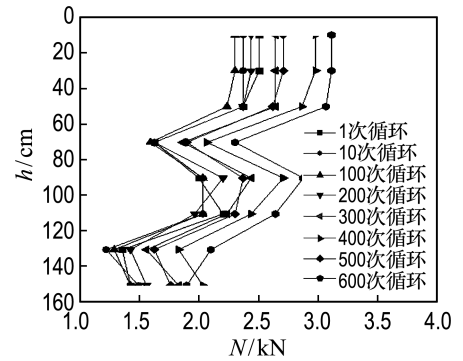
的增加而逐步增加,在桩顶荷载为 7 kN 左右后,桩底反力变化加剧. 桩身轴力随荷载的增加而增加.

2.3 循环加载试验结果分析

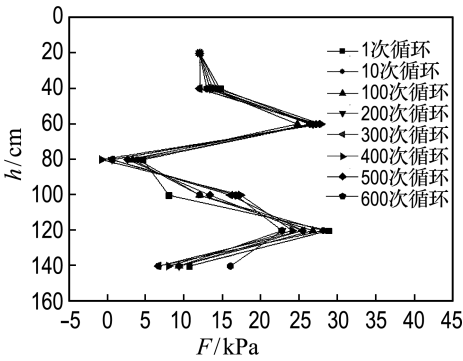
循环加载时,先在桩顶分级施加到静载 3.6 kN,然后再以幅值为 0.4 kN 正弦荷载进行循环加载. 模拟服役桩基在正常运营状态下的承载特性,结果见图 11~13.

由图 11、12 曲线可知,循环加载 600 次后,同荷载水平下桩身轴力和桩底反力分别由 1.710 kN 和 0.194 kN 增加到 2.400 kN 和 0.291 kN,分别提高 40.4%和 50.0%. 由图 8 和 11 可知,桩侧摩阻力沿桩身深度均有不同变化,在桩深度 60、100 cm 和桩底处有所增加,其他深度处均呈减小趋势. 由图 7 和 12 可见桩顶沉降由静载时的 0.71 mm 增加到循环加载 600 次后的 0.92 mm,提高了 29.6%. 对比两种加载所得结果可知,相对于静载阶段,由于桩与土接触面的多次循环荷载,桩侧摩阻力有所下降,而随着循环加载次数的增加,桩底土体越来越密实,桩侧摩阻力的下降也提高了桩底反力来平衡外部所加荷载. 图 11(c)、(d)显示,在多次竖向循环加载时,桩底反力以及桩顶沉降基本不变. 由图 13 可知,当桩顶循环加载为极限承载力的 10%,循环加载达到 $4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ 次以后桩顶沉降量增加可以忽略. 且经过 10×10^4 次循环以后模型桩的极限承载力为 10 kN,比静载的极限承载力 8 kN 提高了 25%,试验结果表明在小振幅下多次循环加载时,桩的极限承载力有所增加.

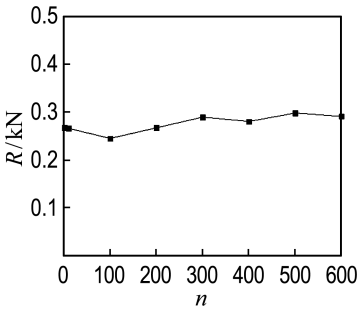
试验结果表明,当循环荷载较小时,桩顶沉降在很小的循环次数下很快达到稳定,桩身轴力和



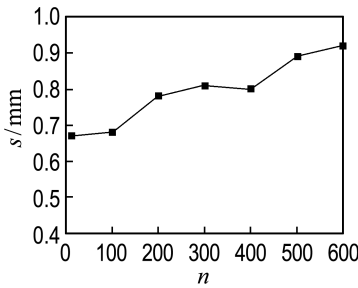
(a) 轴力曲线



(b) 桩侧摩阻力曲线



(c) 桩底反力曲线



(d) 桩顶沉降曲线

图 11 桩承载性能与循环加载次数关系曲线
Fig. 11 Relationship curves of bearing capacities of pile with the number of cyclic loading

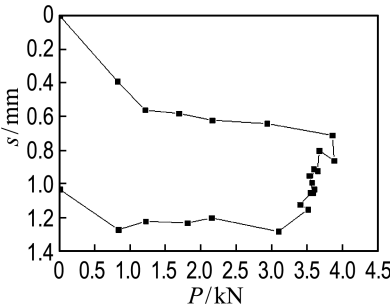
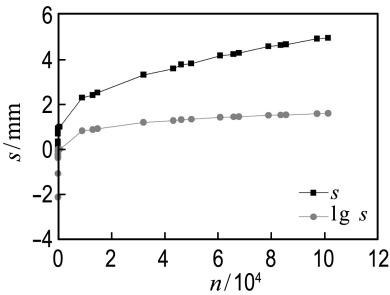
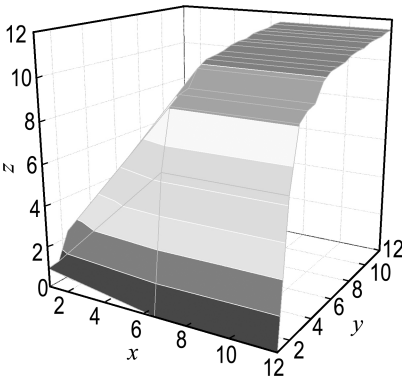


图 12 循环加载 600 次后桩顶加载-卸载沉降曲线

Fig. 12 Curve of settlement of pile top with 600 times of cyclic loading



(a)



(b)

图 13 循环加载次数与桩顶沉降关系曲线

Fig. 13 Curve of settlement of pile top and number of cyclic loading

桩底反力均有所增加,桩壁竖向摩阻力有所下降,与文献[3,5-12]中相应结果进行对比,其变化趋势与文献均一致,本文试验结果可信.文献[13]中循环荷载比小于等于 0.1 时,累积沉降为不发展型,这与本文所得的结果趋势一致.只是在本文中循环荷载比为 0.1,而循环加载次数达 $1.0 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4$ 后趋于稳定,原因是文献[13]中模型桩采用千斤顶静力压入的方式打入至设计深

度,而本文是采用将模型桩预埋在土内,两者与桩侧土的接触面受力机理不同,故本文中产生的累积沉降与文献[13]略有不同;同时沉降稳定时循环加载的次数也不同,本文因模型桩与桩周土体摩阻力较大,而沉降达到稳定时克服桩侧摩阻力所需要的循环次数高于文献[13]中的循环次数.此外,本文针对循环加载后模型桩进行极限承载力试验,初步探索了桩在静载和循环荷载作用前后的承载力变化特点.

3 结 论

(1)在静荷载和竖向循环荷载的共同作用下,桩顶沉降、桩身轴力及桩底反力随着循环次数增加而增加,桩侧摩阻力则减小.在循环 10 万次后,桩的极限承载力由 8 kN 增加到 10 kN,表明桩的极限承载力与循环次数有关.

(2)在循环荷载作用下,桩身轴力和桩底反力均有所增加,桩侧摩阻力变化主要集中在距桩顶 $1/3 \sim 3/4$ 桩身深度范围的土层中.

(3)在循环荷载比为 0.1 时,循环加载次数达 $1.0 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4$ 以后,桩顶沉降基本达到稳定.

参考文献:

- [1] Al-Douri R H, Poulos H G. Predicted and observed cyclic performance of piles in calcareous sand [J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1995, **121**(1):1-16.
- [2] Poulos H G. Cyclic axial loading analysis of piles in sand [J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1989, **115**(6):836-852.
- [3] 徐 和,陈竹昌,任陈宝. 在轴向循环荷载作用下砂土中模型桩的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, **11**(4):64-71.
XU He, CHEN Zhu-chang, REN Chen-bao. Model test on pile under axial cyclic loading in sand [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, **11**(4):64-71. (in Chinese)
- [4] 陈竹昌,徐 和. 土类对轴向循环荷载下桩性状的影响[J]. 同济大学学报, 1989, **17**(3):329-336.
CHEN Zhu-chang, XU He. Influence of soil type on behavior of cyclic axially loaded pile [J]. **Journal of Tongji University**, 1989, **17**(3):329-336. (in Chinese)
- [5] 杨龙才,郭庆海,周顺华. 高速铁路桥桩在轴向循环荷载长期作用下的承载和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(13):2362-2368.
YANG Long-cai, GUO Qing-hai, ZHOU Shun-hua. Dynamic behaviors of pile foundation of high-speed railway bridge under long-term cyclic loading in soft soil [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, **24**(13):2362-2368. (in Chinese)
- [6] 律文田. 静动荷载作用下铁路桥梁桩基的动力特性研究[D]. 长沙:中南大学, 2005.
LÜ Wen-tian. Study on dynamical characteristics of the railway bridge pile foundation under static-dynamic load [D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese)
- [7] 彭雄志,赵善锐,罗书学,等. 高速铁路桥梁基础单桩动力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2):218-221.
PENG Xiong-zhi, ZHAO Shan-rui, LUO Shu-xue, *et al.* Dynamic model tests on pile foundation of high-speed railway bridge [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, **24**(2):218-221. (in Chinese)
- [8] 黄 清. 循环荷载作用下单桩沉降规律研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
HUANG Qing. Settlement behaviour of single piles under cyclic loading [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [9] 黄 雨,柏 炯,周国鸣,等. 单向循环荷载作用下饱和砂土中单桩沉降模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(9):1440-1444.
HUANG Yu, BAI Jiong, ZHOU Guo-ming, *et al.* Model tests on settlement of a single pile in saturated sand under unilateral cyclic loading [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, **31**(9):1440-1444. (in Chinese)
- [10] 朱 斌,任 宇,陈仁朋,等. 竖向向下压循环荷载作用下单桩承载力及累积沉降特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2):186-193.
ZHU Bin, REN Yu, CHEN Ren-peng, *et al.* Model test on bearing capacity and accumulated

settlement of single pile subjected to axial cyclic loading [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, **31**(2):186-193. (in Chinese)

[11] 任 宇. 长期竖向循环荷载作用下桩的变形特性试验及理论研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.

REN Yu. Model test and theoretical study on deformation behavior of single piles to long-term cyclic axial loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)

[12] 郭鹏飞. 循环荷载作用下饱和黄土地基单桩承载特性模型试验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2013.

GUO Peng-fei. Model test on bearing capacity of single pile under cyclic load in saturated loess [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013. (in Chinese)

[13] 陈仁朋,任 宇,陈云敏. 刚性单桩竖向循环加载模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1926-1933.

CHEN Ren-peng, REN Yu, CHEN Yun-min. Experimental investigation on a single stiff pile subjected to long-term axial cyclic loading [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, **33**(12):1926-1933. (in Chinese)

Research on model tests of bearing capacities for composite pile foundation under static and cyclic loading in sand

HU Juan^{*1,2}, SONG Yi-fan¹, HE Shuan-hai¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: With the wide application of pile foundation, there are more and more researches on the bearing mechanism between the pile and soil. According to the contact between pile and soil, a large proportional pile-soil model test was adopted, and in order to simulate the friction effect of pile and soil better, the pile material was improved in the test, and a set of loading and measuring apparatuses were developed to adapt the vertical static and cyclic loading. The tests of vertical static and cyclic loading were taken on the composite pile foundation in sand, and the pile top settlement, the axial force and lateral friction resistance of pile, pile bottom reaction force were analyzed. The experimental results show that the pile performances are enhanced with the increasing of the loading numbers; the pile top settlement being improved by 29.6%, the axial force being improved by 40.4%, lateral friction resistance being decreased, pile bottom reaction force being increased by 50%, and the pile ultimate bearing capacity being increased by 25%, which provides a reference for the study of interaction between pile and soil under different loading conditions for the serviced pile foundation in the future.

Key words: static loading; cyclic loading; composite pile foundation; bearing capacities; model test