

DOI: 10.11779/CJGE201503021

长期竖向循环荷载作用下黄土中单桩沉降特性 模型试验研究

郭鹏飞¹, 王 旭², 杨龙才¹, 罗浩威³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 中铁西北科学研究院有限公司深圳南方分院, 广东 深圳 518048)

摘要: 长期竖向循环荷载作用下单桩的沉降特性与静载情况下明显不同, 通过黄土及饱和黄土中单桩的竖向循环荷载试验, 分析了循环荷载作用下单桩的累积位移发展模式, 研究了桩顶位移 s 及循环位移幅值 ρ_c 随循环次数 N 的变化规律。试验发现: 黄土饱和后单桩的承载力明显下降; 饱和前后单桩循环荷载试验的 $s-N$ 曲线都可采用幂函数进行描述; 相同荷载大小时, 饱和前单桩的循环荷载位移小于静载位移, 循环位移比(循环荷载位移与静载位移的比值)介于 0.6 与 0.8 之间, 而饱和后单桩的循环荷载位移明显大于静载位移, 且循环位移比随循环荷载比线性增长; 饱和前单桩的循环位移幅值明显大于饱和后的位移幅值, 主要受循环荷载幅值及桩周土性质的影响。

关键词: 循环荷载; 桩; 黄土; 饱和黄土; 模型试验

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)03-0551-08

作者简介: 郭鹏飞(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为岩土及地下工程。E-mail: tjdxgpf@163.com。

Model tests on settlement of single pile in loess under long-term axial cyclic loading

GUO Peng-fei¹, WANG Xu², YANG Long-cai¹, LUO Hao-wei³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. South Branch of Northwest Research Institute Co., Ltd. of CREC, Shenzhen 518048, China)

Abstract: The settlement of a single pile under long-term axial cyclic loading is different from that under static loading. To study how the pile-top displacement s and displacement amplitude ρ_c change with the number of cycles and to analyze the development model of pile-top cumulative displacement under cyclic loading, a series of single-pile model tests on loess and saturated loess are performed. It is found that the static bearing capacity of the single pile in saturated loess is much lower than that in loess. The test $s-N$ curve of pile head under cyclic loading in loess and saturated loess can be described by power function. With the same load size, the displacement of the single pile under cyclic loading is lower than that under static loading in loess. The cyclic displacement ratios (ratio of cyclic load displacement to static load displacement) are mostly in the range of 0.6 to 0.8. But the displacement of the single pile under cyclic loading is much higher than that under static loading in saturated loess, and the cyclic displacement ratios will grow with the cyclic loading ratio in a linear rule. The single-pile displacement amplitude under cyclic loading in loess is obviously higher than that in saturated loess, and it is mainly because of the cyclic loading amplitude and soil properties.

Key words: cyclic loading; pile; loess; saturated loess; model test

0 引言

随着中国基础建设的不断发展, 循环荷载作用下桩基的沉降问题受到了研究人员的广泛重视, 在一些重要的交通运输、新型能源及重型工业厂房等工程中, 上部结构在使用期间会受到交通、风、海浪、重型吊车等周期性荷载作用, 此类工程的桩基不仅要承担上部结构的静荷载, 还要承受上部传递下来的循环荷载

作用^[1]。

目前已有一些国内外学者对竖向循环荷载作用下桩基的沉降特性进行了相关研究, 这些研究主要集中在循环荷载作用下桩基的累积位移发展模式、刚度

基金项目: 国家自然科学基金项目(51268030, 41262010); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1136)

收稿日期: 2014-07-22

退化模式、承载力变化、桩侧及桩端阻力变化等方面^[2-3]，Polous^[4]选用钙质砂和黏土为介质进行了循环荷载下单桩的累积沉降变形试验，通过分析指出了循环荷载作用下桩基研究中应关注的问题：①循环荷载作用下桩基桩土界面强度的变化；②循环次数及荷载频率；③桩顶沉降的累积变形规律。

杨龙才等^[3]通过现场原位试验研究了长期循环荷载作用下高速铁路桥梁桩基振动位移幅值、桩顶累积沉降及单桩承载力的变化情况。黄雨等^[2]对饱和砂土中的单桩进行竖向循环加载，测试了不同循环荷载比条件下桩顶的累积沉降及动位移幅值，拟合出了沉降曲线的回归方程。朱斌等^[1]开展了不同侧/端阻比条件下单桩的竖向下压循环荷载作用的模型试验，通过试验发现：存在一最小临界循环荷载比，当循环荷载比小于该值时，桩顶累积沉降不随循环次数而增加。陈竹昌^[5]基于以往的循环荷载作用下桩基模型试验资料探讨了通过控制循环荷载作用下桩的位移条件来确定桩承载力的方法，给出了位移控制条件的确定方法及建议值。这种基于循环荷载下桩顶累积位移曲线的设计准则并没得到广泛应用，中国的桩基设计规范仍沿用大幅提高桩基承载安全储备的设计思路。由于缺乏对循环荷载作用下桩基承载特性的认识，该思路总体上比较盲目，一方面，安全系数取值较高易造成资源浪费；另一方面由于缺乏对长期循环荷载作用下桩基沉降特性的认识，易导致桩基沉降过大，影响结构物的服役状态。

在以往的研究中，试验研究居多，理论研究较少，缺乏合理的力学模型进行解释^[6]。从试验的循环加载次数看，小比例模型试验的加载次数较大（2000 次左右），大比例及足尺模型试验的加载次数较小（250 次左右）^[7-11]，总体上讲，可供分析的试验数据仍然缺乏。且在模型试验中，多采用砂土及软黏土作为介质，特殊土中的模型试验较少，尤其是在结构性较强的黄土中进行的模型试验则更为鲜见。基于以上情况，利用自行设计的加载系统进行黄土及饱和黄土中单桩竖向循环荷载模型试验研究，对比分析了循环荷载对黄土饱和前后单桩沉降特性的影响，为今后的理论分析提供数据支持。

1 模型试验简介

1.1 模型试验装置

试验模型槽尺寸为 80 cm×60 cm×80 cm（如图 1 所示），采用角钢框架和有机玻璃板拼装而成，玻璃板厚 1 cm，表面光滑，能够满足加载过程中对强度及刚度的要求，并能有效减小试验中的边界效应，模型槽

四周进行了防水处理。反力架由下底板、可移动式反力梁及连接螺栓组成。下底板为格构板，采用 1 cm 厚钢板焊接而成，可移动式反力梁如图 2 所示，由 4 根 160 mm×88 mm×6 mm 工字钢螺栓拼装而成，下底板与反力梁通过 4 根 Φ32 丝杆进行连接。



图 1 模型槽及反力架

Fig. 1 Model slot and counterforce frame

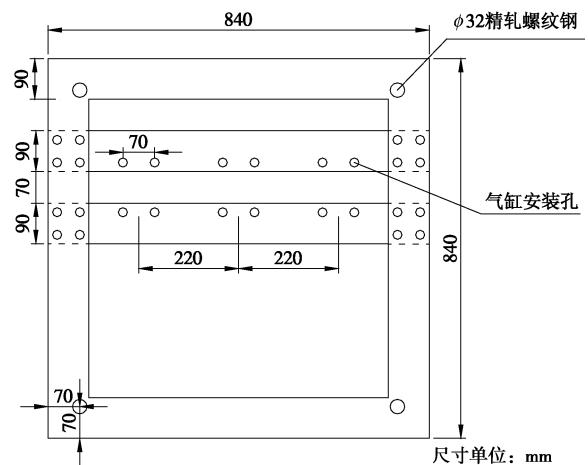


图 2 移动式反力梁示意

Fig. 2 Sketch map of portable counterforce beam

图 3 为模型试验系统的连接示意图，由反力系统、加载控制、数据采集 3 部分组成，所使用的元器件有空气压缩机、电器比例阀、信号发生器、机电百分表、动态应变采集仪。系统工作时，空气压缩机为系统提供气体压力，电气比例阀根据信号发生器的指令对气压进行调节，进而通过气缸对桩顶进行循环加载。电压信号与输出压力之间的转换公式为

$$Q_t = \gamma \omega V_t P \quad (1)$$

式中， Q_t 为气缸输出荷载 (N)， γ 为气缸的气压与荷载比例系数 (N/kPa)， ω 为电气比例阀的控制系数 (1/V)， V_t 为某时刻的电压信号 (V)， P 为气缸气压 (kPa)。信号发生器可根据实际需要提供以某种规律变化的电压信号，实现各种静荷载与动荷载的加载控制，桩顶沉降自动采集系统由机电百分表与应变采集

表1 黄土及饱和黄土的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of loess and saturated loess

名称	孔隙比	含水率 /%	密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和度 /%	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	压缩模量 /MPa
黄土	0.89	14.5	1.63	1.56	43	24.4	21.6	8.7
饱和黄土	0.75	26.9	1.97	1.63	95	7.5	5.9	2.4

仪组成。

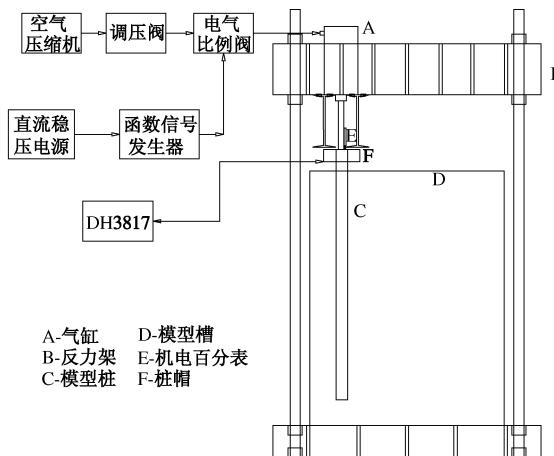


Fig. 3 Schematic diagram of apparatus in model tests

1.2 模型试验材料

模型桩采用细骨料混凝土预制而成, 桩长 60 cm, 直径 4 cm, 混凝土强度等级 C30, 中间设置 $\Phi 6$ mm 钢筋, 配筋率为 2.25%, 模型桩的弹性模量为 16 GPa。试验用土取自兰州黄河沿岸, 土粒比重 2.71, 含水率 8.4%, 液限 30.8%, 塑限 18%, 最优含水率 18.8%, 最大干密度 $1.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

采用分层填土、夯实的方法进行模型填筑, 每层厚 5 cm, 层与层之间刮毛处理, 防止土体分层。填筑过程中, 将模型桩设置在预定位置并分层埋入土中, 保证桩周土体均匀密实, 土层总厚 75 cm, 模型桩入土深度 55 cm, 桩位布置如图 4 所示。对于饱和黄土中的模型试验, 填筑完成后从模型槽顶面缓慢注水, 将模型槽内土体浸泡至饱和状态, 停水并静置一段时间后方可进行桩顶加载 (使土体充分固结并消散孔隙水压力)。

表 1 为模型中黄土及饱和黄土的各项物理力学指标。对比分析发现, 当含水率与湿密度提高后, 土体的压缩模量与抗剪强度等力学特性明显降低, 这与黄土存在明显的结构性有关, 黄土浸水饱和过程中, 土体会经历结构破坏—湿陷沉降—重新固结这样一个物理过程。由于含水率发生了变化, 固结完成后的土体强度依然较饱和前明显降低。试验过程中, 黄土饱和后土体表面发生了 1.6 cm 的沉降变形。

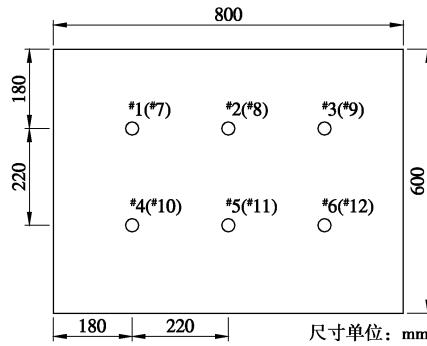


图4 模型桩位布置

Fig. 4 Layout of model piles

2 模型试验方案及参数选取

2.1 模型试验方案

为了考察循环荷载对黄土中单桩沉降变形的影响, 对比分析黄土饱和前后桩基循环荷载沉降性能的差异, 试验分两组进行。先进行非饱和条件下的模型试验, 试验完成后重新填筑模型并更换模型桩, 进行浸水饱和黄土条件下的模型试验。每组试验根据荷载类型又分为静载试验和循环荷载试验, 通过静载试验确定单桩的极限承载力 Q_{uk} , 定义循环荷载幅值 Q_c 与 Q_{uk} 的比值 λ 为循环荷载比^[1], 即 $Q_c = \lambda Q_{uk}$, 变换不同的循环荷载比 λ 依次进行不同荷载幅值下的循环荷载试验, 模型试验方案见表 2。

表2 模型试验方案

Table 2 Schemes of model tests

填土类型	荷载类型	桩号	荷载特点	循环次数
黄土 (第一组)	静荷载	#1	确定极限承载力 Q_{uk}	—
		#2	$\lambda=0.125$	9641
	动荷载	#3	$\lambda=0.25$	9823
		#4	$\lambda=0.5$	9953
		#5	$\lambda=0.75$	10964
		#6	$\lambda=1$	9271
饱和 黄土 (第二组)	静荷载	#7	确定极限承载力 Q_{uk}	—
		#8	$\lambda=0.25$	9413
	动荷载	#9	$\lambda=0.5$	9715
		#10	$\lambda=0.75$	9910
		#11	$\lambda=1$	12779

2.2 试验加载参数

选取正弦规律变化的循环荷载 $Q_t = Q_c \sin(\omega t)$, 其中 ω 为循环荷载周期, 对于 ω , 国外研究海上风力涡

轮机单桩基础时^[7-10], 选择的周期多为 1.5~360 s, 范围跨度很大, 文献[3]通过计算确定了高速铁路运载条件下桥梁桩基的动频率为 5~25 Hz, 频率较高, 为了便于分析, 本次试验中采用的周期为 1 s。循环荷载气缸可提供的最大循环荷载幅值 Q_c 为 5 kN。图 5 为加载过程中的循环荷载波形图。

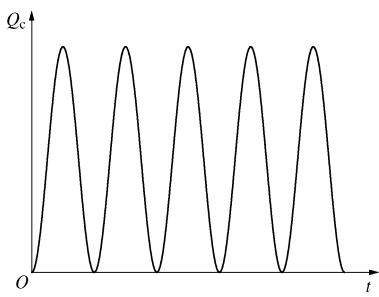


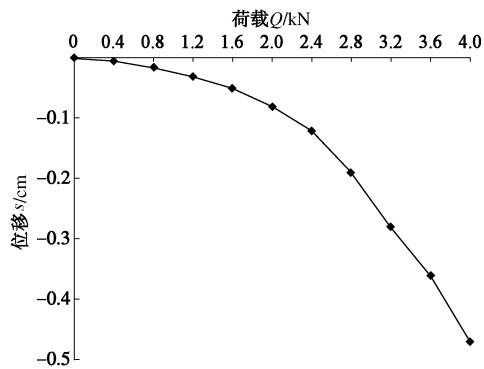
图 5 循环荷载波形

Fig. 5 Waveform of cyclic loading

3 模型试验与结果

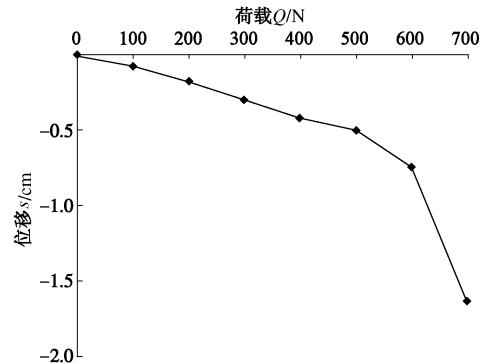
3.1 静载试验

首先进行静载试验确定单桩极限承载力, 静载试验采用快速维持荷载法分级加载。桩周为非饱和土时, 每级加载 400 N, 最大荷载 4 kN, 通过实测的 $Q-s$ 曲线、 $s-\lg(t)$ 曲线确定^{#1} 桩的极限承载力为 3 kN, 对应的桩顶位移为 2 mm。当桩周填土饱和后, 每级加载 100 N, 最大加载量 700 N, 破坏形式表现为刺入破坏, 测得^{#7} 桩的极限承载力 400 N, 对应的桩顶位移 4 mm。对比分析两组静力试验, 黄土饱和后, 单桩极限承载力仅为饱和前的 0.13 倍, 承载力明显降低; 考察单桩的割线刚度, ^{#1} 及^{#7} 桩分别为 150, 10 kN/mm, 饱和后的单桩割线刚度是饱和前的 0.67 倍, 即黄土饱和后单桩的抵抗变形能力急剧降低。图 6, 7 分别为两组静载试验所对应的 $Q-s$ 曲线。

图 6 ^{#1} 单桩静载 $Q-s$ 曲线 (黄土)Fig. 6 $Q-s$ curves of static loading of single pile No. 1 (loess)

由单桩的静载试验发现, 浸水饱和后, 由于含水率提高, 黄土的结构特性发生变异, 桩土界面处的抗

剪强度与压缩模量降低, 同时桩基的承载力与割线刚度也明显降低。因此, 对于黄土中易受浸水影响的桩基, 不仅要考虑湿陷变形的影响, 同时也应对浸水后桩基的承载力降低问题引起足够的重视。

图 7 ^{#7} 单桩静载 $Q-s$ 曲线 (饱和黄土)Fig. 7 $Q-s$ curves of static loading of single pile No. 7 (saturated loess)

3.2 循环荷载试验

确定单桩极限承载力后, 根据模型试验方案依次进行了不同循环荷载比条件下的循环荷载试验, 图 8 为典型循环荷载作用下桩顶位移的实测时程曲线 (^{#6} 桩), 循环荷载比 $\lambda=1$, 循环荷载幅值 3000 N, 荷载频率 1 Hz。由曲线可知, 单个作用周期内, 桩顶位移随荷载呈周期性变化, 每次循环后, 桩顶会发生一定量的残余变形, 桩顶变形由弹性变形和残余变形两部分组成, 桩顶累积位移随循环次数不断增加。定义 ρ_c 为桩顶的循环位移幅值, 即单个周期内桩顶的最大位移与最小位移之差, 可见, 循环荷载作用初期, 残余变形大, 桩顶累积位移发展速度快, 循环位移幅值相对较小; 随着循环次数的不断增加, 桩顶累积位移的增加速率逐渐减小并趋于稳定, 但位移幅值却有所增大。

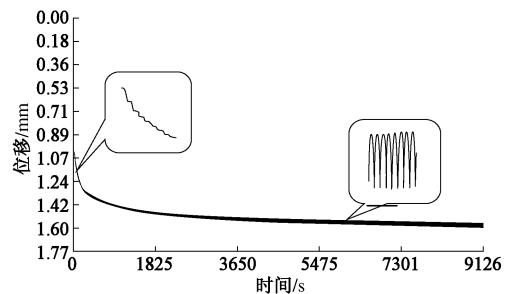


图 8 桩顶位移时程曲线

Fig. 8 Curves of pile top displacement

(1) 黄土中单桩循环荷载试验

绘制桩顶沉降随循环次数 N 的变化曲线, 曲线中的时间间隔前期短后期长, 图 9 为 λ 取不同值时桩顶累积位移 s 随循环次数 N 的变化曲线, 从图中可以发现, 当 λ 较小时 ($\lambda=0.125, 1.25$), 桩顶位移随循环

次数 N 的变化较小, 9000 次循环后, 单桩的累积位移不足 0.1 mm, 这与文献[1]中的规律相同。随着循环荷载比的增大桩顶的最终位移不断增大, 当 λ 等于 1 时桩顶的最终位移为 1.6 mm, 累积位移逐渐趋于稳定, 不会随循环次数 N 而无限增加; 当循环荷载比大于 1 才会出现上述状况。

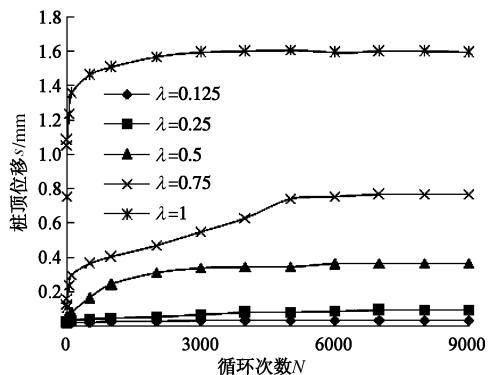


图 9 循环荷载试验 s - N 曲线 (黄土)

Fig. 9 s - N curves of cyclic loading tests (loess)

绘制 λ 取 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1 时, 9000 次循环后桩顶最终累积位移的 Q - s 曲线, 并与静载试验的 Q - s 曲线进行对比 (如图 10 所示)。可以发现, 静荷载与循环荷载条件下, 桩顶位移都随荷载增大而增大, 且都呈抛物线形增长, 但循环荷载条件下的位移明显小于静载位移。

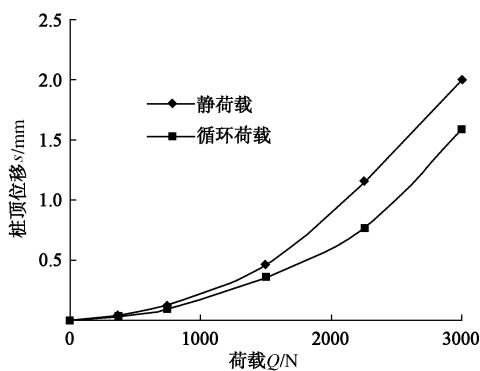


图 10 静荷载、循环荷载 Q - s 曲线 (黄土)

Fig. 10 Q - s curves of static and cyclic loadings (loess)

(2) 饱和黄土中单桩循环荷载试验

图 11 为不同循环荷载比条件下的 s - N 曲线, 桩周填土为饱和黄土, 可以发现, 当循环荷载比较小时桩顶即发生明显沉降, 当 λ 等于 0.25 时, 9000 次循环后的桩顶累积位移为 0.9 mm, 为黄土中的 9 倍; 当 λ 大于 0.5 (临界循环荷载比) 时, 桩顶位移不能趋于稳定, 桩顶位移随循环次数而不断增大, 但增加速率逐渐减缓; λ 等于 1 时, 9000 次循环后的桩顶累积位移为 9.9 mm, 为非饱和时的 6.25 倍。

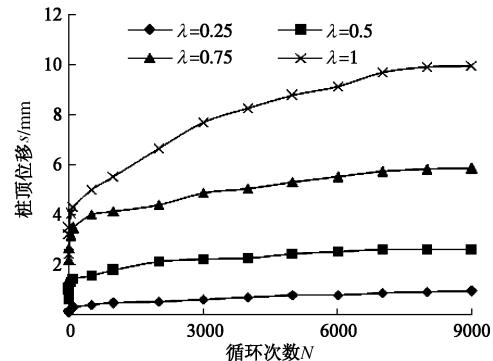


图 11 循环荷载试验 s - N 曲线 (饱和黄土)

Fig. 11 s - N curves of cyclic loading tests (saturated loess)

图 12 为 λ 取不同值时循环荷载与相应静荷载的 Q - s 对比曲线, 可见, 循环荷载条件下的位移明显大于相应的静载位移, 对于静载情况, 桩顶位移随荷载线性增长, 而对于循环荷载, 当 Q 等于 200 N 时曲线开始出现了明显的陡降段, 此时 λ 等于 0.5, 桩顶位移随荷载的增加速率明显加快。

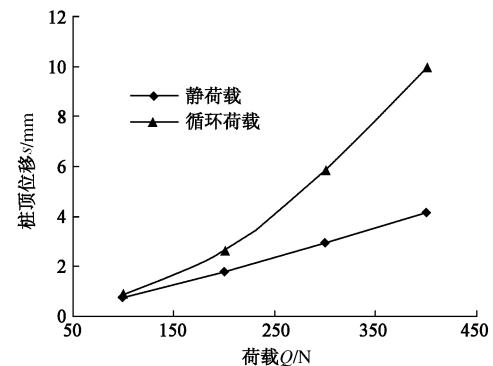


图 12 静荷载、循环荷载 Q - s 曲线 (饱和黄土)

Fig. 12 Q - s curves of static and cyclic loadings (saturated loess)

通过试验发现, 循环加载过程中, 虽然桩顶位移都随循环次数而增加, 但黄土中的桩顶位移会逐渐趋于稳定, 而当循环荷载比较大时, 饱和黄土中的桩顶位移则随循环次数无限增加, 只是增加速率有所减缓。9000 次循环后, 相同循环荷载比条件下, 饱和后黄土中的桩顶位移明显大于饱和前的桩顶位移; 与静载试验相比, 饱和前的循环荷载位移小于静载位移, 而饱和后的循环荷载位移却明显大于静载位移。可见黄土浸水饱和后, 不仅单桩承载力会发生变化, 单桩在循环荷载作用下的沉降特性也会发生明显改变。

现行的《动力机器基础设计规范》中, 通过控制基础的振动位移与速度来考虑机器振动荷载的影响, 而在基础的承载力设计时, 仍沿用对承载力进行折减的方法, 并未考虑循环荷载作用下桩基沉降特性的变化, 更没考虑桩周土体结构发生改变带来的影响。对于饱和黄土中的桩基, 循环荷载作用下桩的位移明显

高于同等静力荷载条件下的位移, 桩基的承载能力明显降低。在规范中, 旋转式机器基础的动力折减系数取 0.8, 显然高估了桩基承受循环荷载的能力, 建议根据桩周不同的土性进行取值, 或通过循环荷载作用下桩的位移量来确定桩的承载力。

3.3 试验结果分析

目前, 在循环荷载作用下桩基的沉降特性研究中, 对桩基破坏模式的认识尚未统一, 桩基的位移发展规律尚不明确, 分析循环荷载作用下桩基的沉降特性对于工程应用具有重要的指导意义。Poulos^[11]指出竖向循环荷载作用下单桩的破坏模式为桩顶沉降过大, 并在试验中以模型桩累积沉降达到 2.5%D 作为其破坏标准。

Hettler^[12]进行了干砂的循环三轴试验和砂性土中的模型试验, 发现第 N 次及第 1 次循环作用后的桩身水平位移 y_N , y_1 及循环次数 N 之间存在如下关系, $y_N = y_1(1 + C_N \ln N)$, 并建议砂性土 $C_N = 0.2$, 然而 Little 等^[13]认为桩身变形与循环次数 N 成幂函数关系 $y_N = y_1 N^{0.136}$ 。对于单桩的竖向循环荷载位移, 白顺果等^[14-15]将不同循环荷载比下的桩顶 $s - \ln N$ 曲线划分为衰减型和破坏型两类, 衰减型曲线可用 Hettler 等提出的对数关系表达, 破坏型曲线可用幂函数进行描述。

对图 9 所示单桩循环荷载试验 $s - N$ 曲线的横坐标取对数, 绘制对数坐标的 $s - N$ 曲线, 如图 13 所示, 将循环荷载作用下的 $s - N$ 曲线分别用 $y_N = A \ln N + B$, $y_N = CN^D$ 进行描述, 对两种不同表达式的相关系数进行比较, 结果如表 3 所示, 发现幂函数拟合曲线的相关性明显优于对数曲线, 所有 $s - N$ 曲线都可采用幂函数进行描述, 式中的 C, D 为与循环荷载比、固结状态、桩周土性质等有关的系数。

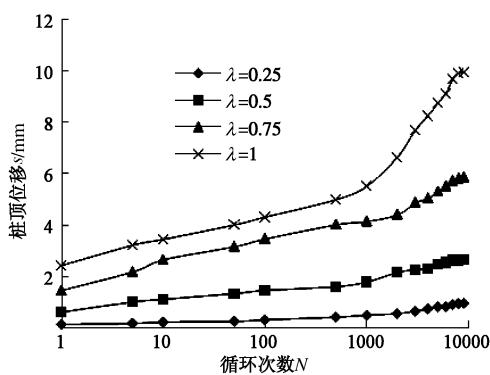


图 13 对数坐标形式的 $s - N$ 曲线 (饱和黄土)

Fig. 13 $s - N$ curves in logarithmic coordinates (saturated loess)

定义 α 为循环位移比, 即循环荷载位移与静载位移的比值, 图 14 为 α 随 λ 的变化曲线, 从图 14 可以

发现黄土中单桩的循环位移比变化范围不大且都小于 1, 基本保持在 0.6 与 0.8 之间; 饱和黄土中的循环位移比则始终大于 1, 即循环荷载位移大于静载位移, 且 α 与 λ 呈近似线性关系。对 $\alpha - \lambda$ 关系曲线进行拟合, 得到桩周填土饱和前: $\alpha = 0.092 \lambda + 0.683$, 相关系数 = 0.939; 桩周填土饱和后: $\alpha = 1.636 \lambda + 0.72$, 相关系数 = 0.989。

可根据此类关系式由静载条件下的位移推算循环荷载条件下的位移, 进一步指导竖向循环荷载作用下桩基的承载力设计。

表 3 拟合曲线表

Table 3 List of fitting curves

填土类型	循环荷载比 λ	对数函数 $y_N = A \ln N + B$		幂函数 $y_N = CN^D$				
		系数 A	系数 B	相关系数		系数 C	系数 D	相关系数 R^2
				系数 R^2	系数 R^2			
黄土	0.125	0.002	0.007	0.911	0.01	0.119	0.958	
	0.25	0.009	-0.002	0.878	0.011	0.225	0.980	
	0.5	0.045	-0.053	0.912	0.021	0.322	0.975	
	0.75	0.079	-0.022	0.892	0.092	0.231	0.986	
	1	0.086	0.874	0.960	0.890	0.070	0.970	
饱和黄土	0.25	0.092	-0.039	0.876	0.101	0.234	0.986	
	0.5	0.219	0.512	0.958	0.704	0.144	0.974	
	0.75	0.456	1.384	0.970	1.723	0.133	0.973	
	1	0.834	1.328	0.879	2.317	0.151	0.960	

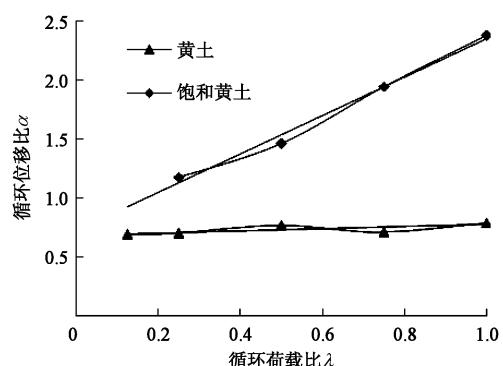


图 14 循环位移比变化曲线

Fig. 14 Curves of cyclic displacement ratio

循环荷载作用下桩顶的循环位移幅值 ρ_c 与多种因素有关, 循环荷载比、桩周土性质、单桩动刚度等都会对 ρ_c 产生影响, 且 ρ_c 会随循环次数 N 而不断变化, 图 15 为 9000 次循环后, 黄土及饱和黄土中单桩的 $\lambda - \rho_c$ 曲线, 从图中可以发现: 黄土及饱和黄土中的 ρ_c 都随 λ 而增大, 且黄土中单桩的 ρ_c 值明显大于饱和黄土中单桩的 ρ_c 值, 这不仅与桩周土的性质有关, 还与循环荷载大小有关, 因为在循环荷载比相同时, 黄土中单桩的循环荷载明显大于饱和黄土中单桩的循环荷载。

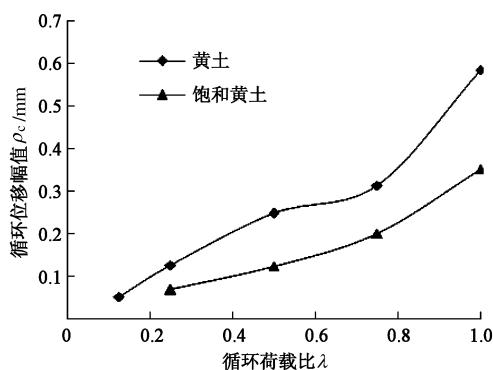


图 15 循环位移幅值变化曲线

Fig. 15 Curves of cyclic displacement amplitude

4 结论与建议

通过开展黄土中(饱和前后)单桩竖向静载及不同循环荷载比条件下的循环荷载模型试验, 获得如下结论:

(1) 对于黄土中的单桩, 黄土饱和后单桩极限承载力及割线刚度明显降低, 试验中分别降为原来的0.13, 0.07倍, 黄土饱和后单桩抵抗变形的能力急剧下降。

(2) 存在一临界循环荷载比 λ_{\min} , 当循环荷载比大于该值时, 桩顶累积沉降随循环次数N不断增大, 只是增大速率有所减缓, 试验中饱和前的 λ_{\min} 大于1, 饱和后的 λ_{\min} 在0.5左右。

(3) 当 λ 及N相同时, 饱和后桩的循环累积位移明显大于饱和前; 饱和前单桩的循环位移比 α 较小, 基本保持在0.6与0.8之间; 饱和后循环位移比 α 始终大于1, 且随循环荷载比线性增大。饱和黄土中的桩顶位移对循环荷载更为敏感。

(4) 对单桩循环荷载试验的 $s-N$ 曲线进行拟合时, 幂函数明显优于对数函数, 可以用函数 $y_N = CN^D$ 描述桩顶位移随循环次数的变化规律, 其中C, D为与循环荷载比、固结状态、桩周土性质等相关的系数。

(5) 对于黄土中承受循环荷载作用的桩基, 设计时应考虑土体结构浸水破坏导致的动/静承载力降低, 对已有的桩基础应减少土体浸泡, 以免桩基承载力急剧降低且变形过大。

参考文献:

- [1] 朱斌, 任宇, 陈仁朋, 等. 竖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))

- [2] 黄雨, 柏炯, 周国鸣, 等. 单桩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): 1441 - 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): 1441 - 1444. (in Chinese))
- [3] 杨龙才, 郭庆海, 周顺华, 等. 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(12): 2362 - 2368. (YANG Long-cai, GUO Qing-hai, ZHOU Shun-hua, et al. 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(12): 2362 - 2368. (in Chinese))
- [4] POULOS H G. Cyclic axial loading analysis of piles in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(6): 836 - 852.
- [5] 陈竹昌. 轴向循环荷载下确定粘土中桩承载力的方法[J]. 海洋工程, 1990, 8(3): 72 - 81. (CHEN Zhu-chang. The method of determine bearing capacity of pile under cyclic loading in clay[J]. The Ocean Engineering, 1990, 8(3): 72 - 81 (in Chinese))
- [6] 章敏. 非饱和土中桩的动力响应与循环荷载试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (ZHANG Min. Dynamic response of piles in unsaturated soil and its cyclic loading testing[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))
- [7] CHAN S F, HANNA T H. Repeated loading on single piles in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(2): 171 - 188.
- [8] GUDEHUS G, HETTLER A. Cyclic and monotomous model tests in sand[C]// Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, 1981: 421 - 494.
- [9] VAN WEELE A F. Pile bearing capacity under cyclic loading compared with that under static loading[C]// Proceedings of 2nd International Conference on Behavior of Offshore Structures. London, 1979: 575 - 588.
- [10] POULOS H G, CHUA E W. Bearing capacity of foundations on calcareous sand[C]// Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, 1985: 1619 - 1622.

- [11] Poulos H G. Cyclic axial loading analysis of piles in sand[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, **115**(6): 836 - 852.
- [12] HETTLER A. Verschiebung starrer und elastischer gründungskörper in sand bei monotoner und zyklischer belastung[D]. Deutsch-land: Ver"oentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 1981. (HETTLER A. The settlement of rigid and flexible piles in sand under unilateral cyclic loading[D]. Germany: The University of Fridericiana in Karlsruhe, 1981. (in German))
- [13] LITTLE R L, BRIAUD J L. Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand[R]. College Station: Miscellaneous Paper GL-88-27, Geotechnical Div Texas A&M Univ, 1988.
- [14] 白顺果, 侯永峰, 张鸿儒, 等. 循环荷载作用下水泥土桩复合地基的临界循环应力比和永久变形分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(1): 84 - 87. (BAI Shun-guo, HOU Yong-feng, ZHANG Hong-ru, et al. Analysis on critical cyclic stress ratio and permanent deformation of composite foundation improved by cement-soil piles under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(1): 84 - 87. (in Chinese))
- [15] 白顺果, 侯永峰, 张鸿儒. 循环荷载作用下水泥土桩复合地基变形性状分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(4): 677 - 681. (BAI Shun-guo, HOU Yong-feng, ZHANG Hong-ru. Deformation analysis of composite foundation improved by cement-soil piles under cycle loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(4): 677 - 681. (in Chinese))
- [16] 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))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学理论和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)