

DOI: 10.11779/CJGE201504007

# 基于沉降控制的竖向下压循环荷载作用下的桩基设计方法

陈仁朋<sup>1, 2</sup>, 任宇<sup>3</sup>, 陈云敏<sup>1, 2</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学建筑工程学院 浙江 杭州 310058;  
3. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院, 上海 200063)

**摘要:** 低幅值、大周次竖向循环荷载作用下桩基发生累积沉降及承载力弱化, 影响到风机塔架、高速铁路路基等沉降敏感结构物的服役性能。首先总结了竖向循环荷载作用下桩基设计要求及若干设计关键问题。基于模型试验结果, 分析了竖向循环荷载作用下的桩基承载力和累积沉降演化规律; 定义了3种桩顶累积沉降发展模式及对应的循环荷载比和静荷载比组合, 建立了桩基循环累积沉降分析图, 提出了组合循环荷载作用下的桩基循环加载性状简化判定公式。提出了针对竖向循环荷载作用下桩基的设计方法及设计流程, 并给出了设计实例。

**关键词:** 桩基础; 竖向循环荷载; 累积沉降; 桩的承载力; 设计方法

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)04-0622-07

作者简介: 陈仁朋(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事土与结构相互作用及交通岩土工程的教学科研工作。E-mail: chenrp@zju.edu.cn。

## Design method for piles subjected to cyclic axial loading for control of permanent accumulated settlement

CHEN Ren-peng<sup>1, 2</sup>, REN Yu<sup>3</sup>, CHEN Yun-min<sup>1, 2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. East China Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China)

**Abstract:** The pile capacity degrades and the permanent settlement of pile accumulates when the pile is subjected to low-amplitude and long-term axial cyclic loading. The degradation of the pile capacity and the permanent accumulated settlement of the pile will greatly influence the service ability of settlement-sensitive superstructures, such as high-speed railway tracks, wind turbines and so on. The general design requirements of piles under cyclic axial loading and the key issues that are of great interest to the designers are introduced. The behaviors of piles under axial cyclic loading are presented and the main factors influencing them are discussed. The definitions of load ratios are given. The criteria for assessing pile response based on the limit cyclic loading ratio are proposed. The idea of a cyclic interaction diagram is developed. The design method and procedure for piles under cyclic axial loading are proposed. Finally, a case is given to verify the proposed design approach.

**Key words:** pile foundation; cyclic axial loading; accumulated settlement; pile capacity; design method

## 0 引言

风力发电机、高速铁路、高速公路等工程在运行期内要承受风、浪或交通等荷载, 因而其下桩基础除了承受上部结构自重外, 还要承受低幅值、大周次竖向循环荷载的作用<sup>[1]</sup>。

桩基竖向循环加载试验结果显示, 竖向循环荷载作用将对桩-土界面及桩周土体的强度及刚度产生显著影响, 桩基易于发生承载力及刚度的弱化, 并会不断产生累积沉降<sup>[2-4]</sup>。Bea等根据黏土中的现场试桩结

果指出, 竖向循环加载后的桩基承载力约为静载时的80%左右<sup>[5]</sup>。O'Riorda等在软黏土地基中单桩现场试验发现, 当竖向循环荷载仅为静承载力的50%时, 单桩即会产生大量累积沉降<sup>[6]</sup>。国内陈仁朋等对饱和粉土地基中单桩竖向循环加载特性进行了系列试验研究,

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51225804); 国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U1234204); 中国铁路总公司重大科技项目(2014G09); 浙江省交通厅科研计划项目(2014H07)

收稿日期: 2014-08-04

结果显示当循环加载幅值达到静承载力的 50%时, 单桩出现刺入式破坏, 累积沉降量在短时间内即可快速达到  $0.1d$  ( $d$  是桩径, 下同) [7]。

新能源及高速交通工程上部结构对于基础工后沉降及不均匀沉降要求均很高<sup>[8]</sup>。高速交通、风力发电塔架等这些对基础沉降敏感的结构物, 竖向循环累积沉降的预测及控制已成为基础设计中的关键。美国 API 规范明确指出, 对海洋石油平台下桩基础进行设计时, 须合理考虑循环荷载对桩基性状的影响, 但没有给出具体的设计方法<sup>[9]</sup>。国内动力机器基础规范等为了分析承台等基础的动力学特性给出了各种类型桩头刚度计算方法<sup>[10]</sup>。这些方法无法考虑桩的累积沉降, 并且桩刚度计算方法也未能考虑循环荷载和静荷载水平的影响。因此, 现有相关工程设计大多沿用静力下的桩基设计方法, 以极限承载力作为设计控制指标, 通过大幅提高承载力安全储备的方法进行设计。这种基于承载力进行设计的方法, 无法对累积沉降进行预测, 无法满足以累积沉降作为控制标准的工程设计要求。基于此原因, 提出一套适用于竖向循环荷载作用下的桩基设计方法有重要意义。

本文首先总结了竖向循环荷载作用下桩基设计要求及若干设计关键问题。基于模型试验结果, 分析了竖向循环荷载作用下的桩基承载力和累积沉降演化规律, 研究了桩顶累积沉降与循环荷载比和静荷载比的关系, 提出了竖向循环荷载作用下桩基的设计方法, 并给出了设计实例。

## 1 竖向循环荷载作用下桩基设计要求

现场及室内模型试验研究结果显示<sup>[2-4]</sup>, 竖向循环荷载对于桩基性状的影响主要体现在两方面: 极限承载力弱化和循环累积沉降。因此, 竖向循环荷载作用下的桩基设计不仅要保证循环加载过程中桩基的稳定性, 也要对运营期内桩顶产生的累积沉降进行控制。即桩基设计应满足两方面要求:

- (1) 稳定性要求;
- (2) 累积沉降要求。

由于所承受循环荷载性质、上部结构服役性能要求及工程造价标准等方面的差异, 不同类型工程对于服役期内的桩基性能要求也是有所侧重的。甚至在同一工程中, 不同循环荷载幅值作用下的桩基性能要求也可能不同。例如海上平台结构一般以极限风暴潮下桩基稳定性作为控制指标; 而高速铁路及海上风电结构通常以累积沉降作为控制指标。一般而言, 循环荷载作用下的桩基稳定性均应满足要求, 即桩基不应发生循环破坏, 而累积沉降则需结合具体工程要求而定。

因此, 循环荷载作用下桩基设计需要解决的关键问题包括:

- (1) 长期循环荷载作用下桩基极限承载力;
- (2) 长期循环荷载作用下桩顶累积沉降;
- (3) 桩顶累积沉降或承载力达到控制指标时所需的循环次数。

循环荷载作用下, 桩-土界面强度和刚度弱化, 或桩顶累积沉降都将降低桩的极限承载力。当竖向循环荷载峰值超过弱化后桩的极限承载力时, 桩基沉降急剧增大, 发生失稳破坏。因此, 保证竖向循环荷载作用下桩基的稳定性, 就应保证桩顶竖向循环荷载峰值不超过弱化后的桩基极限承载力。

## 2 竖向循环荷载下桩基累积沉降

### 2.1 静偏荷载比和循环荷载比的定义

竖向循环荷载可分为单向循环及压-拉双向循环荷载两种。高铁路堤桩承受的是单向下压循环荷载; 海上平台或风力发电桩基承受的是单向下压或双向压-拉循环荷载。由于压-拉双向循环荷载作用下的桩基更易于发生循环破坏<sup>[4]</sup>, 因而大多数工程均通过加大承台配重或加大群桩间距等方法将桩基所承受的竖向荷载调整为单向下压循环荷载。

图 1 为典型竖向下压循环荷载示意图。下压循环荷载由两部分组成, 静偏荷载  $P_s$  和循环荷载幅值  $P_c$ 。定义循环荷载比 CLR (cyclic load ratio) 和静偏荷载比 SLR (static load ratio) 来表征循环荷载的大小, 分别表示为

$$CLR = P_c / P_u, \quad (1)$$

$$SLR = P_s / P_u, \quad (2)$$

式中,  $P_u$  为单桩竖向极限静承载力。可以看出, CLR 与 SLR 之间满足下列关系:

$$0 \leq SLR + CLR \leq 1. \quad (3)$$

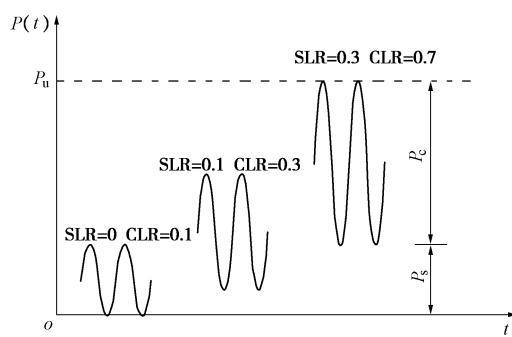


图 1 循环荷载比示意图

Fig. 1 Definitions of CLR and SLR

### 2.2 桩基的循环加载特性

国外 Jardine<sup>[11]</sup>、Poulos<sup>[12]</sup>, 国内陈仁朋等<sup>[7]</sup>通过

单桩试验研究发现, 坚向下压循环荷载作用下的桩基累积沉降发展规律可分为 3 种类型<sup>[7, 11-12]</sup>:

- (1) 快速稳定型;
- (2) 渐进发展型;
- (3) 急剧破坏型。

图 2 中给出了桩顶累积沉降随循环次数发展的典型试验规律<sup>[13]</sup>, 试验中  $SLR = 0.3$ ,  $CLR$  取值分别为  $0.1 \sim 0.6$ , 限于篇幅详细内容可以参考文献[13]。可以看出, 静偏荷载比  $SLR$  一定时, 随着循环荷载比  $CLR$  的增加, 累积沉降发展呈现出上述 3 种不同类型。

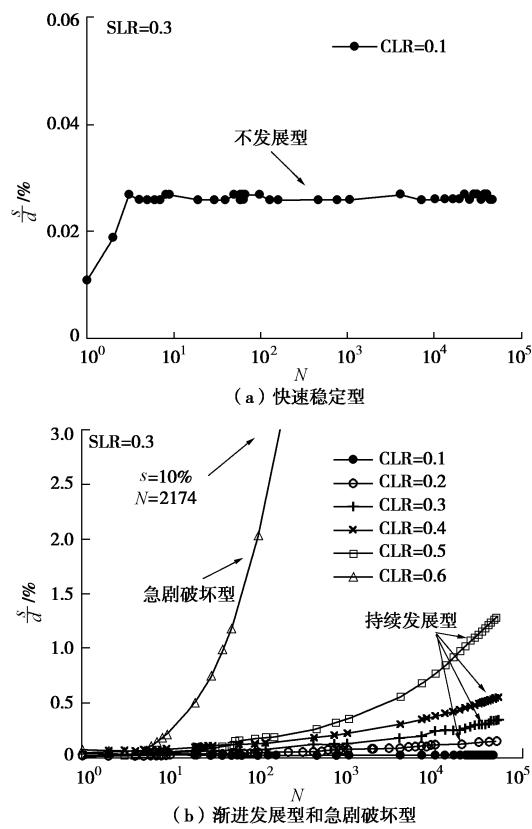


图 2 下压循环荷载作用下桩顶累积沉降发展规律

Fig. 2 Permanent accumulated settlements under axial cyclic loading

对于快速稳定型(图 2 中  $CLR = 0.1$ ), 此时下压循环荷载作用次数对桩土体系没有影响或影响很小, 桩基响应为完全弹性, 桩顶无累积沉降或累积沉降很小, 即使有少量累积沉降也都在几个循环次数内完成。对于渐进发展型(图 2 中  $CLR = 0.2 \sim 0.5$ ), 下压循环荷载作用对于桩土体系有一定影响, 部分桩周土进入塑性状态, 桩顶累积沉降随循环次数不断增加, 增速则随循环次数的增加而减小; 相同循环次数作用下,  $CLR$  越大则累积沉降越大。对于急剧破坏型(图 2 中  $CLR = 0.6$ ), 坚向循环加载对桩土体系造成严重破坏, 此时下压循环荷载下桩基极限承载力小于桩顶作用的循环荷载, 桩周土进入塑性状态, 累积沉降随循环次数急剧增长, 发生刺入式破坏。

因此, 当  $SLR$  一定时, 下压循环荷载下桩基累积沉降可根据  $CLR$  的大小划分为 3 类, 相应的临界循环荷载比定义为

- (1) 最小循环荷载比  $MCLR$  (minimum cyclic load ratio);
- (2) 破坏循环荷载比  $FCLR$  (failure cyclic load ratio)。

当  $CLR \leq MCLR$  时, 桩基累积沉降发展性状为 I 型: 快速稳定型。当  $MCLR < CLR < FCLR$  时, 桩基累积沉降发展性状为 II 型: 渐进发展型。当  $FCLR \leq CLR$  时, 桩基累积沉降发展性状为 III 型: 急剧破坏型。可以看出,  $FCLR$  与  $MCLR$  定义所对应的桩基累积沉降发展性状是不同的。 $FCLR$  的定义是从累积沉降稳定性的角度出发, 而  $MCLR$  则是对下压循环荷载作用下桩基累积变形发展规律的进一步细分。

工程中将静载下桩基变形性状划分为工作状态及破坏状态两种。对于下压循环荷载作用下的桩基而言, 桩顶累积变形是 I、II 型中的桩基所受到的循环荷载作用影响有限, 均可视为桩基的正常工作状态。

### 2.3 桩基累积沉降性状判定标准

对于桩基累积沉降性状的判定, 国内外目前暂未有成熟标准。根据以往的试验及理论研究, 笔者认为对于桩基累积沉降的判定应从下压循环荷载下桩基极限承载力和累积沉降两个方面出发, 这两方面密切相关。

桩基极限承载力弱化较轻时, 桩基累积沉降也较小; 桩基极限承载力弱化严重时, 桩基累积沉降也较大。由于变形更加方便测量, 因此根据累积沉降发展形态及量值进行判定更方便工程应用。表 1 给出了根据试验及理论研究成果所提出的桩基循环加载性状判定标准<sup>[13]</sup>。

表 1 桩基累积沉降性状判定标准

Table 1 Criteria for distinguishing three styles of responses under cyclic loading

桩基累 积沉 降性 状	划分标准	
	承载力	累积沉降 $s$
快速稳 定型	无弱化或略有弱化, 弱化程度小于 2%	无沉降或略有累积沉 降, 10 周左右达到稳定, 累积沉降小于 $0.1\%od$
渐进发 展型	弱化程度较弱, 约 $5\% \sim 15\%$	累积沉降随循环次数发 展呈收敛状, 累积沉降 处于 $0.1\%od \sim 1.0\%od$ 之 间
急剧破 坏型	弱化程度较大, 一定 循环次数后无法承受 相应的桩顶下压循环 荷载	累积沉降快速发展, $s \cdot \lg N$ 对数坐标下呈刺 入式发展形态, 一定循 环次数后累积沉降达到 $10\%od$

## 2.4 桩基累积沉降分析图

对不同下压循环荷载幅值及静偏载组合作用的桩基进行分析时, 为了更加清晰地对桩基性状进行判断, 可以借助于桩基累积沉降分析图, 如图3所示。图3中横、纵坐标分别为静偏荷载比SLR及循环荷载比CLR。

桩基累积沉降分析图分为3个区域: ① I区, 稳定区; ② II区, 发展区; ③ III区, 破坏区。3个区域分别对应了3种不同桩基累积沉降发展性状。图中I区和II区间的分界线即为不同SLR下MCLR的连线, 而II区和III区间的分界线则为FCLR的连线。

对于下压循环荷载来说, 桩基累积沉降分析图的上边界为一条直线, 代表了没有循环弱化发生时所能够导致桩基发生稳定破坏的循环荷载组合, 即为桩基的静载破坏线, 线上的荷载组合达到极限承载力 $P_u$ , 表示为

$$\frac{P_c}{P_u} + \frac{P_s}{P_u} = 1 \quad (4)$$

即

$$SLR + CLR = 1 \quad (5)$$

桩基累积沉降分析图代表了一定循环次数 $N$ 下的桩基累积沉降发展性状。随着 $N$ 的增大, 发展区及破坏区的范围也会相应改变, 破坏区范围会逐渐增大; 而对于稳定区而言, 基本不受循环次数增加的影响。

陈仁朋等针对饱和粉土地基中刚性单桩的循环加载性状开展了系列试验研究<sup>[7]</sup>。试验地基土为钱塘江粉土, 地基及模型桩参数详见文献[7]及文献[13]; 加载频率为3 Hz。试验共包括25组不同SLR和CLR组合。实测的桩基累积沉降绘于图3中。任宇等建立了单桩循环加载一维分析模型, 并对该试验进行了数值模拟, 获得了MCLR及FCLR随SLR的变化规律<sup>[13]</sup>(图3中虚线所示)。可以看出, 理论分析所获得的分界线与实测结果比较吻合。

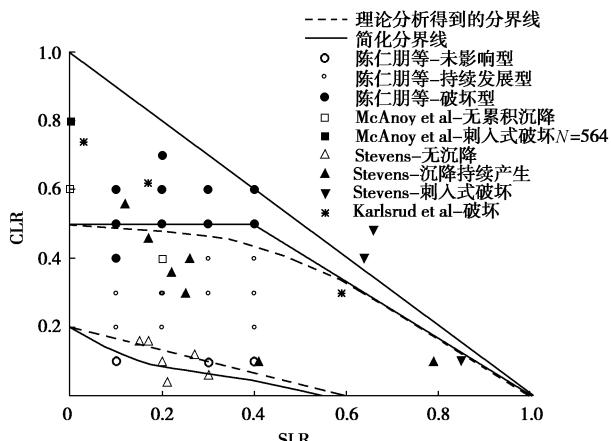


图3 桩基累积沉降分析图

Fig. 3 Diagram of cyclic stability and settlement

为了方便桩基设计时使用, 根据上述试验及理论分析结果, 对区域的分界线进行了简化(图3中实线所示)。其中III区的下边界线由两段直线组成, 表示为

$$\begin{cases} CLR = 0.5 & 0 \leq SLR \leq 0.4 \\ 1.2CLR + SLR = 1 & 0.4 < SLR \leq 1.0 \end{cases}, \quad (6)$$

而I区的上边界线为

$$1.5CLR + 5SLR = 3 \quad (7)$$

从图3中可以看出, 采用简化后的直线边界线与试验结果及理论分析结果均较为吻合。然而, 直线边界线表达式更为简单, 适合于设计使用。

另外图3中也给出了一些现场或模型桩基循环加载试验结果。尽管文献中试验地基土类型众多, 桩基尺寸的变化范围也比较大, 从图中仍可以看出式(6)所给出的破坏区下边界线与这些试验结果还是相当接近的, 试验中桩基发生破坏时的荷载比组合大部分均落在了理论分界线的附近, 说明所提出的简化分界线能够较为合理地对桩基发生稳定破坏的循环荷载幅值及静偏荷载组合进行判定。

## 3 设计方法及流程

### 3.1 设计方法

由于桩基的循环加载性状主要取决于桩顶的荷载比组合, 因此设计中的关键在于选择合适的荷载比组合, 使得桩基性状满足相应的设计要求。

当工程仅有稳定性方面的要求时, 设计时应避免将荷载比组合落在破坏区。当结构对桩基累积沉降敏感并且容许沉降非常小时, 可以采用较为保守的设计思路, 即将荷载比组合控制在稳定区以内, 以避免累积沉降的产生。当结构容许发生一定的累积沉降时, 可以将荷载比组合落在发展区, 此时需要采用相关计算方法对累积沉降进行计算分析, 并结合工程具体的沉降设计标准进行验算, 以选择出能够满足沉降标准的荷载比组合。

由式(1)、(2)可知, 荷载比主要由两个因素决定: ①竖向下压循环荷载幅值; ②桩基极限承载力。竖向下压循环荷载幅值一般情况下无法改变, 因此可以通过调整桩基设计参数, 改变桩基极限承载力来实现对累积沉降的控制。设计时可按照下列步骤进行: ①确定工程中的循环荷载特性及桩基设计要求; ②根据设计要求选择合适的循环荷载比设计值; ③确定出桩基极限承载力; ④根据极限承载力选择合适的桩长、桩径及持力层; ⑤对循环荷载作用下桩基极限承载力及沉降进行验算; ⑥通过试桩对设计成果进行检验。

### 3.2 基本设计流程

图4中给出了设计的基本流程。整个设计包括初

步设计及详细设计两个阶段。初步设计中的关键是根据设计要求初选出合适的荷载比组合。在没有类似工程可供参考时, 根据图 3 或式(6)、(7)中简化判定公式, 按照设计要求做出初步选择。

当工程仅有稳定性要求时, 荷载比组合应选在 III 区之外, 即 SLR 和 CLR 满足下列关系

$$\begin{cases} \text{CLR} < 0.5 & 0 \leq \text{SLR} \leq 0.4 \\ 1.2\text{CLR} + \text{SLR} < 1 & 0.4 < \text{SLR} \leq 1.0 \end{cases} \quad (8)$$

当有工程在运行期内不允许有累积沉降产生时, 荷载比组合应选择落在 I 区之内, 即

$$15\text{CLR} + 5\text{SLR} < 3 \quad (9)$$

当工程允许一定累积沉降产生, 但存在控制标准时, 荷载比组合可以选择处于 II 区, 即

$$\begin{cases} \text{CLR} < 0.5 & 0 \leq \text{SLR} \leq 0.4 \\ 1.2\text{CLR} + \text{SLR} < 1 & 0.4 < \text{SLR} \leq 1.0 \end{cases} \quad (10)$$

且

$$15\text{CLR} + 5\text{SLR} \geq 3 \quad (11)$$

如果需要对循环下桩基的累积沉降进行预测, 可采用近似沉降计算公式或能够考虑桩周土循环弱化特性的数值分析方法进行计算, 例如任宇基于荷载传递法建立的竖向循环荷载作用下单桩的一维数值分析方法等<sup>[13]</sup>。简而言之, 只要将桩顶作用的荷载比组合控制在相应范围之内即可完成对桩基服役性能的控制。

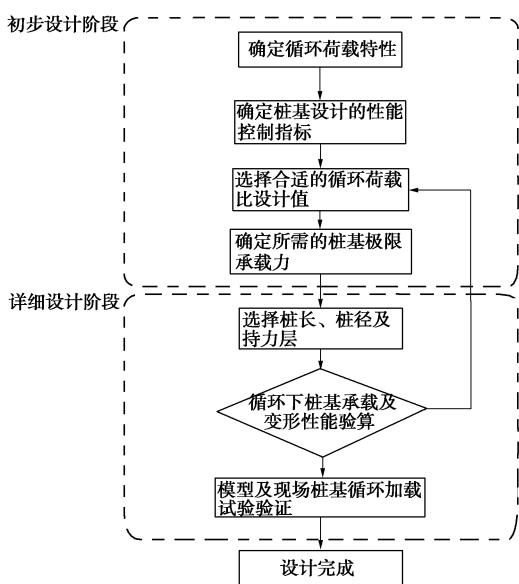


图 4 设计流程

Fig. 4 Design procedure for piles under cyclic axial loading

根据选择的荷载比组合即可初步确定出所需的桩基极限承载力。桩基承载力一般应通过静载荷试验获得。初步设计时, 单桩竖向极限承载力标准值可按下列式计算<sup>[14]</sup>

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{qk} = q_{pk} A_p + u_p \sum q_{sik} l_i \quad (12)$$

式中  $Q_{uk}$  为单桩竖向极限承载力标准值;  $q_{pk}$  和  $q_{sk}$  分别是桩端阻力和桩侧阻力标准值;  $A_p$  为桩端面积;  $u_p$  为桩身截面周长;  $l_i$  为第  $i$  层土的厚度。通过改变桩长、桩径及持力层以确保桩基承载力满足设计要求。初步设计完成之后, 需要对桩基的循环加载性状进行验算。

竖向循环荷载作用下的桩基稳定性条件

$$F \leq Q_u^N, \quad (13)$$

式中,  $F$  为循环荷载峰值,  $Q_u^N$  为  $N$  次循环后的桩基极限承载力。

桩基的累积沉降控制条件

$$s^N \leq [s], \quad (14)$$

式中,  $s^N$  为  $N$  次循环后的桩顶累积沉降值,  $[s]$  为累积沉降允许值。

桩基的稳定性及累积沉降均通过验算则整个设计完成, 若上述两个条件中任意一个没有得到满足, 则需要重新选择荷载比组合, 重复上述步骤, 直至验算完全通过为止。

下压循环荷载作用下桩基累积沉降性状复杂、影响因素多, 工程设计经验缺乏。为了保证设计效果, 积累工程经验, 在条件允许的情况下可以通过开展试桩的循环加载试验以对设计进行验证。

## 4 设计实例

本节以江苏东台风电场风机桩基工程<sup>[15]</sup>为例, 详细介绍了考虑竖向循环荷载作用的桩基础设计, 并根据实际监测数据对桩基设计进行了检验。

### 4.1 设计过程

风机承受的荷载主要是风荷载, 由于风压的作用, 风机塔架会对风机基础施加很大的倾覆弯矩作用。以东台风电场使用的 FL1500 风电机组为例, 其叶轮旋转直径 70.5 m, 塔筒底部对基础承台的倾覆弯矩接近 45000 kN·m, 如图 5 所示。群桩基础通过几何布置, 可以将上部结构产生的巨大倾覆弯矩分解为单桩顶部的竖向荷载。相较于单桩式基础, 群桩式基础有更强的抗倾覆弯矩能力, 单桩受力更为清晰、合理。项目中风机基础承台为圆盘形, 直径 18 m, 其下群桩分内外两圈布置, 外圈 30 根, 内圈 6 根, 如图 6 所示。

风机塔架巨大倾覆弯矩作用下, 群桩基础背风面一侧的桩基产生下压力, 而迎风面一侧的桩基产生上拔力。由于拉压双向循环荷载作用下的桩基更易于发生循环破坏, 因此风机群桩基础在设计时会通过增加承台自重等方法避免桩基上拔力的出现。根据厂家提供的风机塔筒底部设计弯矩循环载荷谱, 通过有限元建模分析确定出风机基础承台下群桩桩顶作用的循环

荷载幅值大小, 4种典型工况下的计算结果列于下表2中, 其中塔架及承台自重引起的单桩平均竖向作用力约为489 kN。

长期循环荷载作用下, 风机基础将会发生累积不均匀沉降, 导致风电机组塔架倾斜从而影响风电机组的安全服役性能甚至导致其失效破坏。中国2007年颁布的《风力发电机组塔架地基基础设计技术规定》(FD003—2007)规定塔架的倾斜范围按不同轮毂高度应控制在0.17°~0.34°<sup>[16]</sup>。

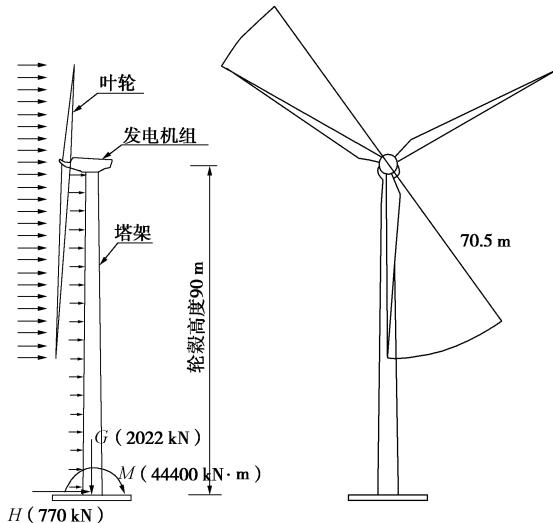


图5 FL1500型风机受荷示意图

Fig. 5 Extreme loads applied at bottom of FL1500 turbine structure

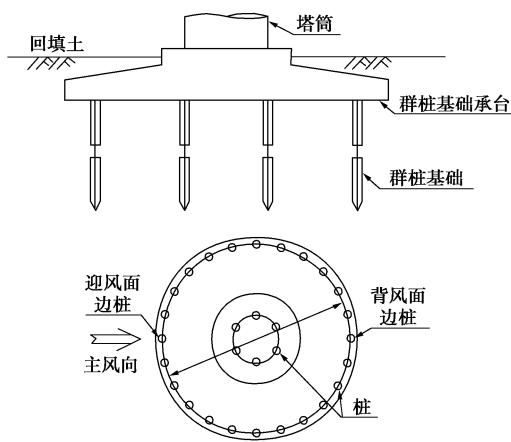


图6 东台风电场海堤外群桩布置

Fig. 6 Typical layout of pile groups for wind turbine

主导风向背风面一侧边桩所受的循环荷载值最大, 假设其长期累积沉降量为 $s_b$ , 而迎风面一侧边桩的长期累积沉降为0, 则风电机组塔架的长期累积倾斜度可近似由下式计算<sup>[17]</sup>

$$\theta = \arctan(s_b / D) \quad (15)$$

风机基础允许最大倾斜为0.17°, 群桩基础外径 $D=18\text{ m}$ , 对应的单桩允许最大累积沉降约为5 mm,

单桩桩径 $d$ 取为500 mm时, 约为1.0% $d$ 。

表2 风电机组群桩基础中桩的最大/最小荷载

Table 2 Maximum and minimum loads applied on a single pile of pile group foundation

循环次数	背风面边桩桩顶荷载/kN	迎风面边桩桩顶荷载/kN
1	939.2	37.8
60	793.8	182.9
$10^3$	742.7	240.1
$10^6$	620.3	342.2

选用循环次数 $N=1$ 对应的载荷工况进行设计计算, 该工况代表了极端外部条件。该工况下, 承台背风面一侧边桩桩顶作用循环荷载最大, 循环荷载 $P_c$ 最大值为450 kN, 静偏荷载 $P_s$ 为489 kN,  $P_c/P_s=0.92$ 。按照无累积沉降的标准进行设计, 即将桩基的累积沉降控制为稳定型, 循环荷载比组合控制在累积沉降分析图中的I区之内。

借助图3及式(9), 选择合适的CLR和SLR。将 $P_c=0.92P_s$ 代入(9)中, 得到

$$\left. \begin{array}{l} \text{CLR} < 0.15 \\ \text{SLR} < 0.16 \end{array} \right\} \quad (16)$$

取 $\text{CLR}=0.15$ , 由此可得桩基所需的极限承载力 $P_u=3000\text{ kN}$ 。根据式(12)及地勘报告, 桩长取 $L=25\text{ m}$ 时即可满足上述条件。

#### 4.2 实测验证

实际设计时桩长 $L$ 取为30 m, 以粉土层作为持力层。通过现场静力载荷试验测得的基桩极限承载力标准值 $P_{uk}=3300\text{ kN}$ , 因此设计工况对应的实际循环荷载比值为 $\text{CLR}=0.136$ ,  $\text{SLR}=0.148$ 。在图3中该荷载比组合也控制在I区之内。本文略去桩的配筋及桩身强度验算。

项目一期于2007年建成投产, 运行期内对基础沉降进行长期监测。投产5年多来, 实测的基础累积沉降最大值仅为2 mm, 不均匀沉降小于1 mm, 约为0.4% $d$ , 且主要产生于投产的前半年内, 其后发生的沉降基本为零。上述监测结果表明, 桩基的工作性能达到设计要求, 符合设计预期。

## 5 结 论

本文论述了基于累积沉降控制的竖向下压循环荷载作用下桩基设计方法, 通过研究可以获得以下几点结论:

(1) 不同循环荷载比及静偏荷载比组合下, 桩基累积沉降性状可分为3种类型: 快速稳定型, 渐进发展型, 急剧破坏型。根据循环荷载比和静偏荷载比组合及桩基累积沉降的发展类型, 获得了桩基循环累积沉降分析图, 并给出了3种累积沉降发展规律的分界

线表达式, 形成了基于累积沉降控制的下压循环荷载桩基设计方法。

(2) 采用该设计方法对东台风电场海堤内风机承台下桩基累积沉降进行了复核验算, 并与监测结果进行了对比验证, 说明该方法及推荐参数适用于实际桩基设计。

由于本文提出的桩基累积沉降分析图是基于模型试验以及国际上他人试验的结果, 其可靠性还需要通过工程实例进一步验证。

### 参考文献:

- [1] 朱斌, 任宇, 陈仁朋, 等. 坚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] CHAN S F, HANNA T H. Repeated loading on single piles in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(2): 171 - 188.
- [3] AI-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.
- [4] BRIAUD J L, FELIO G Y. Cyclic axial loads on piles: analysis of existing data[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, 23(3): 362 - 371.
- [5] BEAR G, AUDIBERT J M E, DOVER A R. Dynamic response of laterally and axially loaded piles[C]// Proceedings of 12th OTC Conference. Houston, 1980: 129 - 139.
- [6] O'RIORDAN N, ALLWRIGHT R, ROSS A, et al. Long term settlement of piles under repetitive loading from trains[C]// Symposium on Structures for High-speed Railway Transportation. IABSE, Antwerp, 2003: 67 - 74.
- [7] 陈仁朋, 任宇, 陈云敏. 刚性单桩坚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 single stiff pile with long-term axial dynamic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1926 - 1933. (in Chinese))
- [8] 高速铁路设计规范[S]. 北京: 铁道出版社, 2010. (Code for design of high speed railway[S]. Beijing: China Railway Press. 2010. (in Chinese))
- [9] Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms 19th Ed[S]. Washington D C: American Petroleum Institute, 1991.
- [10] GB50040—96 动力机器基础设计规范[S]. 1996. (GB50040—96 Code for design of dynamic machine foundation[S]. 1996. (in Chinese))
- [11] JARDINE R J, STANDING J R. Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4): 723 - 736.
- [12] POULOS H G. Cyclic axial loading analysis of piles in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(6): 836 - 852.
- [13] 任宇. 长期坚向循环荷载作用下桩的累积沉降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 the long-term deformation of single pile to cyclic axial loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [14] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundation[S]. 2008. (in Chinese))
- [15] 浙江大学建筑工程学院. 江苏东台风电场工程沿海滩涂对风电机组基础的影响及解决方案研究[R]. 杭州, 2007. (College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University. Consultant on foundation of beach wind turbine farm at Dongtai, Jiangsu Province[R]. Hangzhou, 2007. (in Chinese))
- [16] FD003—2007 风力发电机组塔架地基基础设计技术规定[S]. 2007. (FD003—2007 Design regulations on subgrade and foundation for WTGS of wind power station[S]. 2007. (in Chinese))
- [17] 任宇, 朱斌, 陈仁朋, 等. 大型风电机组群桩基础受荷特性及长期累积沉降控制[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 75 - 80. (REN Yu, ZHU Bin, CHEN Ren-peng, et al. Performance of pile group foundation of large wind turbine and control of its long-term accumulated settlement[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 75 - 80. (in Chinese))