

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0407

砂土场地光热发电新型高强预应力混凝土短桩基础受力特性研究

李红星¹, 冯世进^{2,3}, 何邵华¹, 张晓磊^{2,3}, 孙达明²

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 高强预应力混凝土 (PHC) 短桩基础是一种新型太阳能电站发电元件的支撑结构, 通过将 PHC 管桩伸入 2~3 m 深的钻孔后灌注混凝土形成。为掌握 PHC 短桩基础的工作性状, 开展了砂土场地基础的侧向荷载、侧向-扭转耦合荷载、循环荷载现场试验。根据柱顶倾角、泥面位移、扭转角和基础内的测试结果分析和对比了 PHC 短桩基础的受力变形规律以及扭转荷载的影响。进一步基于三维数值模拟, 分析了桩帽对基础内力和变形的影响规律。结果表明: PHC 短桩基础的变形总体上呈现分阶段特性; 扭转荷载使土体加快进入塑性状态, 降低了阶段立柱的抗裂性能; 桩帽可以有效地减小泥面位移, 但对立柱的变形影响不明显; 正常使用极限荷载下, 循环荷载后的残余变形约为单次荷载下变形的 2 倍; 最后基于现场试验、数值模拟, 提出了桩端小变形下 m 值 (土体的水平抗力系数) 和 A_g 值 (土体剪切模量比例系数) 的获取方法以及残余变形的经验获取方法。

关 键 词: PHC 短桩基础; 太阳能电站; 现场试验; 数值模拟; 设计方法

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 12-3217-11

Study on mechanical characteristics of a new PHC short pile foundation for solar power generation in sandy soil

LI Hong-xing¹, FENG Shi-jin^{2,3}, HE Shao-hua¹, ZHANG Xiao-lei^{2,3}, SUN Da-ming²

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The PHC short pile foundation is a new type of supporting structure for the power generation element of a solar power generation station. It is formed by inserting a PHC pipe pile into a hole of 2-3 m deep, followed by pouring concrete into the hole. To explore the working behavior of the PHC short pile foundation, field tests were carried out on the sand foundation under the lateral loading, coupled lateral and torsion loading and cyclic loading, respectively. According to the results of inclination of the column top, the displacement at the ground surface and the bending moment along the foundation, the force and deformation characteristics of the PHC short pile foundation and the influence of torsion were analyzed. The influence of pile cap on the inner force and deformation of foundation were then analyzed based on three-dimensional numerical simulation. The results show that the deformation of PHC short pile foundation can be divided into three phases. Torsional loads accelerate the occurrence of the soil plasticity and reduce the crack resistance of pile. The pile cap can efficiently reduce the mudline displacement with little influence on the pile deformation. Under normal ultimate load, the residual deformation after cyclic load is about 2 times of that under single load. Finally, based on the field tests and numerical simulation, the methods for obtaining the proportionality coefficient of horizontal soil resistance coefficient m and proportionality coefficient of soil shear modulus A_g under small deformation of the pile top are proposed, as well as the empirical methods for obtaining residual deformation.

Keywords: pre-stressed high-strength concrete (PHC) short pile foundation; solar power plant; field test; numerical simulation; design method

1 引 言

将部分高强预应力混凝土 (pre-stressed high-

strength concrete, PHC) 管桩插入地基再浇筑混凝土, 从而形成一种新型的带有悬臂立柱型式的 PHC 短桩基础结构。其中, 悬臂立柱主要用于安装太阳

收稿日期: 2021-03-22

修回日期: 2021-07-26

第一作者简介: 李红星, 男, 1976 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力结构和岩土工程新技术方面的研究工作。E-mail: lihongxing@nwepdi.com

能发电元件/镜面,埋置基础用于支撑整个系统。该新型基础结构的优势在于施工机械要求较低的情况下,仍能符合塔式太阳能光热发电严格的变形控制要求。鉴于所有的短桩基础结构占工程总费用的40%~50%^[1-2],所以这对形成高效和良好的经济效益具有重要的意义。

关于新型 PHC 短桩基础的研究鲜有报道,现有研究^[3-8]主要围绕定日镜镜面所受风作用的取值方法以及风荷载下悬臂立柱受力特性展开。Yu 等^[4]通过室内模型试验研究了串联形式定日镜的气动载荷问题。Blackmon^[5]通过参数敏感性分析研究了风条件、入射角、尺寸和耐久性等对定日镜驱动单元的影响。Zang 等^[6]通过试验和理论研究表明,风荷载对定日镜的机械性能和跟踪精度影响很大。进一步, Benammar 等^[7]通过数值和解析方法对风荷载下定日镜立柱的变形响应进行了研究,也有学者^[3, 8]对定日镜在风致振动下的动力响应进行了测试、分析和评价。很明显,这些研究主要针对镜面或悬臂立柱展开,都没有考虑不同荷载作用下基础结构的变形特性。

类似的承受侧向荷载和扭矩荷载的悬臂支架式支撑结构在电力工程和交通工程领域有较广应用,如高压输电线电杆、交通灯路杆和架空电缆等^[9]。早期^[10-11]开展了一些关于高桅杆臂钻孔基础的离心机试验研究。结果表明,扭矩对侧向荷载下基础的影响非常显著,且和扭矩与侧向荷载比有关,承载力削弱最大可以达到 50%以上。Thiyyakkandi 等^[12]近期开展的现场试验也得到了类似的结论,说明了扭矩对侧向荷载下基础承载力影响的重要性,并建议对侧向承载力进行一定折减以考虑耦合效应。但是这些研究并未对扭矩下基础变形和循环荷载下基础的残余变形展开详细研究。

太阳能发电主要在我国西北地区服役,结合

PHC 短桩的埋深特点,现场条件主要为砾石场地、黄土地和砂土地等。对于不同的场地条件,研究相对而言主要集中在水平受荷桩工况,《太阳能发电站支架基础技术规范》(GB 51101—2016)^[13]也只对基础侧向变形进行了规定。Davisson 等^[14]基于线弹性地基反力法对双层均质地基中水平受荷桩进行了解析计算,分析了上下层土体刚度和厚度对桩基性状的影响。赵明华等^[15-16]针对《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[17]中比例系数换算存在的不足,提出了双层地基 m 值(土体水平抗力系数)更合理的换算方法。从上述研究可见双层地基中单桩基础的受力变形分析方法尚不统一且相关的试验研究较为缺乏。所以有必要针对砂土地中新型 PHC 短桩基础开展实际使用条件下的现场试验研究,为实际工程提供试验和理论基础。

针对该新型基础可能服役的砂土地,本文拟开展侧向荷载、耦合荷载和循环荷载下新型 PHC 短桩基础的足尺试验,分析短桩基础的柱顶倾角、泥面位移、扭转角和残余变形的变化特性;再进行三维数值模拟,分析桩帽对基础变形和内力的影响规律;最后基于现场试验和数值模拟结果,针对 PHC 短桩基础设计方法进行讨论,为类似工程提供理论和试验基础。

2 现场试验概述与方案

2.1 工程地质条件

试验在陕西省榆林市神木大保当现场开展。大保当镇地处毛乌素沙漠边缘,除有流沙分布外,还有成片的半固定、固定沙地分布。场地内地层结构简单,砂粒较细且均匀,是良好的试验用地。通过轻型动力触探(LDPT)和室内直剪等土工试验获取了现场土层分布和力学特性等信息。

图 1 表示对场地 5 个选点进行的动力触探击数

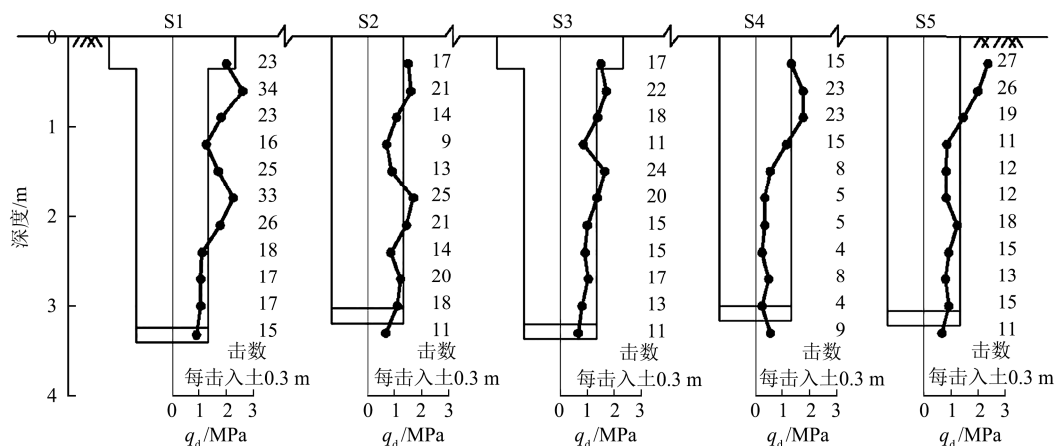


图 1 试验现场 5 个测点的动力触探击数及阻抗

Fig.1 Blow count and resistance of dynamic penetration tests of 5 points in the field

(LDPT-N) 及贯入阻抗 q_a 在试验深度范围内的结果。由图可知, 场地属于级配良好砂土且试验深度范围内分布均匀, 其平均黏聚力为 3.7 kPa、内摩擦角为 34° 、含水率为 4.2%、湿密度为 1.6 g/cm^3 、压缩模量为 16.7 MPa。现场地下水通常位于 5~6 m 以下, 明显低于本次试验的深度 (3 m 左右)。

2.2 PHC 短桩基础及工况设置

通过将部分 PHC 管桩植入钻孔后灌注混凝土形成短桩基础, 剩余 PHC 管桩形成悬臂立柱来安装太阳能吸热单元, 从而形成一种新型太阳能发电元件结构 (见图 2), 达到施工便捷、质量把控和节约成本的目的。图 2 是建成后 PHC 短桩基础及悬臂立柱的示意图, 其成孔直径约 700 mm、深度约 3.2 m; 部分工况在桩顶设置 $1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 0.35 \text{ m}$ 的混凝土桩帽 (见图 2(b)), 用于更好地传递悬臂部分的剪力和弯矩。

试验中管桩具体参数及截面配筋均根据 10D409 预应力管桩图集制造, 选用 PHC 管桩的外径为 400 mm、壁厚为 95 mm、AB 型号、混凝土强度等级为 C80。试验中管桩总长约 6.0 m, 植入深度即 PHC 短桩基础深度约 3.2 m。建造过程大致包括: ①开挖成孔, 有桩帽工况还需同时成槽; ②放入预制底座用于确保桩底施工质量, 底座上表面留有管桩同等直径圆槽用于精确保障管桩垂直度; ③植入 PHC 管桩; ④在管桩和成孔间隙浇筑混凝土。

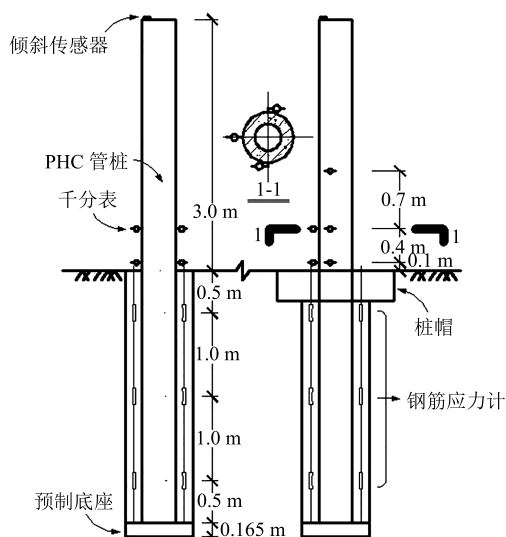


图 2 PHC 短桩基础及其悬臂立柱结构示意图

Fig.2 Sketch of the PHC pile foundation and its cantilever pile column

图 2 还展示了试验中的主要测试元件。在侧向荷载试验中, 倾斜传感器固定在立柱顶部, 用于获取柱顶的总倾斜值; 千分表安装在地表以上 0.1 m

和 0.5 m 处立柱的正前方和正后方, 0.1 m 千分表用于记录基础地表位移, 两个高度千分表用于换算基础的倾斜; 钢筋应力计埋置在地表以下 0.5、1.5 m 和 2.5 m 处基础的正前方和正后方。在侧向荷载和扭矩耦合试验中, 有所不同的是千分表, 分别安装在地表以上 0.1、0.5 m 和 1.2 m 处立柱的前、左、右方, 用于更好地获取基础的地表位移、倾斜、扭转角以及立柱的扭转角。

试验考虑了水平受荷桩 (S1 和 S2)、扭矩和剪力耦合受荷桩 (S3 和 S4) 和循环受荷桩 (S5) 三类, 其中 S1 和 S3 带有桩帽。表 2 总结了本次试验中所有工况桩的长度、埋深和加载点等参数。由于制造和施工误差, 各工况具体数值与设计存在较小偏差但总体上不影响试验结果。试验中, 在中心处设置足够刚度反力桩 (成孔直径 800 mm, PHC 直径 600 mm), 各试验桩围绕反力桩呈扇形布置且间距均大于 5 m。

表 1 试验短桩基础的实测尺寸

Table 1 Measured dimensions of the test short pile foundation

编号	荷载类型	预制桩长/m	立柱高度/m	埋入深度/m	加载高度/m	基础直径/m	桩帽情况
S1	侧向	5.970	2.730	3.240	2.630	0.716	有
S2	侧向	5.975	2.950	3.025	2.850	0.715	无
S3	耦合	5.970	2.771	3.199	2.871	0.716	有
S4	耦合	5.970	2.969	3.001	3.069	0.715	无
S5	循环	5.980	2.929	3.051	3.029	0.717	无

2.3 加载设备与方案

图 3 是系统的加载设备示意, 试验通过在立柱顶部固定液压油缸实现加载。通过钢丝绳串联反力桩、油缸、拉力传感器和试验受荷桩。拉力传感器用于记录试验过程中的实际加载情况。如图 3(a)所示, 单一侧向力的施加通过将钢丝绳固定在立柱顶端实现; 侧向荷载和扭矩耦合荷载的施加通过在立柱顶设置额外的钢制力臂实现。该力臂有效长度是 1.0 m, 经过受荷桩截面圆心且垂直于钢丝绳。另外, 试验过程中的设备安装主要依靠脚手架来实现。

考虑到试验选用管桩抗弯承载力为 $88 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 立柱高度约为 3.0 m, 则最大水平荷载不超过 30 kN, 所以, 试验中选定每级 3 kN, 13 级加载, 最大荷载 39 kN。本次试验中, 水平受荷桩工况和耦合受荷桩 (水平+扭矩) 工况均采用该加载方式。即为单调循环加载法: 每加载完一级记录稳定后数据, 再进行卸载记录稳定后数据, 再进行下一级加载。其中, 加卸载速率通常控制在 $3 \sim 4 \text{ kN/min}$; 记录数据每 10 min 读取一次, 最后两次差值小于 0.01 mm 后才

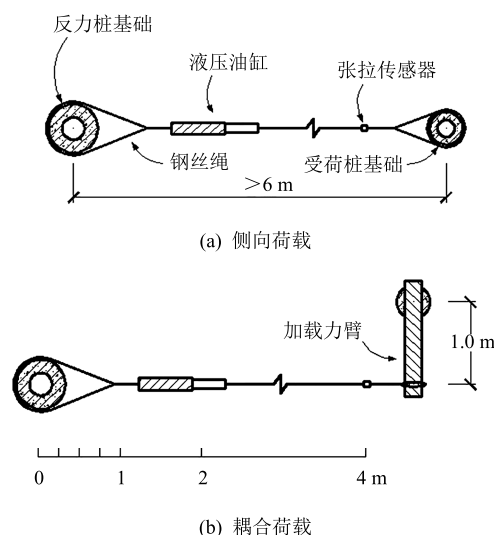


图3 PHC短桩基础悬臂立柱加载机制示意图
Fig.3 Loading of the cantilever pile column of the PHC short pile foundation

算稳定。在循环荷载试验中,需基于风荷载的随机性和周期性确定其正常使用极限状态和承载能力极限状态数值。结合风荷载分布图及甲方提资,本试验中正常使用极限状态荷载为6 kN,周期为2 min,进行20个周期试验;承载能力极限状态荷载为12 kN,周期为24 min,进行20个周期试验。

另外,桩身弯矩的获取是在管桩与井壁之间布置,两个深度处共4只钢筋应力计,用于对比和检验应变片的测试结果。此时截面弯矩可表示为

$$M(z) = \frac{I \Delta \sigma(z)}{2y(z)} \quad (1)$$

式中: I 为截面惯性矩; $\Delta \sigma$ 为轴向应力差; y 为水平面内前后两只钢筋应力计之间的距离。

3 试验结果与分析

3.1 侧向荷载试验

PHC短桩基础立柱的顶部变形对发电元件的有效性和安全性非常重要,通常用柱顶倾角来直观地反映PHC短桩基础受荷作用时的整体工作性状;另外,选用泥面位移(短桩在地面处的位移值)来进一步研究地基和基础的受力与变形特性。

图4表示水平荷载作用下无桩帽PHC短桩基础(S2)的柱顶倾角和泥面位移的变形曲线。可知,柱顶倾角和泥面位移均随着荷载的增大先后呈现缓慢增大、快速增大和急速增大的阶段性趋势,到第6级荷载时基础背面和土开始发生分离,最大荷载下变形分别为10.9 mrad和16.8 mm。基于上述变化规律,将柱顶倾角和泥面位移分为3个阶段:第1

阶段,1~4级荷载,变形和荷载呈线性正相关且几乎没有残余变形;第2阶段,5~9级荷载,变形开始呈非线性增长且残余变形逐渐增大;第3阶段,10级荷载以后,变形和残余变形均明显变大,直到立柱开裂后无法继续加载。其中,第2阶段柱顶倾角和泥面位移变形规律总体上仍保持一致,说明此时的变形主要是土体进入塑性阶段造成的;由图4中3张不同加载级时基础和立柱变形照片可知,第3阶段时立柱已经开裂,说明此时的变形的另一个贡献来自于PHC管桩的破坏。其中,残余变形是指基础结构在单次/多次受荷作用后,周边土体发生不可恢复的变形导致刚性基础结构发生的变位。

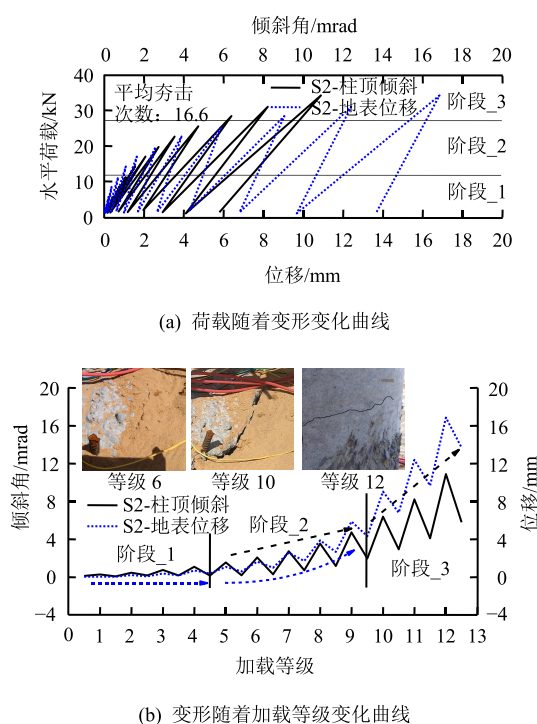
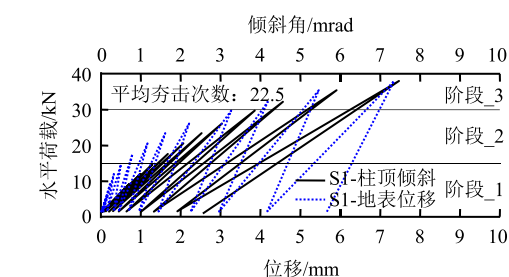
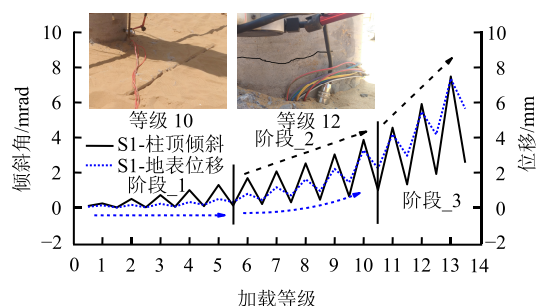


图4 侧向荷载下无桩帽PHC短桩基础柱顶倾角及泥面位移
Fig.4 Inclination angle of the pile top and displacement of the mudline of the PHC short pipe foundation without pipe cap under lateral loading

图5表示水平荷载作用下有桩帽PHC短桩基础(S1)的位移变化曲线。可知,柱顶倾角和泥面位移变化规律总体上均和无桩帽工况类似,到第7级荷载时基础背面和土开始发生分离,最大荷载下变形分别为7.5 mrad和7.4 mm。3个阶段具体对应荷载级为:1~5级,6~10级,11级以后。对比可知,有桩帽时最大变形分别减小了3.5 mrad和9.4 mm,前两个阶段荷载增加了一级。其中,地表位移减小非常明显,这主要是因为桩帽的存在:①增加了上覆应力,提高了上部土体的摩擦抗力;②带动了更多土体,增大了荷载扩散范围。另外,S1和S2立



(a) 荷载随着变形变化曲线



(b) 变形随着加载等级变化曲线

图 5 侧向荷载下有桩帽 PHC 短桩基础柱顶倾角及泥面位移
Fig.5 Inclination angle of the pile top and displacement of the mudline of the PHC short pipe foundation with pipe cap under lateral loading

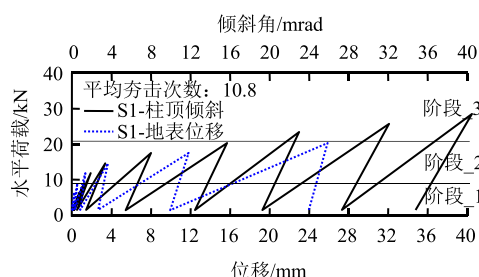
柱开裂均在第 12 级荷载发生。这说明有无桩帽时虽然对立柱的约束更好,但对其最大承载力没有影响,PHC 短桩基础的极限承载力由立柱自身受力特性决定。

结合塔式太阳能发电要求进一步分析可知,该新型 PHC 短桩基础结构变形的线性阶段由场地条件决定,可以作为太阳能发电元件严格的功能控制的设计依据;基础结构最大变形由场地条件和管桩特性两者决定且具有分阶段性,可以作为发电元件正常使用极限状态和承载力极限状态的设计依据。

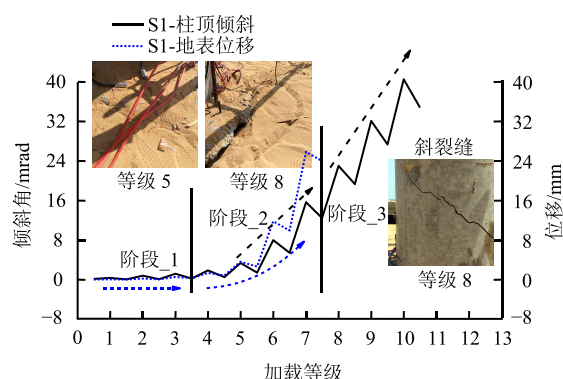
3.2 侧向和扭矩耦合荷载试验

短桩基础支撑的发电元件是大面积的反光镜,在服役中难免承受不均匀风载,所以本节分析偏心作用下(侧向力和扭矩)短桩基础的特性。将钢制力臂焊接在 PHC 管桩钢端板,从而提供试验所需的偏心扭力。力臂由两个工字钢叠合焊接而成,确保在试验中的挠曲变形可以忽略。力臂总长 1.2 m,加载长度 1.0 m 且通过管桩中心。

图 6 表示侧向力和扭矩作用下无桩帽 PHC 短桩基础(S4)的柱顶倾角和泥面位移的变形曲线。可知,柱顶倾角和泥面位移均随着荷载的增大而增大,且存在明显的阶段性趋势,到第 5 级荷载时基础和地基开始分离,最后测得的变形分别为 34.2 mrad 和 24.6 mm。需要说明的是,由于最后三级荷载时立柱变形过大导致千分表失效,所以最大泥面位移



(a) 荷载随着变形变化曲线



(b) 变形随着加载等级变化曲线

图 6 侧向和扭矩荷载下 PHC 短桩基础柱顶倾角及泥面位移
Fig.6 Inclination angle of the pile top and displacement of the mudline of the PHC short pipe foundation under coupled lateral and torque loading

为第 7 级荷载时的数值。基于上述规律,将立柱变形分为 3 个阶段:第 1 阶段,1~3 级荷载,变形和荷载呈线性正相关且几乎没有残余变形;第 2 阶段,4~7 级荷载,变形开始呈非线性增长且残余变形逐渐增大;第 3 阶段,8 级荷载以后,变形和残余变形均急速变大,8 级荷载时立柱底部即开始形成斜裂缝。和侧向荷载试验对比可知:①总体上变形仍呈现阶段特性;②扭矩的存在加快了变形的发展,平均提前 1 级;③扭矩的存在改变了基础最终的破坏模式。

图 7 表示耦合荷载作用下有桩帽 PHC 短桩基础(S3)的位移变化曲线。可知,柱顶倾角和泥面位移变化规律总体上均和无桩帽工况类似,到第 7 级荷载时基础背面和土开始发生分离,最大荷载下变形分别为 9.1 mrad 和 7.9 mm。3 个阶段具体对应荷载级为:1~4 级,5~8 级,9 级以后。对比可知,有桩帽时最大变形分别减小了 25.1 mrad 和 16.7 mm,前两个阶段荷载各增加了一级。可知,由于桩帽的存在,基础的变形减小非常显著,桩帽的作用已在 2.1 节分析,不再赘述。但是和侧向荷载工况相比,基础的变形均有所增大,开裂荷载也减小了约 25%。这说明桩帽对耦合荷载下的抗力也有显著提高,但扭矩对 PHC 短桩基础的极限破坏荷载有较大的削

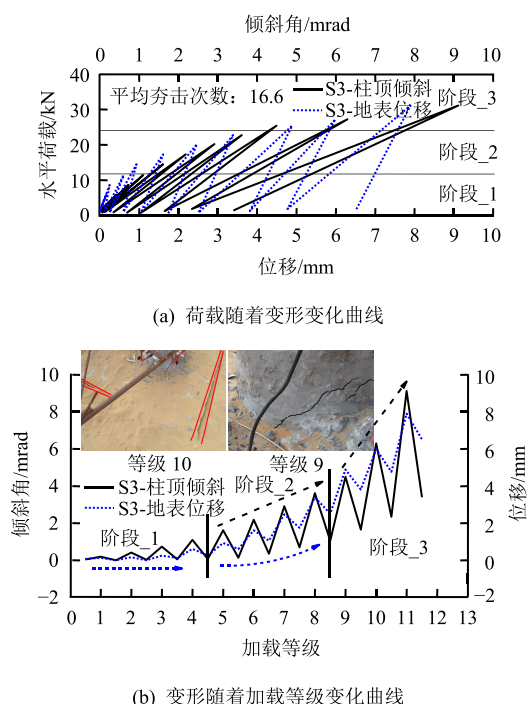


图7 耦合荷载下有桩帽PHC短桩基础柱顶倾角及泥面位移
Fig.7 Inclination angle of the pile top and displacement of the mudline of the PHC short pipe foundation with pipe cap under coupled loading

弱。

图8表示基础扭转角随着扭矩的变化曲线,基础扭转角通过地表千分表测量值进行换算。可知,其变形规律总体呈现应变强化特性且也具有阶段性,有无桩帽时基础的刚度响应相差较大:有桩帽时,扭转角在4.4 mrad时对应的扭矩达到25.4 kN·m;无桩帽时,同级别扭转角(3.8 mrad)时对应的扭矩仅为15.0 kN·m。虽然从动力触探的数值可知,无桩帽工况地基条件稍差,但从图8中曲线初期两者斜率非常接近,后期逐渐变大的规律可推测,桩帽对抗扭性能的提高是显著的。进一步分析可知,短桩基础的抗扭特性劣于抗弯特性,有成为控制性

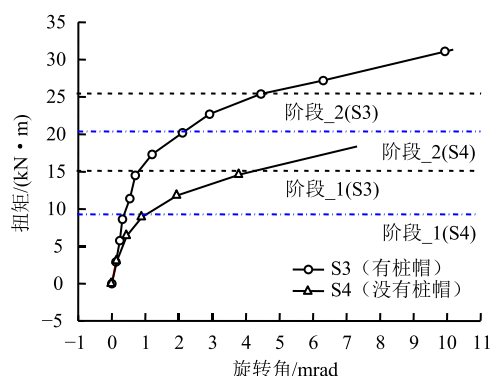


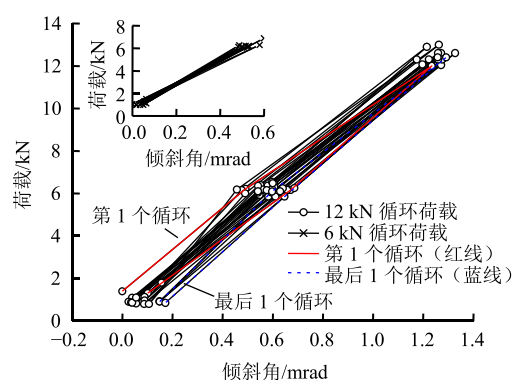
图8 耦合荷载下基础扭矩与扭转角变化曲线
Fig.8 Torque and torsion angle of the foundation under coupled loading

工况的可能,同样需要作为发电元件极限状态的设计依据。

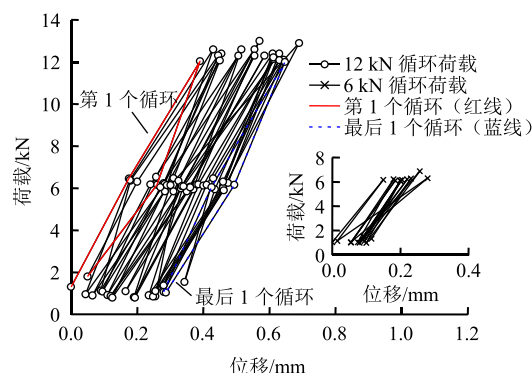
3.3 循环荷载试验

考虑到风荷载还存在周期特性,所以本节进一步分析循环耦合荷载作用下短桩基础的变形特性。结合风荷载分布图结合前述试验规律,循环试验中选用:弹性状态荷载为6 kN、周期为2 min;开始进入塑性状态荷载为12 kN、周期为24 min;均加载20个周期。

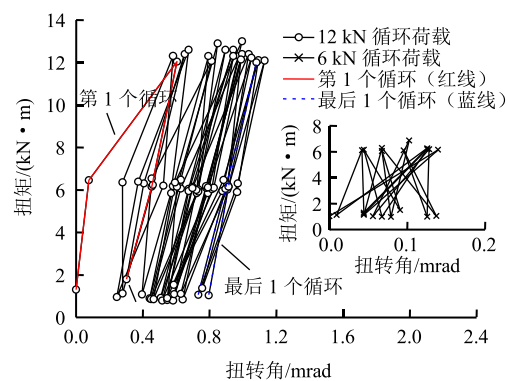
图9分别表示柱顶倾角、泥面位移和基础扭转



(a) 倾角变化曲线



(b) 位移变化曲线



(c) 扭转角变化曲线

图9 循环耦合荷载下荷载与基础变形示意
Fig.9 Load and deformation of the foundation under coupled cyclic loading

角随着循环荷载的变化曲线, 图中的小图均表示 6 kN 工况下的结果。由 6 kN 工况下的滞回曲线可知, 变形几乎保持同一起讫点(柱顶倾角)或者较小的偏移(泥面位移和基础扭转角), 考虑到小变形测量时无法避免的测量误差和场地微小差距, 说明系统主要处于弹性状态且循环荷载对短桩基础几乎没有影响。由 12 kN 工况下的滞回曲线可知, 变形开始向右偏移说明塑性变形在持续发生; 在 10 个循环左右后, 变形开始明显缓慢并呈现逐渐收敛的趋势, 这也说明了选用 20 个周期作为加载次数的可靠性。

进一步分析可知, 加载过程中, 曲线斜率总体保持不变, 且随着循环次数的增加减小, 但不明显; 卸载过程中, 曲线斜率亦基本保持不变, 且随着次数的增加变化并不明显。这说明, 正常使用条件下反复作用对基础结构的加卸载刚度退化不大。通过第一次和最后一次加载结果对比可知, 循环加载完毕后: 柱顶倾角残余变形由 0.1 mrad 增大到 0.2 mrad, 泥面位移残余变形由 0.1 mm 增大到 0.25 mm, 基础扭转角残余变形由 0.3 mrad 增大到 0.7 mrad。可知, 循环荷载后的短桩基础的残余变形整体上约为单次加载后的 2 倍。

明显, 在 6 kN 和 12 kN 荷载下可认为立柱部分仍处于弹性阶段。那么总的来说, 单个滞回圈的构型不饱满且滞回圈起讫点的差值相对较小, 说明, 周边土体发生了较小的塑性变形; 随着加载次数的增大, 残余变形持续增长, 说明, 该增长主要由土体挤密以后造成^[18]; 在正常使用状态下, PHC 短桩基础的残余变形主要与土体挤密和土体塑性变形存在很强的关联性^[19]。在实际工程中, 鉴于土体塑性累积变形难以准确计算, 上述结果和循环前后比例可作为经验值进行估算。

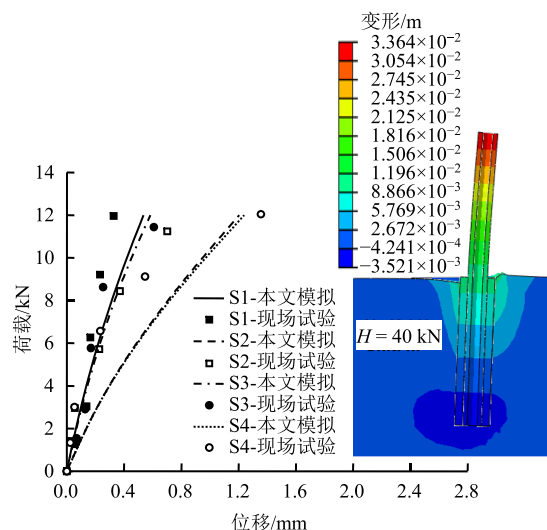
4 PHC 短桩基础数值分析

4.1 基础内力分析

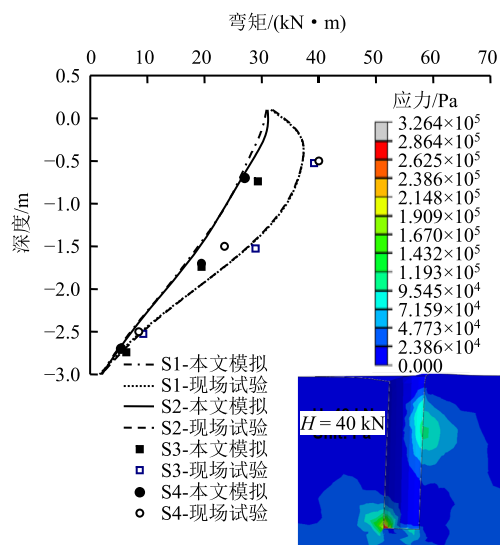
为了进一步了解基础的变形和内力分布情况, 基于三维数值模拟软件 Abaqus 建立了现场试验中 PHC 短桩基础的模型, 模拟的所有参数均基于现场试验: ①考虑到模型尺寸效应, 土体模型的长和宽均为 22.5 m, 厚为 9 m, 基础埋置于土体中心; ②土体底部约束了竖向位移, 侧面约束了水平方向位移; ③由于预制桩体和填充混凝土均采用线弹性模型, 砂土采用 Mohr-Coulomb 模型; ④管桩立柱为 C80 强度等级的混凝土(重度为 25 kN/m³, 杨氏模量为 3.8×10³ MPa, 泊松比为 0.2); 填充混凝土为 C40 强度等级的混凝土(重度为 25 kN/m³, 杨氏模

量为 3.2×10³ MPa, 泊松比为 0.2); 土体的强度参数按照岩土勘察的结果进行取值, 杨氏模量按照工程经验取实测压缩模量的 2~5 倍(41.8 MPa), 泊松比取 0.3; ⑤砂土采用允许弹性滑移变形的 Penalty 摩擦模型, 采用罚刚度算法, 即将接触或者边界条件处理为对函数的罚因子, 其中摩擦系数取 $\tan\phi$ 。另外, 几何尺寸和具体参数见表 1, 现场场地情况和相关参数需参照 2.1 节。

图 10 对比了 Abaqus 模拟的泥面位移及基础内力与各组试验的实测值, 可知两者结果较为吻合, 验证了模拟的可行性和正确性。图 10(a)中展示出了当水平荷载足够大时(40 kN) S2 试验的 PHC 短桩基础的变形, 可以发现立柱部分的弯曲是明显的,



(a) 荷载-位移曲线



(b) 位移-弯矩曲线

图 10 数值模型与现场试验内力和变形验证
Fig.10 Internal force and deformation of the numerical simulation and field test

而基础不是。因此基础可以看做是刚性桩。图 10(b) 中展示出此时的土体应力分布, 可以发现与典型的刚性桩没什么不同, 而且存在位移为 0、桩周土应力也基本为 0 的旋转点。表 2 给出了每组试验的旋转点位置, 可以发现旋转点深度基本上等于 $2/3 \sim 3/4$ 倍的基础长度, 这在设计中可以进行应用。

表 2 基础旋转点分布情况
Table 2 Distribution of the rotation points in the foundation

编号	旋转点深度 x_c/m	基础长度 L/m	x_c/L
S1	2.34	3.240	0.72
S2	2.03	3.025	0.67
S3	2.22	3.199	0.69
S4	2.13	3.001	0.71

4.2 桩帽的影响

在现场试验中, 桩帽有效减小了 PHC 短桩基础的位移。为了将桩帽的影响考虑进 PHC 短桩基础的设计中, 利用数值模拟分析了不同桩帽尺寸条件下的变形。参数与前述模型的不同在于尺寸。这里采用的立柱高度统一为 3 m, 基础直径统一为 700 mm, 基础长度分别采用了 3.5 m 和 2.5 m。计算结果如表 3 所示, 显然基础长度和基础宽度都可以减小基础变形。但是当桩帽的混凝土用量都增加约 56% 且基础长度为 3.5 m 时, 增加桩帽边长为 1.75 m 和桩帽厚度为 0.55 m 分别可以使泥面位移减小 18.3% 和 8.3%。当基础长度为 2.5 m 时, 减小的比率更大, 分别为 22.9% 和 11.7%。因此, 增加桩帽边长来减小侧向变形的效果比增加桩帽厚度好。当基础长度为 3.5 m 时, 增加桩帽边长为 1.75 m 和桩帽厚度为 0.55 m 分别可以使扭转角减小 36.5% 和 28.3%。当基础长度为 2.5 m 时, 减小的比率更大, 分别为 41.9% 和 34.0%。因此桩帽减小扭转角的比率要高于减小侧向变形, 且增加桩帽边长比增加桩帽厚度效果好。

表 3 不同桩帽情况下 PHC 短桩变形
Table 3 Deformation of the PHC short pile foundation with different types of pile caps

基础长度/m	桩帽尺寸/ m^3	位移/mm	旋转/mrad
3.5	1.4×1.4×0.35	0.458	0.364
	1.4×1.4×0.55	0.420(-8.3%)	0.261(-28.3%)
	1.75×1.75×0.35	0.374(-18.3%)	0.231(-36.5%)
	2.1×2.1×0.35	0.314(-31.4%)	0.160(-56.0%)
2.5	1.4×1.4×0.35	0.668	0.468
	1.4×1.4×0.55	0.590(-11.7%)	0.309(-34.0%)
	1.75×1.75×0.35	0.515(-22.9%)	0.272(-41.9%)
	2.1×2.1×0.35	0.408(-38.9%)	0.164(-65.0%)

5 PHC 短桩基础设计方法讨论

5.1 总体设计思路

不同于光伏发电主要基于发电元件基础的正常使用极限状态和承载能力极限状态进行设计, 塔式太阳能光热发电系统还要求每一个反光发电元件在正常工作荷载下, 基础结构处于弹性可恢复状态; 在正常使用极限状态下, 基础结构的累计残余变形满足相应的控制限值。这是因为光热发电系统不能不考虑风荷载对反光镜面作用的不均匀性(大小和部位)和周期性, 否则无法实现单个元件对光线的精确反射从而大大降低中心塔光电转换的效率。

总结前述试验结果可知, 在侧向荷载试验和耦合荷载试验中该 PHC 短桩基础变形均呈现了明显的三阶段特性, 结合上述塔式太阳能光热发电系统要求可以确定设计思路为: 第 1 阶段, 弹性阶段, 需满足正常工作荷载下的变形控制要求; 第 2 阶段, 土体进入塑性阶段, 需满足正常使用极限状态控制要求; 第 3 阶段, 立柱进入塑性阶段, 需满足承载能力极限状态控制要求; 另外, 在正常使用的循环荷载下残余变形需满足控制要求。

5.2 短桩基础变形控制设计

针对发电元件一般会对柱顶倾角和柱顶位移提出阶段性的控制要求, 如图 11 所示, 进一步针对上述设计思路深化如下: ①立柱顶部变形由短桩基础和立柱两部分叠加而成(ω 为柱顶总位移, φ 为柱顶总转角); ②短桩基础变形可认为主要由刚性转动产生(ω_{ZR} 为柱顶位移, ω_{JR} 为某高度处柱位移, φ 为基础转角); ③立柱变形可等效为一端固定的悬臂结构(ω_{ZB} 为柱顶位移, φ_Z 为柱顶转角)。

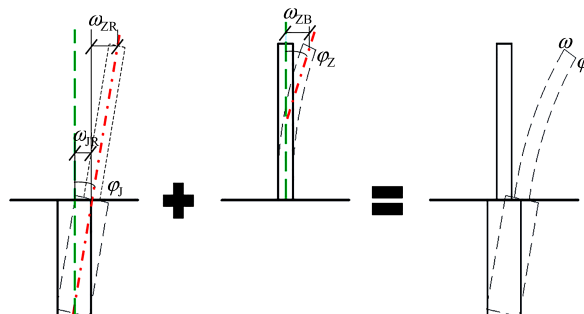


图 11 PHC 短桩基础变形控制设计总体思路示意
Fig.11 General design thought for the deformation control for the PHC short pile foundation

5.2.1 立柱的变形

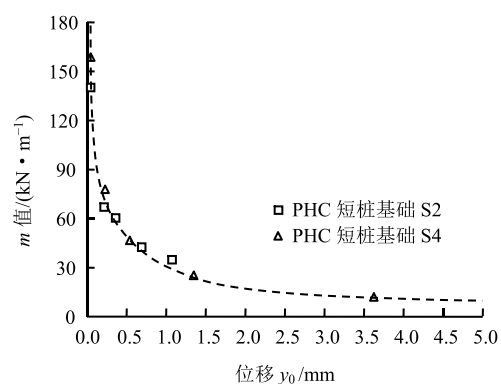
前述试验中, 预应力管桩/立柱在受荷前期呈现良好的弹性, 受荷后期开裂后迅速进入塑性并发生

破坏, 所以悬臂立柱的变形特性完全符合弹性悬臂结构/构件特性, 其扭转角和偏转角的计算方法可根据典型的材料力学或结构力学理论进行计算。

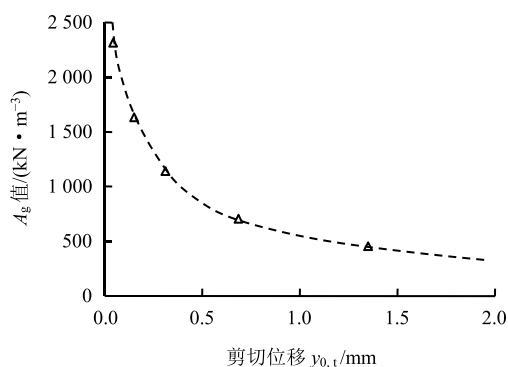
5.2.2 基础的变形

基础的变形包括是侧向变形和扭转变形。由前述现场试验和数值模拟可知, 短桩基础呈现为刚性桩特性, 可选用弹性地基反力法进行侧向荷载下基础变形计算。该方法最大的难度在于土体的水平抗力系数 (m 值) 的确定, m 值通常可通过桩基规范和地区经验获取, 但这通常是针对桩顶发生较大变形的工况, 对于光热发电这类对变形有严格要求的桩基础并不一定适用。所以, ①需要根据短桩基础位移控制限值, 开展小变形下桩端水平载荷试验, 获取 m 值; ②在类似本试验砂土地工况的工程应用, 可基于本试验结果进行反演获取 m 值。

基础扭转角的计算在多数规范中并未提及, 需要根据文献[20]选取, 其计算的关键因素和侧向变形类似, 即土体剪切模量比例系数 A_g 的确定。 A_g 值的确定也有两种方法: ①开展小变形下桩端受扭荷载试验; ②基于本试验结构进行反演, 为类似工程提供经验参考。图 12 是基于本试验反演的 m 值



(a) m 值随着水平位移变化曲线



(b) A_g 值随着剪切位移变化曲线

图 12 砂土地 m 值和 A_g 随着位移的变形曲线
Fig.12 Variation of m and A_g with displacement on the sandy site

和 A_g 值随着变形的变化曲线, 具体流程和桩端边界假设可参见文献[21]。

5.2.3 基础的残余变形

考虑到建造的经济性, PHC 短桩基础允许在正常使用极限荷载状态下发生一定的残余变形。残余变形是指基础结构在单次/多次受荷作用后, 主要由周边土体发生的不可恢复的变形, 导致刚性基础结构的变位。但通常侧向受荷桩基础的设计不考虑残余变形, 相关精确的计算方法也鲜有报道。本文考虑到残余变形与地基土基本特性的强相关性, 所以定义了一个新参数残余变形比, 尝试基于现场试验的结果直接给出残余变形与残余泥面位移之间的拟合关系 (见图 13), 可用于类似工程中估算基础的残余变形。

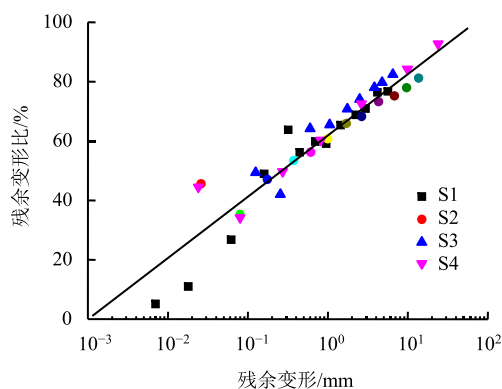


图 13 砂土地基础残余变形与泥面位移拟合关系曲线
Fig.13 Fitting curves of the residual deformation of the foundation and mudline displacement on the sandy site

5.3 短桩基础承载力计算

短桩基础的承载力计算可以分为悬臂立柱、刚性基础和地基承载力 3 部分。主要涵盖的内容是悬臂立柱及刚性桩基础的抗弯、抗扭和抗剪, 地基的侧向承载力和扭转承载力。其相应的理论均较为成熟, 本文不再赘述。另外, 需要说明的是桩帽的影响、耦合荷载的影响可以基于试验和数值模拟进一步相应折减。

另外, 对桩帽的设计可认为: 其分担了部分外荷载从而降低了基础内力, 即通过对外荷载扣除桩帽抵消的部分荷载来设计桩帽。但考虑到试验和数值工况较为有限且桩帽的设置偏有经验性和多个设计参数 (宽度、长度和厚度), 所以本文更接近于提供一种构造措施的选择和给类似工程一些经验参照。

6 结 论

本文开展了侧向荷载、侧向扭转耦合荷载和循

环荷载下砂土场地新型 PHC 短桩基础的现场试验, 分析了不同荷载作用下基础的变形特性, 进一步结合数值模拟研究了基础内力和桩帽的影响, 最后针对 PHC 短桩基础设计方法进行了讨论, 得到的主要结论如下:

(1) 侧向荷载和耦合荷载作用下 PHC 短桩基础的变形总体上呈现分阶段特性: 阶段 1, 立柱与基础均为弹性变形; 阶段 2, 土体发生塑性变形; 阶段 3, 立柱也发生塑性变形。

(2) 桩帽可以有效地减小泥面位移, 但对立柱的变形影响不明显; 桩帽的发挥机制主要是增大了荷载扩散范围, 所以其边长对泥面位移的影响要大于厚度。

(3) 扭矩会进一步加快 PHC 短桩基础的变形发展, 平均提前 1 级荷载; 扭矩改变了短桩基础的破坏模式, 主要是立柱的开裂荷载减小了 25%; 桩帽对基础抗扭也有较好的提高作用。

(4) 正常工作荷载下, 循环荷载对短桩基础变形没有明显的累积效果; 通常 10 个循环荷载后, 短桩基础的变形即明显逐渐收敛; 正常使用极限荷载下, 循环荷载后的残余变形约为单次荷载下变形的 2 倍。

(5) 桩身弯矩随深度呈抛物线形, 最大桩身弯矩点基本保持不变, 总体呈刚性桩特性。

(6) 本文基于现场试验、数值模拟, 结合太阳能光热发电元件变形控制要求, 对 PHC 短桩基础设计方法进行了讨论; 提出了桩端小变形下 m 值和 A_g 值的获取方法; 基于试验结果, 提出了残余变形的经验获取方法。

最后, 以上方法适用于类似工程, 其他情况仍需要针对桩帽对短桩基础的变形影响、耦合荷载下基础的承载力、风荷载的发生概率等问题开展进一步研究。

参考文献

- [1] ZHANG H L, BAEYENS J, DEGRÈVE J, et al. Concentrated solar power plants: review and design methodology[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 466-481.
- [2] KOLB G J, JONES S A, DONNELLY M W, et al. Heliostat cost reduction study[R]. [S. l.]: United States. Department of Energy, 2007: 158.
- [3] BO G, LI Z, WANG Z, et al. Wind-induced dynamic response of heliostat[J]. *Renewable Energy*, 2012, 38(1): 206-213.
- [4] YU J S, EMES M J, GHANADI F, et al. Experimental investigation of peak wind loads on tandem operating heliostats within an atmospheric boundary layer[J]. *Solar Energy*, 2019, 183: 248-259.
- [5] BLACKMON JAMES. Heliostat drive unit design considerations—site wind load effects on projected fatigue life and safety factor[J]. *Solar Energy*, 2014, 105: 170-180.
- [6] ZANG C C, GONG B, WANG Z F. Experimental and theoretical study of wind loads and mechanical performance analysis of heliostats[J]. *Solar Energy*, 2014, 105: 48-57.
- [7] BENAMMAR S, TEE K F. Structural reliability analysis of a heliostat under wind load for concentrating solar power[J]. *Solar Energy*, 2019, 181(1): 43-52.
- [8] GRIFFITH D T, MOYA A C, HO C K, et al. Structural dynamics testing and analysis for design evaluation and monitoring of heliostats[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2011, 137(2): 021010.
- [9] PFAHL A, RANDT M, HOLZE C, et al. Autonomous light-weight heliostat with rim drives[J]. *Solar Energy*, 2013, 92(92): 230-240.
- [10] MCVAY M, ZHANG L, MOLNIT T, et al. Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124: 1016-1026.
- [11] HU Z, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Influence of torque on lateral capacity of drilled shafts in sands[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(4): 456-464.
- [12] THIYYA KKANDI S, MCVAY M, LAI P, et al. Full-scale coupled torsion and lateral response of mast arm drilled shaft foundations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(12). DOI: 10.1139/cgj-2016-0241.
- [13] 中国电力企业联合会. GB 51101—2016 太阳能发电站支架基础技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016. China Electricity Council. GB 51101—2016 Technical code for supporting bracket foundation of solar power station[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [14] DAVISSON M, GILL H. Laterally loaded piles in a layered soil system[J]. *Soil Mechanics and Foundation Division*, 1963, 89(3): 63-94.
- [15] 赵明华, 刘峻龙, 刘建华. 双层地基横向受荷桩简化计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23: 58-61. ZHAO Ming-hua, LIU Jun-long, LIU Jian-hua. Research about simplified calculation method of laterally-loaded piles in double-layered foundation[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23: 58-61.