

深海超长钢护筒静压承载特性原位试验研究

苏碧第¹, 乔伟², 邱树茂^{3*}, 吕雪⁴, 陈真桂⁵

(1. 宁德三都澳高速公路有限责任公司, 福建 宁德 355100; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京市 100083;
3. 交通运输部公路科学研究院, 北京市 100088; 4. 浙江交工集团股份有限公司, 浙江 杭州 310051;
5. 中铁十七局集团第六工程有限公司, 福建 福州 350014)

摘要:为揭示超长大直径钢护筒在深海区域施工过程中应力应变的分布特性、荷载特性及影响机制, 该文通过动态监测深海区钢护筒静压施工过程中筒身动态应力应变, 推算钢护筒应力分布; 同时使用Abaqus软件进行有限元模拟, 分析了海底倾斜岩面钢护筒静压过程中, 桩顶荷载、侧摩阻力和端阻力的变化特点。研究结果表明: ① 在初压阶段, 钢护筒的整体变形较大, 平均应变速率分别为 $40 \times 10^{-6}/h$ 和 $56 \times 10^{-6}/h$, 整体变形显著; 配重压阶段, 受桩端阻力影响, 平均应变速率从 $2.5 \times 10^{-6}/h$ 增至 $28 \times 10^{-6}/h$ 。桩顶荷载和侧摩阻力的发展决定了端阻力的大小; ② 受薄壁效应影响, 水面以上和水中段钢护筒的轴力分布不均, 上部轴力逐渐增大, 中部保持不变, 下部逐渐减小; ③ 钢护筒的侧摩阻力与土体参数和入土深度相关。初期, 侧摩阻力受入土深度影响较大, 随着入土深度增加, 土体参数成为主要因素。研究结论可为类似施工环境下的深海工程超长超大钢护筒设计与施工提供理论依据。

关键词: 钢护筒; 原位试验; 端阻力; 轴力; 土体参数; 侧摩阻力

中图分类号: U445.55

文献标志码: A

In-Situ Experimental Study on Static Pressure Bearing Characteristics of Deep-Sea Super-Long Steel Casing

SU Bidi¹, QIAO Wei², QIU Shumao^{3*}, LYU Xue⁴, CHEN Zhengui⁵

(1. Ningde Sandu Ao Expressway Co., Ltd., Ningde, Fujian 355100, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
4. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310051, China; 5. China Railway 17th Bureau Group Sixth Engineering Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350014, China)

Abstract: To reveal the distribution characteristics of stress and strain, load characteristics, and influence mechanism of super-long and large-diameter steel casings during the construction process in deep-sea areas, the dynamic stress and strain of the casing body were dynamically monitored during the static pressure construction of the steel casing in deep-sea areas in this paper to calculate the stress distribution of the steel casing; meanwhile, finite element simulation was conducted using Abaqus software to analyze the variation characteristics of pile top load, side friction resistance, and end resistance during the static pressure process of the steel casing on the inclined rock surface of the seabed. The research results indicate that: ① In the initial pressing stage, the overall deformation of the steel casing is relatively large, and the average strain rates are $40 \times 10^{-6}/h$ and $56 \times 10^{-6}/h$, respectively, indicating significant overall deformation; in the counterweight pressing stage, affected by the pile end resistance, the average strain rate increases from $2.5 \times 10^{-6}/h$ to $28 \times 10^{-6}/h$. The development of the pile top load and side friction resistance determines the magnitude of the end resistance; ② Affected by the thin-wall effect, the axial force of the above-water and underwater sections of the steel casing is unevenly distributed, with the upper axial force gradually increasing, the middle part remaining unchanged, and the lower part gradually decreasing; ③ The side friction resistance of the steel casing is related to soil parameters and penetration depth. In

收稿日期: 2025-01-17 修回日期: 2025-03-06

基金项目: 福建省交通运输科技项目(编号: 2021Y043)

作者简介: 苏碧第, 男, 高级工程师. E-mail: 291750934@qq.com

*通信作者: 邱树茂, 男, 博士(后), 助理研究员. E-mail: sm.qiu@rioh.cn

the initial stage, the side friction resistance is greatly affected by the penetration depth, and with the increase of depth, soil parameters become the main factor. The research conclusions can provide a theoretical basis for the design and construction of super-long and super-large steel casings for deep-sea engineering under similar construction environments.

Keywords: steel casing; in-situ experiment; end resistance; axial force; soil parameter; side friction resistance

0 引言

在生态敏感的深海养殖区域进行钢护筒的打设需考虑施工对海洋生物及环境的影响^[1]。东吾洋特大桥位于福建省霞浦县,施工区域为大黄鱼养殖区,且水深、浪急,采用传统的锤击或者振动法无法进行施工。桥梁设计的钢护筒为超大超长直径钢护筒,施工存在地质复杂、沉桩困难等问题,因此,采用静压法沉桩可以有效地减少噪声污染,但静压条件下,深水中超长钢护筒的承载特性监测存在一定的难度。

在超长大直径钢护筒的设计与施工中,埋深是影响其侧摩阻力与桩身轴力的一个重要因素^[2-3],随着土体性质的变化,侧摩阻力与桩身轴力的发挥程度差异显著,钢管桩的承载力随着时间不断发生变化且钢管桩侧阻力的恢复系数远大于端阻力^[4-6]。特别是在海洋环境中,钢管桩与钢护筒的耐久性与长期承载能力也受到海水腐蚀的影响^[7]。张智梅等^[8]通过模拟锤击法和振动法两种沉桩方式的沉桩过程,指出这两种方法对海洋环境影响都较大;李林等^[9]研究了沉桩结束后静压桩承载特性的变化,发现其承载力提升主要是由桩侧摩阻力提供;袁立斌等^[10]通过试验研究与数值计算,总结了珊瑚礁地质钢管桩承载机理,提出了改进的钢管桩竖向承载力设计方法;崔允亮等^[11]通过研究发现,变截面可以改变钢管复合桩的承载性能,桩端阻力对桩基承载力的影响明显;冯忠居等^[12-13]分别通过离心模拟试验及数值模拟研究了埋深对钢管桩承载特性的影响,发现埋深是影响钢管桩的侧摩阻力及变形的重要因素;王耀琴等^[14]通过数值模拟软件Abaqus研究了钢管复合桩在不同荷载作用下的变形及承载规律;吴荣辉等^[15]通过现场静荷载试验,研究了江苏海岸辐射沙洲地层中大直径钢管桩基础承载性能;邵红杰等^[16]、熊根等^[17]分别通过现场试验和模拟软件研究了打桩过程中的桩侧摩阻力特性;李媛媛等^[18]利用有限元分析软件Abaqus进行数值模拟分析,研究了江中超大直径钻孔灌注桩成桩过程中钢护筒的受力

性能。Aksoy等^[19]研究表明,软件模拟能较为系统地对钢护筒受荷载作用过程中的受力特性进行分析。钢护筒的壁厚、材料特性以及施工工艺是决定钢护筒施工质量及耐久性的重要因素,其作为桥梁的永久结构也影响整个桥梁的稳定性^[20-22]。

本文基于东吾洋特大桥深海区超大超长直径钢护筒的静压施工过程,创新性地施工过程中动态监测筒身应力应变变化,并结合Abaqus软件进行有限元分析,研究钢护筒在不同荷载和埋深条件下筒身内力分布、侧摩阻力分布和筒端阻力发展规律,特别关注海底倾斜岩层等复杂条件对其承载能力的影响,为该区域后续监测及施工运营提供理论依据。

1 工程概况

东吾洋大桥跨越东吾洋,全长2 546.6 m,起点桩号为K1+346.4,终点桩号为K3+893,该桥为宁(波)一上(海)高速公路的控制性工程,桥梁下部基础施工水深最深达63 m,超过48 m水深的基础路段长850 m,桥梁基础的超大桩径、超水深等水下基础施工技术复杂。其中,通航孔桥采用跨径(100+2×180+100) m的矮塔斜拉桥,深水区非通航孔桥采用90 m钢混组合梁桥,浅滩区非通航孔桥采用50 m预应力混凝土箱梁桥,通航孔桥全长560 m,大桥标准宽度28.1 m。本桥采用双孔单向通航,通航净宽2×140 m,通航净高41.25 m,最高通航水位+5.29 m。

2 试验与方法

2.1 试件与设备选取

试验选取钢管护筒长度为79.10 m,直径为4.4 m,壁厚为36 mm。按施工设计,要求钢护筒长度原则上伸入局剖冲刷线以下10 m,并进入稳定土层(如粉质黏土层 ≥ 5 m或砂土状强风化花岗岩 ≥ 2 m)。为满足试验需要,本试验采用钢弦式表面传感器及分布式光纤传感器测取钢护筒应变,传感器布置示意图如图1所示,传感器保护装置如图2所示。钢弦式传感器一般适用于大范围桥梁结构应力和应变测量,适合高应变环境,其精度通常为 $\pm 0.5\% \sim \pm 2\%$,分布

式光纤传感器能够适应不同环境下的长距离测量,同时可以将精度控制在 $\pm 1\%$ 以内。在离钢护筒底部1 m和离钢护筒顶部2 m处,各加装2个钢弦式表面传感器。沿钢护筒截面对称方式,选取2条光纤铺设线路分别检测钢护筒两侧(A面、B面)的应变。沿着钢护筒长度铺设粘贴光纤,每条线路是由2条高传递紧包护套应变感测光缆在底部熔接而成的一条U形回路。

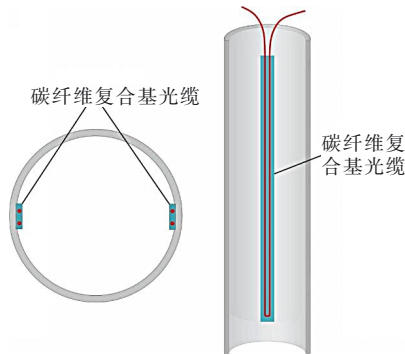


图1 钢管桩光纤传感器布置示意图

Figure 1 Schematic diagram of optical fiber sensor layout for steel pipe pile



图2 传感器保护装置示意图

Figure 2 Schematic diagram of sensor protection device

2.2 现场试验

压桩施工过程如表1所示。第1天采用桩帽及桩锤进行初压,第2天在桩帽、桩锤的基础上增加配重进行复压。采用分布式光纤传感器以及钢弦式表面传感器,监测不同压力及时间段的钢护筒应变值,获得大直径钢护筒静压状态下的顶部轴力、底部轴力、侧摩阻力以及端阻力随着加载重量的变化规律,并总结钢护筒承载特性的影响因素。

2.3 有限元模型建立

利用 Abaqus 软件对建立的模型进行静压法沉桩的全过程动态数值分析计算,研究在静压作用下影响钢护筒侧摩阻力的因素。

对钢护筒及土体建立三维实体有限元模型,并对其进行模拟。钢护筒取值时参考了实际工程中使

表1 压桩施工过程

Table 1 Construction process of pile pressing

日期	工况	加载荷载/kN
第1天	开始采集	0
	自主下放开始	桩帽 500
	自主下放到位	桩帽 500
	压重	桩帽 500、桩锤 2 500
第2天	开始静压	桩帽 500、桩锤 2 500、配重 6 000
	第二次静压	桩帽 500、桩锤 2 500、配重 6 000
	静压结束	桩帽 500

用的钢材参数,以确保模型准确表达护筒的变形和受力情况,并基于钢护筒直径与长度的比例选择适宜的网格密度。钢管长为 79.1 m,直径为 4.4 m,钢管壁厚为 3.6 cm,密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。钢护筒长度较长,在轴向方向上设置较为密集的网格(选择网格质量较高的六面体网格单元划分)以确保受力和变形的精度。此外,实际工程中护筒外壁受到周围土体的影响,为确保模拟的稳定性和计算的收敛性,对护筒模型添加约束条件,将模型底部固定,侧面限制水平位移,顶部设置为自由边界条件。

护筒外壁周围的土体依据实际土层特性分别赋予各层不同的材料参数(表2),土体模型尺寸如下:土体计算范围取 20 倍桩径(88 m),土层厚度取 2 倍管长(158.2 m),以反映实际土体的非均质性。在网格划分时(图3),采用较密集的网格(以六面体单元为主)划分来体现侧摩阻力的变化,远离护筒的区域则适当降低网格密度(采用四面体单元或三角网格划分),以平衡计算效率和精度。模型底部固定,侧面限制水平位移,顶部自由。各接触面之间选择面面接触模型,法向作用选取硬接触;切向作用选择罚函数,摩擦因数取 0.3。对钢护筒施加自重及各阶段的集中作用力,集中作用力分别作用于钢护筒顶的四等分点处。

3 试验结果分析与讨论

3.1 顶部轴力

如表3、图4所示,初压阶段及配重压阶段钢护筒顶部应变均经历了先增大后恢复的过程。前 2 h 内,钢护筒顶部的变形较小,分析原因为该阶段钢护筒底部还未深入花岗岩层,钢护筒还未受到较大的轴力作用。从第 2 h 开始,钢护筒顶部应变突然增大,这是因为钢护筒底部到达花岗岩层,钢护筒的轴力

表 2 土体材料参数

Table 2 Parameters of soil material

土层名称	层底标高/m	层厚/m	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
碎石	-49.63	2.75	25.00	0.27	2.10	36	
淤泥质黏土	-56.23	6.60	2.06	0.30	1.71	18	11
粗砂	-64.28	8.05	9.00	0.22	1.85	30	7
淤泥质黏土	-69.08	4.80	2.06	0.30	1.71	18	11
砂土状强风化花岗斑岩	-70.98	1.90	10.00	0.20	1.95	29	30
碎块状强风化花岗斑岩	-73.98	3.00	18.00	0.18	2.00	32	36
中风化花岗斑岩			15 000.00	0.15	2.10	40	50

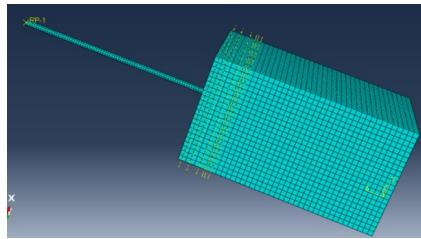


图 3 计算模型网格划分

Figure 3 Meshing of computational model

显著增加。在桩帽、桩锤及配重作用下,钢护筒顶部发生急剧变形,直到达到变形极限。钢护筒顶部的变形主要受桩身轴力的影响,应变改变量较大。

表 3 钢护筒顶部轴力及应变数据

Table 3 Data of axial force and strain at top of steel casing

阶段	时间	应变/ 10^{-6}	应变差/ 10^{-6}	轴力/kN
初压阶段	16:21	-8.3		
	16:36	-19.2	-10.9	-1 108.33
	16:41	-22.2	-20.6	-2 094.64
	17:06	-42.8		
配重压阶段	16:06	-0.8		-2 399.69
	16:16	-24.4	-23.6	
	17:36	-23.7	18.8	-1 911.61
	17:51	-4.9		

配重压阶段实测数据反算得到的轴力与实际加载值存在很大差距,为此,采用 Abaqus 软件对钢护筒的压桩过程进行有限元分析。计算模型中,将配重压桩阶段 6 000 kN 荷载按实际加载点分为 4 个 1 500 kN 集中荷载,提取距离钢护筒顶 2 m 处的应变计算结果如图 5 所示。

从图 5 可知:距离钢护筒顶 2 m 处的应变分布很不均匀,究其原因,顶部筒壁较薄且受力集中,产生薄壁效应,导致其存在受压时的应力集中问题,使荷载加载点附近压应变最大,距离荷载最远的弦式应

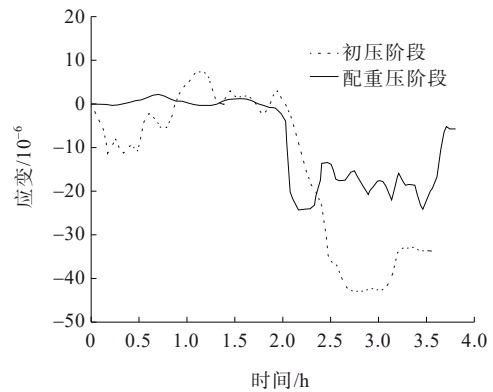


图 4 钢护筒顶部应变

Figure 4 Strain at top of steel casing

变计位置应变最小。应变的不均匀分布也表明理论计算低估了局部应力集中的影响,因此,应根据试验结果优化荷载的加载方式和分布,以减少局部应力集中对整体结构的影响。

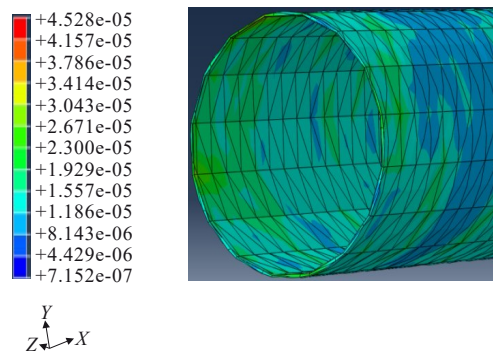


图 5 距离钢护筒顶 2 m 处的应变计算结果

Figure 5 Calculation results of strain at 2 m from top of steel casing

3.2 底部轴力

如表 4 及图 6 所示,初压阶段钢护筒底部的应变曲线基本分为两个阶段:第一个下降段为 0~1 h,钢护筒在自身重力及桩帽作用下自由下降,此时钢护筒的平均应变速率为 $40 \times 10^{-6}/h$;第二个下降段为

2~2.5 h,与顶部加压时间段吻合,此时钢护筒在桩锤压力下发生变形,平均应变速率为 $56\times 10^{-6}/\text{h}$ 。

表4 钢护筒底部轴力及应变数据

Table 4 Data of axial force and strain at bottom of steel casing

阶段	时间	应变/ 10^{-6}	应变差/ 10^{-6}	轴力/kN
初压阶段	16:21	-40.7	-1.0	-3 659.75
	16:41	-41.7		
	16:56	-68.2		
	17:06	-66.7		
配重压阶段	16:06	-5.1	-7.1	-530.20
	16:16	-12.2		
	17:36	9.6	-16.3	-1 131.94
	17:51	-6.7		

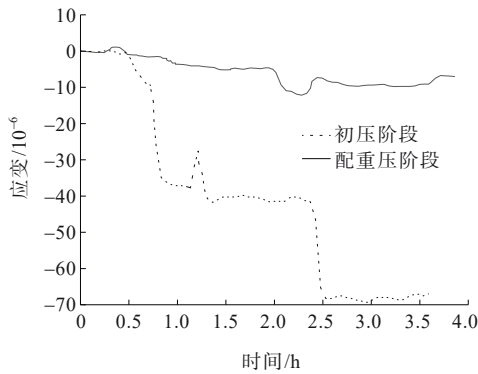


图6 初压阶段钢护筒底部应变

Figure 6 Strain at bottom of steel casing in initial pressing stage

如表4及图6所示,配重压阶段的应变曲线基本分为3个阶段:①0~2 h,配重压力逐步施加,应变缓慢下降,此时平均应变速率为 $2.5\times 10^{-6}/\text{h}$;②2~2.25 h,应变出现急剧下降,此时平均应变速率为 $28\times 10^{-6}/\text{h}$;③卸载之后,钢护筒发生变形回弹,最终达到稳定状态。

综上,初压阶段钢护筒的整体变形较大,轴向承载力主要由侧摩阻力、桩端阻力组成,引起钢护筒变形的主要因素是桩端阻力:桩端阻力增大,变形增大;桩端阻力减小,变形减小。桩端阻力随着桩顶荷载的增加而逐渐增大。起初荷载较小时,钢护筒底部受土体的侧摩阻力影响较大,侧摩阻力随深度的增大而增大,钢护筒底部阻力较小,因此应变增长较为缓慢;当荷载逐渐增大时,土体对钢护筒的影响达到稳定状态,侧摩阻力充分发挥,桩顶荷载主要通过端阻力传递到土体中,钢护筒底部阻力逐步增大,应

变速率随之加快。

3.3 水中段轴力

分布式光纤每米均提供一个应变值,选取压桩后发生最大应变的2个时刻,其应变沿桩身分布情况如图7、图8所示。

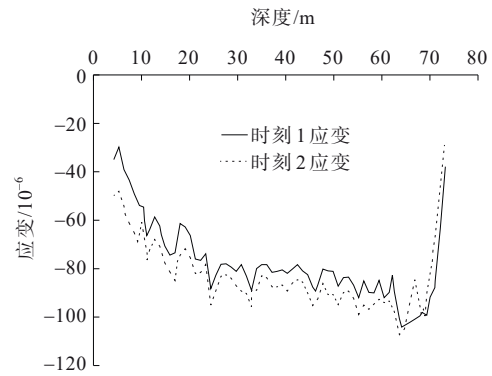


图7 A面应变随深度变化曲线

Figure 7 Variation curves of strain with depth on A-surface

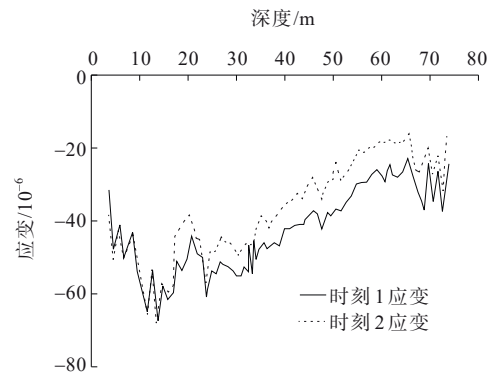


图8 B面应变随深度变化曲线

Figure 8 Variation curves of strain with depth on B-surface

由图7、图8可知:水面以上和水中段钢护筒的应变分布并不均匀,表现在两方面:①同一高程处A面、B面应变不相等;②不同高程处应变不相等。A面从钢护筒顶到25 m左右逐渐增大,25~69 m段基本不变,69 m到桩底段逐渐变小。B面应变变化相对复杂。同一高程处A面、B面应变不相等,可能是由于钢护筒顶部荷载不对称;桩顶到25 m左右逐渐增大,说明钢护筒顶部受力不均匀,正如理论分析的应力集中问题,钢护筒存在薄壁效应,直接压重的位置受力大,安装光纤带的位置离压重的位置最远,因此受力相对较小。25 m后薄壁效应消失,25~69 m段基本不变,69 m到桩底段受侧摩阻力影响,应变逐渐变小。

3.4 侧摩阻力

侧摩阻力沿桩身分布如图9所示。

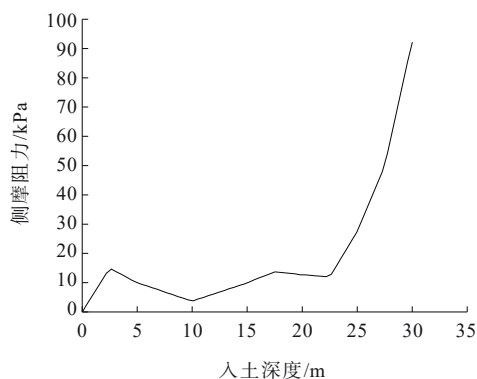


图9 侧摩阻力沿深度分布图

Figure 9 Distribution of side friction resistance along depth

由图9可知:侧摩阻力沿着筒身的分布较为复杂。0~3 m的土层主要为碎石,该土层土质均匀,侧摩阻力随着深度的增大而增大。随后,钢护筒穿越黏土层及粗砂层,侧摩阻力先减小后增大,由此可见土体性质是影响钢护筒侧摩阻力的重要因素。之后17~22 m钢护筒穿越黏土层,但是侧摩阻力的变化幅度较之前的黏土层减小,表明随着深度增大,入土深度对侧摩阻力的影响减弱,土体性质对侧摩阻力的影响较为显著。在同一深度条件下,黏土、粗砂、碎石及花岗斑岩对钢护筒侧摩阻力的影响越来越大。

4 结论

(1) 初压阶段钢护筒整体变形较大,两个阶段的平均应变速率分别为 $40 \times 10^{-6}/h$ 、 $56 \times 10^{-6}/h$ 。配重压阶段平均应变速率由 $2.5 \times 10^{-6}/h$ 增加到 $28 \times 10^{-6}/h$,变化明显。引起钢护筒变形的主要因素是桩端阻力,端阻力的大小取决于桩顶荷载及侧摩阻力的发展程度。较小的桩顶荷载主要以侧摩阻力的形式传递,此时端阻力较小;当荷载逐渐增大,土体对钢护筒的影响达到稳定状态,侧摩阻力充分发挥,此时桩顶荷载主要转化为端阻力作用于土体。因此,深海钢护筒设计应综合考虑桩顶荷载,优化端阻力和侧摩阻力的共同作用,从而提高钢护筒的整体承载能力。

(2) 水面以上和水中段钢护筒的应变分布并不均匀。受薄壁效应影响,钢护筒上部应变逐渐增大;中部薄壁效应消失,应变保持不变;下部受侧摩阻力影响,应变逐渐减小。A面应变从钢护筒顶到25 m左右逐渐增大,25~69 m段基本不变,69 m到桩底段逐渐减小。因此,在设计和施工中需考虑护筒的应

变随深度变化的分布特性,尤其在深海复杂地质条件下,需优化结构设计以避免应力集中。

(3) 钢护筒侧摩阻力的大小与土体参数、钢护筒入土深度有关。初期侧摩阻力受入土深度的影响较大,达到一定深度后,土体参数发挥主要作用。黏土、粗砂、碎石及花岗斑岩对钢护筒侧摩阻力的影响逐渐增大。说明在深海环境施工时应根据实际土层性质选择合理的施工方式,研究结论可为不同地质条件下护筒施工提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 张学鑫,牛富强,薛睿超.跨海桥梁工程水下冲击打桩噪声特性分析及控制措施探讨[J].海洋开发与管理,2024,41(5):138-145.
ZHANG Xuexin, NIU Fuqiang, XUE Ruichao. Analysis on noise characteristics of underwater impact piling in cross-sea bridge projects and discussion on control measures[J]. Ocean Development and Management, 2024, 41(5): 138-145.
- [2] 孙永江.近场地震作用下大跨高墩连续刚构桥易损性分析[J].中外公路,2024,44(1):161-165.
SUN Yongjiang. Fragility analysis of continuous rigid frame bridge with high piers and long span subjected to near-field earthquakes[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 161-165.
- [3] 彭建新,柴莹,张建仁.桥梁结构服役状态可靠度评估综述[J].中外公路,2023,43(4):1-7.
PENG Jianxin, CHAI Ying, ZHANG Jianren. Summarization of reliability theory for condition assessment of bridge structures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 1-7.
- [4] 朱文功.大直径管桩-钢管复合桩基承载特性现场试验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(1):96-103.
ZHU Wengong. Field test of bearing properties of large diameter tubular pile-steel pipe composite pile foundation [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2021, 40(1): 96-103.
- [5] 胡兴昊,王幸,娄学谦,等.海上复杂地质条件下大直径钢管桩时效性试验研究[J].海洋工程,2019,37(1):93-100.
HU Xinghao, WANG Xing, LOU Xueqian, et al. Experimental study on time effect of large diameter steel pipe piles under complex geological conditions at sea[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(1): 93-100.
- [6] FANG Q, WANG J, WANG G, et al. Intelligent back analysis using clonal selection algorithm in calculating equivalent top loading curve using O-cell test data[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(10): 3481-3498.

- [7] YETER B, GARBATOV Y, SOARES C G. Review on artificial intelligence-aided life extension assessment of offshore wind support structures[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2022, 21(4): 26-54.
- [8] 张智梅, 黄海涛, 张继红. 锤击法和振动法沉桩对周边环境影响的研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(4): 1129-1136.
ZHANG Zhimei, HUANG Haitao, ZHANG Jihong. An investigation of surrounding impacts caused by hammering and vibration pile-driving[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(4): 1129-1136.
- [9] 李林, 李镜培, 孙德安, 等. 考虑时效性的静压桩荷载-沉降关系预测方法[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(12): 2327-2334.
LI Lin, LI Jingpei, SUN Dean, et al. Prediction method for time-dependent load-settlement relationship of a jacked pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(12): 2327-2334.
- [10] 袁立斌, 邱敏, 宋友建, 等. 珊瑚礁地层桥梁基础钢管打入桩承载特性[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(32): 13355-13361.
YUAN Libin, QIU Min, SONG Youjian, et al. Bearing characteristics of steel pipe driven pile for bridge foundation in coral reef[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(32): 13355-13361.
- [11] 崔允亮, 王新, 周联英, 等. 基于光纤监测的大直径变截面钢管复合桩承载性状[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(6): 1627-1636.
CUI Yunliang, WANG Xin, ZHOU Lianying, et al. Bearing behavior of large-diameter variable cross-section steel composite pile based on optical fiber monitoring[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(6): 1627-1636.
- [12] 冯忠居, 王富春, 张其浪, 等. 钢管混凝土复合桩竖向承载特性离心模型试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(2): 42-49.
FENG Zhongju, WANG Fuchun, ZHANG Qilang, et al. Centrifuge model tests of vertical bearing characteristics of steel pipe concrete composite pile[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2018, 38(2): 42-49.
- [13] 冯忠居, 胡海波, 贾明晖, 等. 钢管埋深对钢管混凝土复合桩竖向承载特性的影响[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(增刊2): 110-116.
FENG Zhongju, HU Haibo, JIA Minghui, et al. Influence of pipe bury depth on vertical bearing characteristics of concrete filled steel tubular composite pile[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(sup 2): 110-116.
- [14] 王耀琴, 马建林, 石聪, 等. 剪力环间距对钢管复合桩工作性能的影响研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(增刊2): 180-184.
WANG Yaoqin, MA Jianlin, SHI Cong, et al. Influence of shear force ring focused on working performance of steel composite pile[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(sup 2): 180-184.
- [15] 吴荣辉, 叶锦峰, 骆光杰, 等. 江苏海岸辐射沙洲地层中大直径钢管桩基础承载性能试验研究[J]. *海洋工程*, 2021, 39(1): 121-132.
WU Ronghui, YE Jinfeng, LUO Guangjie, et al. Experimental study on the bearing characteristics of steel pipe pile in radial sandbar of Jiangsu Province[J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(1): 121-132.
- [16] 邵红杰, 刘润, 林敏博, 等. 海上打桩过程中桩周土体强度弱化的数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊1): 354-359.
SHAO Hongjie, LIU Run, LIN Minbo, et al. Numerical simulation method for soil strength reduction during pile driving in offshore engineering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(sup 1): 354-359.
- [17] 熊根, 张俊臣, 金超, 等. 基于现场试桩的海上大直径桩侧摩阻力研究[J]. *海洋工程*, 2019, 37(2): 120-126.
XIONG Gen, ZHANG Junchen, JIN Chao, et al. Study on the shaft friction of offshore large diameter pile based on field pile test[J]. *The Ocean Engineering*, 2019, 37(2): 120-126.
- [18] 李媛媛, 俞瑾, 曹平周. 超大直径钻孔灌注桩成桩过程的钢护筒受力分析[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(1): 54-58.
LI Yuanyuan, YU Jin, CAO Pingzhou. Mechanical analysis of steel casing pipes of large diameter cast-in-situ bored pile's pile-forming process[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2018, 40(1): 54-58.
- [19] AKSOY H S, TAHER N R, OZPOLAT A, et al. An experimental study on estimation of the lateral earth pressure coefficient (K) from shaft friction resistance of model piles under axial load[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(16): 9355.
- [20] 宋松科, 何佳勇, 陈潜, 等. 大跨窄梁悬索桥结构体系对静动力刚度的影响研究[J]. *中外公路*, 2023, 43(4): 80-86.
SONG Songke, HE Jiayong, CHEN Qian, et al. Research on effect of structural system on static and dynamic stiffness of large-span and narrow suspension bridges[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(4): 80-86.
- [21] 张海顺, 陈宁贤, 唐友刚, 等. 海上超长大直径永久钢护筒合理壁厚计算[J]. *铁道工程学报*, 2022, 39(7): 61-67.
ZHANG Haishun, CHEN Ningxian, TANG Yougang, et al. Reasonable wall thickness calculation of offshore super-long and large diameter permanent steel casing[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2022, 39(7): 61-67.
- [22] 于德恩, 韩善剑, 孙平宽. 强震区大跨径混凝土梁桥合理抗震体系研究[J]. *中外公路*, 2023, 43(3): 102-108.
YU Deen, HAN Shanjian, SUN Pingkuan. Study on reasonable seismic system of long-span concrete beam bridge in strong earthquake areas[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(3): 102-108.