

· 施 工 ·



基于国产十二锤联动大直径钢圆筒振沉 施工技术研究*

刘翰波, 傅乐平, 倪浩然, 张文渊

(中交三航局第二工程有限公司, 上海 200122)

摘要: 大直径钢圆筒多锤联动振沉工艺因其速度快、工期短、经济效益高等特点, 在国内外应用较为广泛。目前, 国内大多工程采用美国八锤联动系统, 至今未有国产十二锤联动液压振动锤组应用于直径超过 20 m、筒高超过 50 m 的钢圆筒振沉的工程案例。以宁波舟山港某工程为对象, 针对大直径钢圆筒夹持、拆封、起吊、定位、下沉及纠偏等重难点环节, 进行振沉关键技术研究。采用振沉分析和设备比选分析, 创新性地提出基于国产十二锤联动大直径钢圆筒的振沉方案, 形成一套完整的施工工法; 建立定位及纠偏技术流程以及参数控制措施。结果表明, 钢圆筒振沉的各项指标均满足设计要求; 该工程为国产振锤设备的应用起到了高质量示范作用。

关键词: 大直径钢圆筒; 斜坡堤; 钢圆筒振沉; 十二锤联动

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0228-08

Domestic twelve-hammer synchronization-based construction technique of vibratory sinking of large-diameter steel cylinders

LIU Hanbo, FU Leping, NI Haoran, ZHANG Wenyuan

(No. 2 Engineering Co., Ltd. of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: The multi-hammer synchronized vibro-driving technique for large-diameter steel cylinders has been widely employed at home and abroad due to its high speed, short construction period, and cost-effectiveness. Currently, most domestic projects utilize the American eight-hammer synchronized system, without recorded engineering cases of domestically produced twelve-hammer synchronized hydraulic vibro-hammer groups being applied to steel cylinders exceeding 20 m in diameter and 50 m in height. This paper focuses on a project at Ningbo-Zhoushan Port, conducting key technical research on vibro-driving for large-diameter steel cylinders, addressing critical challenges such as clamping, unwrapping, hoisting, positioning, sinking, and rectification. Through vibro-driving analysis and equipment comparison, this paper proposes an innovative vibro-driving large-diameter steel cylinder solution based on a domestic twelve-hammer synchronized system, resulting in a comprehensive construction methodology. Additionally, this paper builds a positioning and rectification technical workflow, along with parameter control measures. The results show that all the indicators of the steel cylinder vibration sinking meet the design requirements. This project serves as a high-quality demonstration for the application of domestically manufactured vibro-hammer equipment.

Keywords: large-diameter steel cylinder; slope breakwater; vibratory sinking of steel cylinder; twelve-hammer synchronization

大直径圆筒作为建造港口工程的新型结构构件, 其工程应用始于 20 世纪 40 年代的法国勒阿弗

尔港码头工程, 该码头由直径 9 m、高 16~21 m、壁厚为 0.82 m 的大直径薄壳圆筒建成, 埋深为

收稿日期: 2025-07-02 录用日期: 2025-07-11

*基金项目: 中交三航局 A 类课题项目(2023-05)

作者简介: 刘翰波(1979—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程技术管理。

6~10 m。随后, 该技术被苏联、西班牙、英国、丹麦、加拿大及日本等国相继采用, 广泛应用于码头与防波堤建设^[1]。我国自 20 世纪 80 年代陆续开展大直径圆筒结构的试验研究与工程实践, 重点针对插入式大圆筒岸壁结构的工作机理、设计理论创新以及施工工艺优化, 通过数值模拟、模型试验等方式对其进行专题研究, 并取得了突破性进展。在部分项目的施工期间, 钢板桩结构在恶劣天气条件下曾出现变形和位移现象, 甚至发生过钢筋混凝土圆筒失稳破坏的案例, 这在一定程度上制约了插入式圆筒结构的推广应用^[2-4]。随着液压振动锤同步技术及大型钢结构制造技术的进步, 中国交通建设股份有限公司针对大直径钢圆筒整体结构开展技术创新与工程应用研究^[5-7]。1989 年天津港东突堤南侧东护岸首次采用压沉法将我国第 1 个直径 12 m、高 17.1 m、壁厚 0.28 m 的插入式钢筋混凝土圆筒压沉至泥面以下 10 m 的设计高程。1995 年, 采用同样的方法将广州番禺南沙联合码头的直径 15 m、高 25~26 m、壁厚 0.28 m 的钢筋混凝土圆筒, 压沉至泥面以下 20 m 设计高程。然而, 压沉法不能在下沉过程中对高程、偏位和倾斜做到精准控制。基于对插入式大直径圆筒压沉法施工工艺经验的总结, 2002 年长江口深水航道治理工程大圆筒结构试验段工程中, 采用 4 台美国 APE-400 型液压振动锤将直径 12 m、筒高 22.2 m、壁厚 0.21~0.25 m 的钢筋混凝土圆筒振沉至设计高程, 成为我国真正意义上大直径圆筒振沉施工的典型案列。2011 年, 港珠澳大桥创新性地采用大直径钢圆筒加弧形钢板副格构成的整体式钢圆筒围护结构, 具有更优的整体性、防水性和力学性能^[8]。该工程采用美国 APE-600 型八联振动锤组成功沉设了 120 个直径 22 m、平均高度 45 m 的整体钢圆筒。这个成功经验不仅推动了多锤系统在德国 Riffgat 风电场、丹麦 Anholt 风电场及中国深中通道等项目的应用^[9], 更凸显了大尺度钢圆筒在近海工程中的发展潜力。

综上所述, 大直径钢圆筒多锤联动振沉工艺

因其速度快、工期短、经济效益高的特点, 在国内外应用较为广泛。目前, 国内大多工程采用美国八锤联动系统, 至今未有国产十二锤联动液压振动锤组应用于直径超过 20 m、筒高超过 50 m 的钢圆筒振沉的工程案列。本文以宁波舟山港某工程为研究对象, 系统开展大直径钢圆筒振沉关键技术研究。通过振沉分析和设备比选分析, 创新性地提出基于国产十二锤联动大直径钢圆筒的振沉技术方案, 并形成一套完整的施工工法。

1 工程概况

1.1 工程结构

宁波舟山港某工程围堤全长 2 990 m, 围堤形式为大直径钢圆筒斜坡堤。堤内形成的陆域用于水工工程建设。根据围堤所在位置分为东堤、西堤和北堤。钢圆筒沿围堤轴线布置, 钢圆筒直径 22 m, 筒结构全高 43~62 m, 筒标准间距 2.0 m, 工程共有 124 个钢圆筒, 编号 T1~T124。我国沿海分布着大范围的淤泥质海岸带, 这类地质具有软土层厚度大、土体强度低、地基承载力差等显著特征。在开展港口工程建设时, 通常需要预先对这类软弱地基进行加固处理, 以满足工程建设的承载要求^[10]。本文工程钢圆筒底部 10 m 以上范围的地基采用碎石桩加固处理, 碎石桩直径 1 m、间距 1.95 m、置换率为 20%。斜坡堤断面见图 1, 钢圆筒布置见图 2。

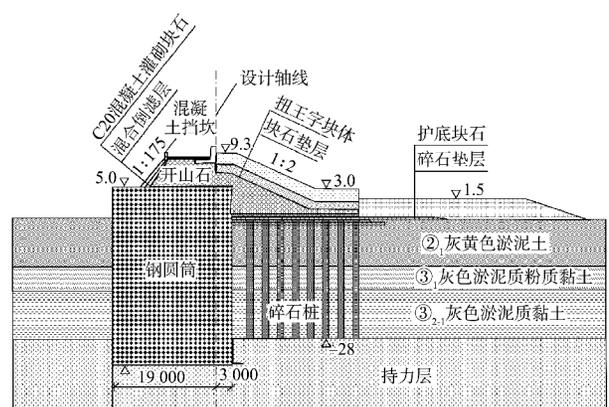


图 1 斜坡堤断面(尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 1 Cross section of sloping breakwater (dimension: mm; elevation: m)

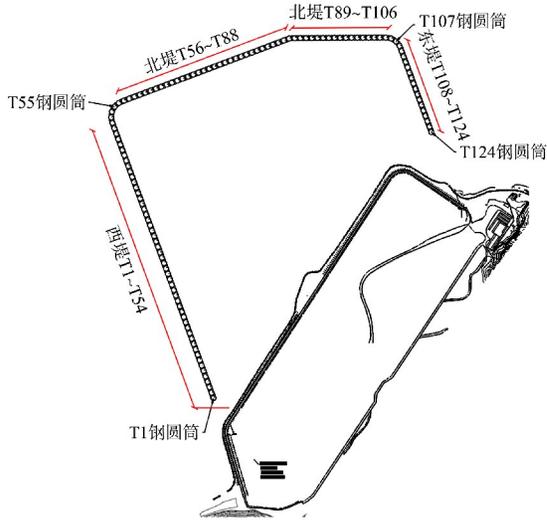


图 2 钢圆筒布置

Fig. 2 Steel cylinder layout

1.2 钢圆筒结构

本文工程钢圆筒直径 22 m，筒壁厚度 16 mm（筒顶部 1.0 m、筒底 0.5 m 范围内，壁厚 25 mm），筒顶高程 5.0 m，筒底高程为 -57.0 ~ -38.0 m，筒质量 513 ~ 726 t。圆筒中心标准间距 24m，筒间最小净距 2 m，圆筒间副格采用弧形钢板通过宽榫槽连接，副格弧形钢板高度 30 m。钢圆筒结构见图 3。

1.3 工程地质

根据围堤现场勘探和室内试验结果，工程区土层主要为砂和黏土，自上而下交替分布。围堤典型地层划分见表 1。

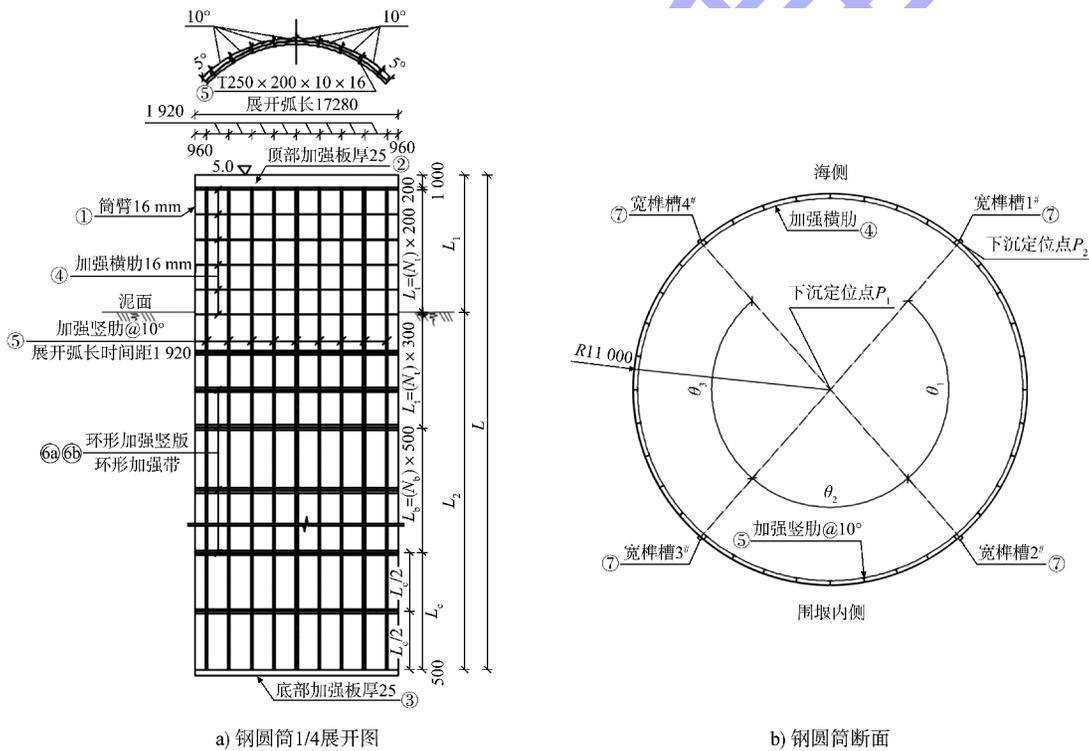


图 3 钢圆筒结构(单位: mm)

Fig. 3 Structure of steel cylinder (unit: mm)

表 1 地层划分

Tab. 1 Stratigraphic classification

地层编号	时代、成因	主要岩性
①	全新统海相沉积(Q ^m , Q ^{al})	流塑状① ₁ 和① ₂ 淤泥、流塑-软塑状① ₃ 淤泥质黏土
②	晚更新统晚期陆相沉积物(Q ^{al+pl})	可塑-硬塑状② ₁ 黏土,局部呈软塑状
③	晚更新统中期海陆过渡相沉积物(Q ^{m+al})	软塑-可塑状③ ₁ 淤泥质黏土、③ ₁₋₁ 黏土、③ ₂ 粉质黏土夹砂,可塑-硬塑状③ ₃ 粉质黏土和③ ₄ 黏土,夹有稍密-中密状粉砂、中砂透镜体
④	晚更新统早期河流冲积相物(Q ^{al})	可塑-硬塑状④ ₇ 粉质黏土、中密-密实状砂土,总体自上而下颗粒由细变粗(④ ₁ 细粉砂、④ ₃ 中砂及④ ₅ 粗砂砾),夹有透镜体状的密实圆砾土

2 可打性分析及设备选用

2.1 可打性分析

可打性分析旨在评估沉桩阻力、桩身应力、贯入周期以及锤击设备的适用性,以指导施工。传统的可打入性分析方法(如打桩公式)将桩视为刚体,虽能校核桩承载力和打桩系统,但既无法预测桩身响应,也无法预估贯入速率和打桩时间^[11]。更为精确的解决方案是 Smith^[12]建立的波动方程分析法,该方法将桩视为可变形介质,并考虑应力波沿桩身的传播。其一维波动传播控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: c 为应力波传播速度; u 为 t 时刻 x 位置处的质点位移; E 、 ρ 分别为桩体材料的弹性模量、密度。

式(1)的通解包含两个反向传播的波动分量,即向下传播(入射波)与向上传播(反射波)。

当桩顶在 t_1 时刻受到向下激振力 F_{down} 作用时,该应力波将在 t_1+H/c 时刻到达桩底(H 为筒高),并以反射波 F_{up} 的形式向上传播,最终于 t_2 (为 t_1+2H/c)时刻返回桩顶。此时,在桩顶测得的土体总阻力 R 、桩身受力 p 与桩体运动速度 v 之间的关系式为:

$$R_{(t_1+t_2)/2} = \frac{p(t_1) + Zv(t_1)}{2} + \frac{p(t_2) - Zv(t_2)}{2} \quad (2)$$

式中: Z 为桩身阻抗。

本文工程中使用的钢圆筒平均高度为50 m,钢材应力波速为5 188 m/s,应力波沿桩身往返传播时间(t_2-t_1)约为0.02 s。国产YZ400L型液压锤的下行激振力 F_{down} 呈正弦波形态,在压力与拉力之间交替变化。假设 F_{down} 初始为压力时,桩端

可能产生3种响应工况:桩端自由、桩端固定和桩端间接脱离(弹塑性接触)。当桩端自由时,上行反射波 F_{up} 初始呈拉力形态,其幅值和周期与 F_{down} 保持一致;当桩端固定时, F_{up} 初始表现为压力形态。此时桩顶实测总力 p (即 F_{up} 与 F_{down} 的叠加量)虽保持相同周期,但幅值较 F_{down} 显著增大。若桩体上移时桩端与土体出现脱离(不产生抗拉阻力), p 的压力分量大于拉力分量,且波形特征发生明显改变。

在实际打桩工程中,土体阻力通过桩侧与桩端共同作用,且土-桩相互作用机理复杂,需要采用数值方法求解波动方程进行可打性分析。本文工程将桩体离散为通过弹簧连接的质点集合,并通过弹簧-阻尼器模型模拟桩土相互作用。

2.2 设备选用

为保证大尺寸钢圆筒顺利振沉到位,振动锤组的选择是工程得以顺利实现的关键。本文工程采用打桩分析软件GARWEAP进行可打性,并选用一套国产12×YZ400L型液压振动锤组。国产12×YZ400L型液压振动锤采用每台振动锤的齿轮箱均有两条伸出轴,每两台相邻振动锤间通过角齿轮箱变换角度,角齿轮箱间再通过万向联轴器连接,形成一个闭环,从而达到每个振动锤的振动频率一致。经计算校核,钢圆筒振沉所需最小振幅为3.75 mm,振动体系最小振幅为4.34 mm,激振力富余系数1.4,振沉系统能力满足要求。振动锤参数为:偏心力矩24 kN·m,转速1 400 r/min,额定激振力51.60 MN,最大激振力59.76 MN,最大空载振幅37 mm,最大静拔桩力28.80 MN,总质量728 t,钢管桩夹具型号YZJ-DC160×36,每个夹具质量3.5 t。

振沉系统由吊架、振动锤、同步装置、共振梁、液压夹具和液压设备等组成,见图4。

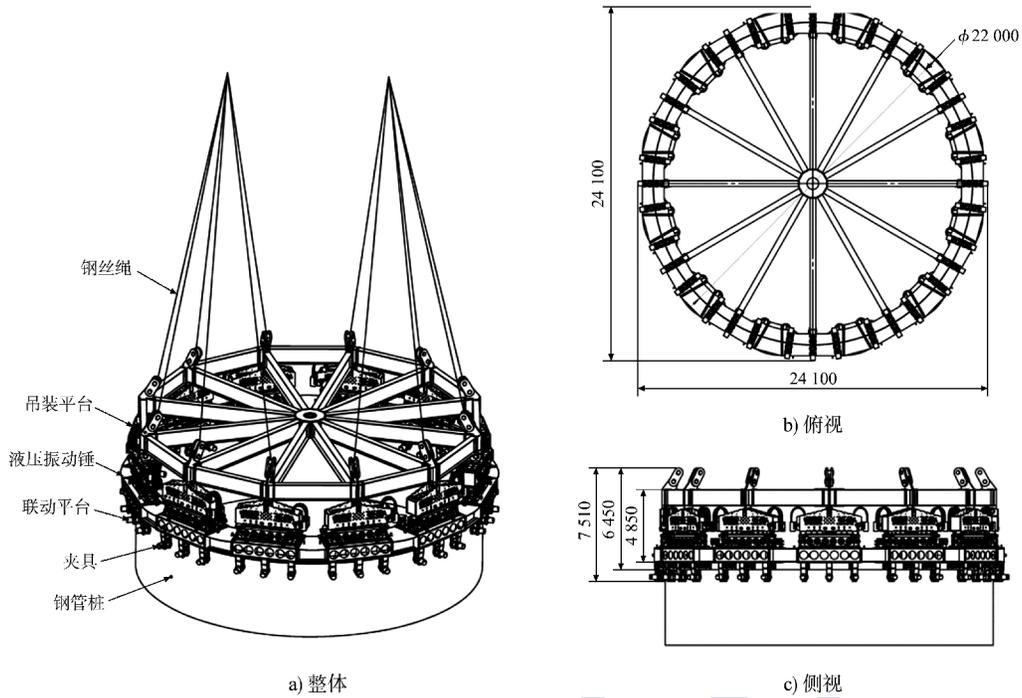


图 4 振沉系统(单位: mm)
Fig. 4 Vibratory sinking system(unit: mm)

3 振沉施工工艺

根据钢圆筒振沉特点及施工顺序, 施工前起重船起吊十二联动振动锤组就位, 钢圆筒运输船进场后靠泊老锚船, 待运输船驻位后起重船提升振动锤组并移船至运输船钢圆筒上方, 起重船通

过振动锤组起吊钢圆筒, 根据“钢圆筒振沉实时监控”进行钢圆筒施工定位, 最后钢圆筒在自身重力和十二联动锤组激振力作用下完成振沉作业, 详细工艺流程见图 5。

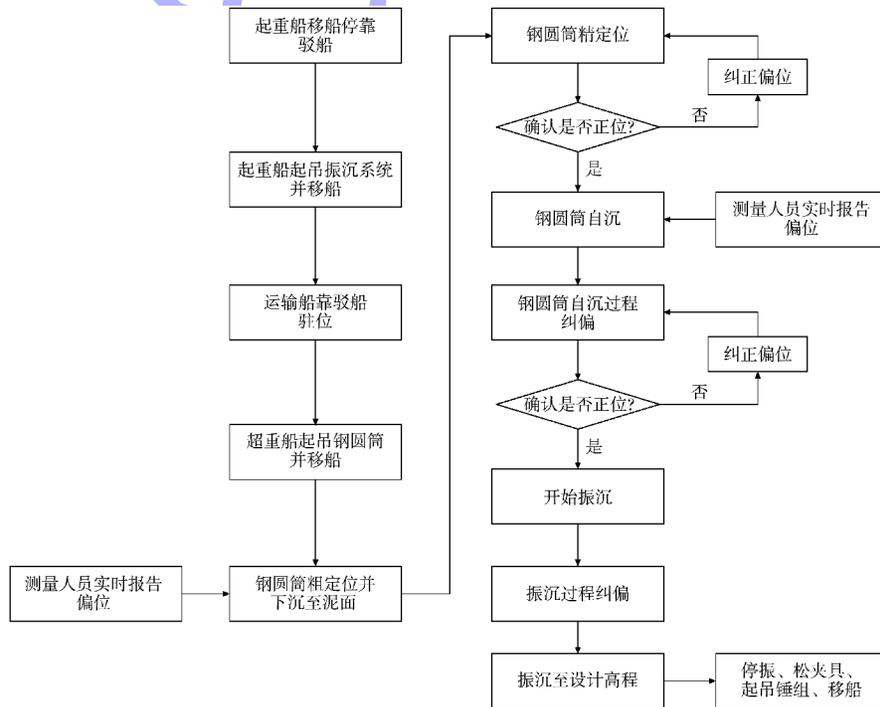


图 5 振沉施工流程
Fig. 5 Vibratory driving construction process

3.1 船舶、设备就位

3.1.1 起重船起吊振动锤组

起重船移位至锤组运输船上方,下放吊锤工装至锤组上方处,起重班组将大钩索具与吊锤工装相连,起吊锤组见图6。



图6 起重船起吊锤组

Fig. 6 Lifting of hammer group by crane vessel

3.1.2 移船取筒

钢圆筒运输船采用靠老锚船的方式进行驻位。起重船移位并确保锤组起升至合适高度,移船过程中,起重船通过自有锚缆移至运输船附近,见图7。



图7 起重船移船取筒

Fig. 7 Crane vessel positioning for cylinder

3.2 钢圆筒起吊

3.2.1 振动锤组夹持钢圆筒

起重船通过平移方式使锤组进入钢圆筒顶正上方区域,通过目视和视频监控摄像保证锤组平稳,缓慢松钩并调整振动锤组,使夹具与筒壁上定位限板贴紧。确认夹具位置准确后,启动夹具液压系统,完成钢圆筒夹持。锤组夹持钢圆筒见图8。



图8 锤组夹持钢圆筒

Fig. 8 Hammer group clamping for steel cylinder

3.2.2 钢圆筒解绑并起吊

钢圆筒夹紧后,切割拆除限位钢板及绑扎装置。钢圆筒起吊时,起重船钩头吊重逐级加载,直至缓慢起升,见图9,同时陆上全站仪观察起重船钩头钢丝绳的垂直度,避免在起吊时发生水平晃动。起吊时通过调整扒杆变幅和移船保证钢丝绳的垂直度,防止与相邻钢圆筒发生碰撞。

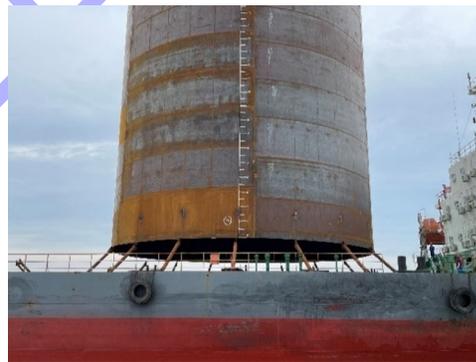


图9 钢圆筒解绑与起吊

Fig. 9 Steel cylinder unlocking and lifting

3.3 钢圆筒定位

钢圆筒振沉定位包括粗定位和精确定位。整个定位过程主要通过钢圆筒振沉实时监控系统和陆上光学测量仪器完成。

3.3.1 钢圆筒粗定位

起重船通过“钢圆筒振沉实时监控系統”绞锚移船至钢圆筒指定位置后,松放大钩使钢圆筒入水,此时根据“钢圆筒振沉实时监控系統”实时动态连续报告钢圆筒的平面位置、垂直度偏位数据以及下沉速率等,进行钢圆筒粗定位。待钢圆筒底端距离海床面以上1 m时粗定位结束。粗定位见图10。

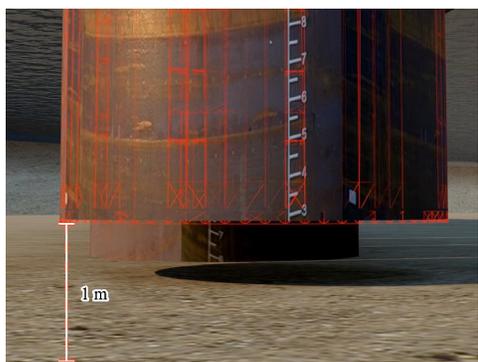
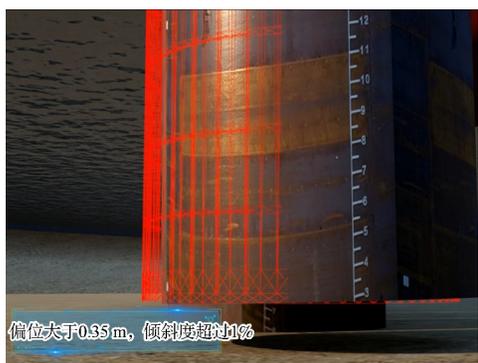


图 10 钢圆筒粗定位

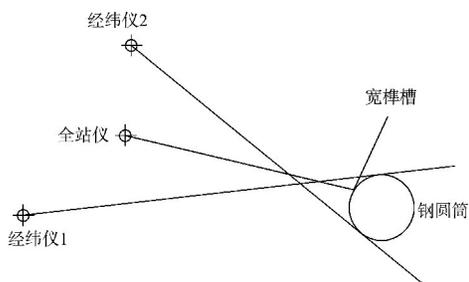
Fig. 10 Steel cylinder rough positioning operation

3.3.2 钢圆筒精定位

钢圆筒入水距海床面 1 m 处时，测量人员对钢圆筒进行精定位。钢圆筒精定位过程主要采用“钢圆筒振沉实时监控系 统”实施，同时通过陆上光学仪器进行校核，对钢圆筒的平面位置、垂直度及下沉速率等参数进行实时动态连续监测、报告。精定位见图 11。



a) 监控系统定位



b) 陆上复核

图 11 钢圆筒精定位

Fig. 11 Steel cylinder precision positioning

3.4 钢圆筒自沉

开始入泥时由于入泥深度较浅、海床上部土体较软，钢圆筒所受阻力较小，而钢圆筒自重力

较大导致钢圆筒自沉速率较快，此时将大钩下放速率控制在 1~2 m/min 范围内，并均匀下放，以保证筒体垂直度及施工安全。

钢圆筒自沉过程中会由于风、浪、流、地质等原因出现筒体偏位和倾斜，此时需要根据测量人员报告的偏位情况做出相应调整，调整需要考虑钢圆筒移动时因惯性而导致的滞后效应。若筒体出现明显倾斜变化时，应停止下沉，并调整扒杆变幅。随着自沉深度的增加，待锤组起吊绳索完全松软，钢圆筒自沉结束。

3.5 钢圆筒振沉

3.5.1 钢圆筒振沉

自沉结束后钢圆筒开始振沉。此时吊钩保持适当吊力，开始进行不松钩振沉并持续 1 min，同时观察钢圆筒位置、垂直度、下沉速率变化。无异常情况后，始终保持大钩下放速度与钢圆筒下沉速度一致，完成均匀下沉。振沉过程见图 12。



图 12 钢圆筒振沉

Fig. 12 Steel cylinder vibratory sinking

3.5.2 振沉纠偏

在振沉过程中，钢圆筒若出现微量偏位和倾斜，需要通过调整起重船上 4 个主钩的快慢、扒杆变幅实现纠偏；当偏位大于 0.35 m、倾斜度超过 1%时，采取停止大钩下降、振动上拔、松紧锚缆、升降 4 个钩头和仰俯扒杆等措施交替反复进行，直至筒体垂直度和偏位控制在允许范围内，再落钩继续振沉，最终使偏位参数满足要求，直至振沉到停锤标准。

3.5.3 振沉停锤

在钢圆筒顶部接近设计高程前，岸上测量人员对钢圆筒的高程、垂直度进行实时复核，当钢

圆筒达到设计高程后,停止锤组振动,避免钢圆筒过度振沉。

4 结语

1) 针对振动体系最小振幅、激振力富余系数、振沉系统能力等方面,本文综合考虑地质条件、工程经验以及大直径薄壁圆筒结构形式,确定了采用国产12×YZ400L型振动锤的联动振沉大直径钢圆筒方案。

2) 本文建立了大直径钢圆筒振沉的施工工艺流程,并确定了钢圆筒振沉施工的主要控制参数:平面位置、垂直度、平面扭角、振沉高程。此外,钢圆筒振沉质量的控制主要是为满足副格弧形钢板的正常振沉,在实现快速成岛的同时,为岛内施工提供良好的止水效果。

4) 针对钢圆筒下沉过程,本文建立一套完整的定位及纠偏技术流程以及参数控制措施,对相关大型钢圆筒振沉工程提供依据。

5) 本文工程为国产振锤设备的应用起到了高质量示范作用。同时,本文为国产十二锤联动大直径钢圆筒振沉工艺在更加复杂的水文地质条件下的应用提供了重要参考依据和技术支持,推动了行业发展。

参考文献:

- [1] 腾爱国,吴启和,仇正中.大直径钢圆筒多锤联动振沉设备及工艺[J].中国港湾建设,2017,37(9):85-89.
TENG A G, WU Q H, QIU Z Z. Joint pile-hammer vibration sinking equipment and construction technology of large diameter steel cylinder [J]. China harbour engineering, 2017, 37(9): 85-89.
- [2] HAN J S, CONG S P. Experimental and numerical study on bar-reinforced concrete filled steel tubular columns under axial compression [J]. The open civil engineering journal, 2011, 37(5): 109-115.
- [3] LI X Z, WEI X Y, ZHAO J H. Axial strength of concrete-filled square steel tubular columns reinforced by inner circular steel tube [J]. Advanced materials research, 2010, 163/167: 4542-4545.
- [4] HUA W, WANG H J, HASEGAWA A. Experimental study on reinforced concrete filled circular steel tubular columns [J]. Steel and composite structures, 2014, 17(4): 517-533.
- [5] 黄光虎,滕伟福,高林.基于强度折减法的粤港澳大桥沉管隧道干坞工程高边坡稳定性分析[J].安全与环境工程,2012,19(3):111-115.
HUANG G H, TENG W F, GAO L. Stability analysis of high rock slope in the dry dock project of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge immersed tube tunnel based on strength reduction method [J]. Safety and environmental engineering, 2012, 19(3): 111-115.
- [6] 李超,王胜年,王迎飞,等.粤港澳大桥全断面浇筑沉管裂缝控制技术[J].施工技术,2012,41(22):5-8,18.
LI C, WANG S N, WANG Y F, et al. Crack-control technology for full-face pouring precast immersed tube of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Construction technology, 2012, 41(22): 5-8, 18.
- [7] HU Z N, XIE Y L, WANG J. Challenges and strategies involved in designing and constructing a 6 km immersed tunnel: a case study of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Tunnelling and underground space technology, 2015, 50: 171-177.
- [8] LIU A M, LI B, CHEN J H, et al. Research and application of large diameter steel cylinder island construction technology in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge project [J]. Ships and offshore structures, 2020, 16(9): 533-541.
- [9] LU W J, LI B, HOU J F, et al. Drivability of Large diameter steel cylinders during hammer-group vibratory installation for the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Engineering, 2023, 20: 180-191.
- [10] 王雪奎,胡建军,程明.大直径钢圆筒结构稳定性离心模型试验研究[J].水运工程,2024(4):168-172.
WANG X K, HU J J, CHENG M. Centrifugal model test on stability of large diameter steel cylinder structure [J]. Port & waterway engineering, 2024 (4): 168-172.
- [11] Marine Foundation Committee. Comparison of impact versus vibratory driven piles: with a focus on soil structure interaction: 14007-01-Rev02 [R]. [S. l.]: Marine Foundation Committee, 2014.
- [12] SMITH E A L. Pile driving analysis by the wave equation [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1962, 127(1): 1145-1171.