



深水大流速大型构件水下安装设备与应用

姚 平¹, 荆 雷²

(1. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212021;

2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要:结合长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程仪征水道整治工程梯形空心构件深水大流速没顶安装的特点, 研发深水大流速安装专用吊具、配套测量架及测量定位系统, 改进传统航道整治中混合堤构件安装工艺, 提高安装精度和施工效率, 有效解决没顶安装环境下轴线偏差、错台、缝宽控制难度大的问题, 实现大型构件深水安装安全、高效、高精度的预期目标。

关键词: 大型构件; 深水安装; 安装专用吊具; 测量定位系统

中图分类号: U 615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0216-06

Underwater installation equipment and application of large components in deep water and high flow velocity

YAO Ping¹, JING Lei²

(1. The 3rd Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212021, China;

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Combining with the characteristics of the underwater installation of trapezoidal hollow members in deep water with high flow velocity in Yizheng waterway regulation project of phase II project of 12.5 m deep water channel below Nanjing in the Yangtze River, we develop the installation special spreader, supporting measuring rack and measuring positioning system, and improve the composite dike component installation technology in the traditional waterway improvement. The installation equipment can improve the installation accuracy and construction efficiency, effectively solve the problem of axis deviation, misalignment, and difficulty in seam width control in the underwater installation environment, and achieve the expected goals of installing large components in deep water with safety, efficiency and high precision.

Keywords: large component; deepwater installation; installation special spreader; measuring positioning system

构件安装是航道整治和防波堤中混合堤结构非常重要的环节。使用的大型构件在预制厂预制完成, 由船舶运输至施工现场, 采用起重船安装到抛石基床上, 以达到保护堤岸、改变河道流势的作用。一般航道整治和防波堤大型构件安装水深较浅, 低潮时构件能露出水面, 使用常规自动脱钩吊具及在构件上设置测量杆即可进行构件的准确安装^[1-2], 因此安装吊具的设计及安装精度的

控制相对简单。

长江西陵以下 12.5 m 深水航道二期工程仪征水道整治工程位于镇江市丹徒区世业洲西侧洲头, 整治建筑物由头部潜堤、头部潜堤南北侧丁坝、右缘丁坝、左汊护底带以及护岸组成, 见图 1。其中头部潜堤、SL1、SL2 及 Y2 丁坝采用“抛石基床+梯形空心构件”混合堤结构形式, 堤身下部采用 1~200 kg 抛石基床, 抛石基床整平后上部安装

梯形空心构件,见图2。梯形空心构件共319个,其顶宽2 m、底宽6 m、高6 m、壁厚0.6 m、长

4.94 m,单件质量达180 t。



图1 仪征水道整治建筑物平面布置

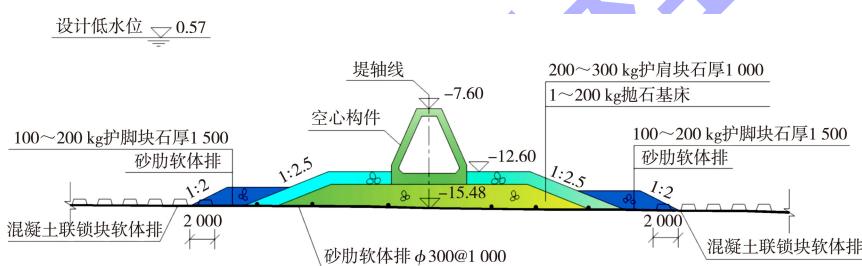


图2 空心构件混合堤堤身断面(高程:m;尺寸:mm)

本工程施工区域以单向下泄流为主,最大流速达2.5 m/s,空心构件安装最小水深6 m,最大水深达17.5 m,构件均为水下没顶安装,其中头部潜堤存在0.9%的纵坡,安装难度大。空心构件安装施工具有水深、流速大、能见度低、精度要求高等特点,常规安装吊具及测量方法无法满足安装要求,为保证施工质量及提高安装效率,迫切需要研制专用的深水吊具及测量定位系统,并制定与之对应的施工工艺以解决大型构件深水没顶安装中存在的难题。

1 专用吊具设计

1.1 吊装起重船

梯形空心构件单个质量为180 t,安装区域最大水深17.5 m,同时为减少安装过程中船舶受风浪流影响,提高船舶稳定性,保证安装精度,选用大型起重船进行安装,起重船最大起吊质量达500 t,吊臂

起升高度47 m,可满足深水构件安装的需要。

1.2 吊具的设计要求

吊具的质量决定安装作业的安全、精度和效率,由于安装强度高,若采用传统的钢丝绳起吊,每次挂扣、卸扣耗时较长且需要潜水员水下配合,工效低且不安全,因此有必要研发一套不仅安全可靠而且操作简单、工效高的深水吊具。空心构件吊具的设计主要考虑4个方面:1)空心构件吊具须满足构件安装最大水深要求;2)吊具在构件安装到位后具备水下自动开合的功能,能实现水下自动脱钩;3)吊具应具有足够的强度、刚度,在大型构件重力荷载及水流力作用下吊具不发生影响安装精度的变形;4)吊具应与测量定位系统配套,方便测量系统、液压油缸动力系统的安装和使用,满足深水测量精度的要求。

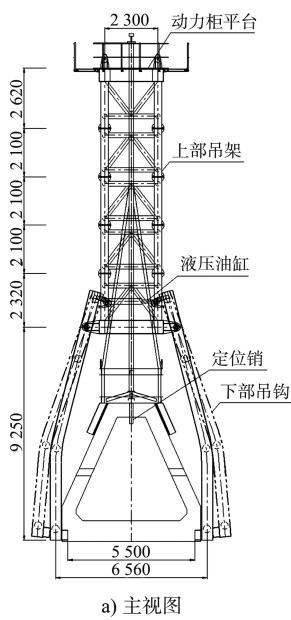
1.3 吊具结构

针对本工程施工区域的条件及梯形空心构件

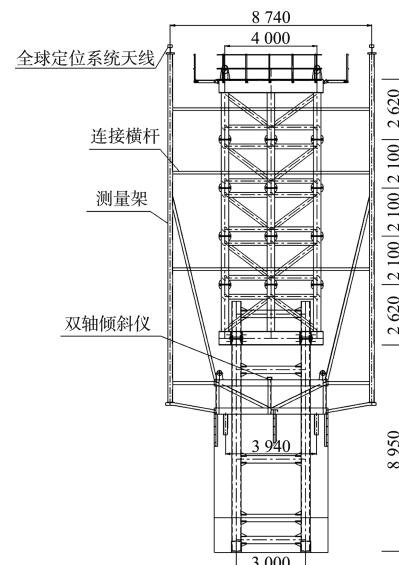
安装精度的要求,研发一套梯形空心构件深水安装专用吊具及测量定位系统。吊具总长 20.3 m,质量达 49 t,由两部分组成:上部为框架结构的吊架,吊架立柱采用 $\phi 325$ mm、壁厚 8 mm 钢管,长 11 m;下部为 4 个对称的吊钩,每个吊钩采用截面长 520 mm、宽 400 mm 的箱形结构,长 9.3 m,吊钩与上部的框架铰接连接。每 2 个吊钩为 1 组,顶部通过液压油缸相连,在起重船上通过遥控按扭控制吊钩的开合,从而完成构件挂钩和水下自动脱钩的操作。

吊具上部框架结构设置成可拆卸结构,采用每 2 m 为 1 节,通过法兰连接,以适应斜坡段不同的水深。为保证水下脱钩时吊钩两侧同步打开,吊具设置同步连杆机构,使吊钩两侧打开的角度相同,避免吊钩只向一端张开而另一端未张开,起吊时挂住构件。

为减少液压油缸与动力控制系统之间油管的长度,防止安装过程中油管被破坏影响安装,顶部框架设计了放置测量控制系统和动力控制系统的平台结构,将动力控制柜安装在吊具的顶部平台上,动力线通过船上连接到动力控制柜中,吊具在工厂分段加工后运至码头组装成整体,通过钢丝绳与起重船钩头连接,空心构件吊具结构见图 3。



a) 主视图



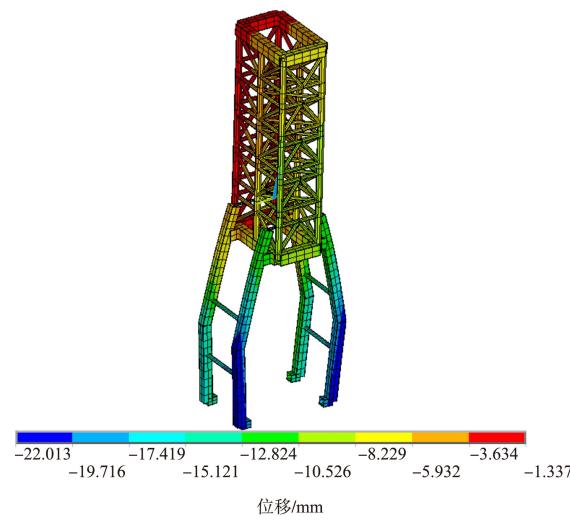
b) 侧视图

图 3 空心构件吊具 (单位: mm)

1.4 吊具受力分析

1.4.1 吊具受力计算

吊具根据自身重力、构件重力、水流力、风荷载等对吊具受力采用 ANSYS 有限元软件建模进行验算,见图 4。经验算,吊具最大竖向变形 22 mm,最大应力 167.1 MPa 出现在吊钩箱形结构与吊具下横梁连接处,最大应力小于许用应力 240 MPa,故吊具的强度及刚度均满足要求,见表 1。同时,为增加吊具在水流力作用下的抗扭能力,提高水下构件安装精度,吊钩箱形结构内均采用波形钢板进行加强。



a) 位移云图

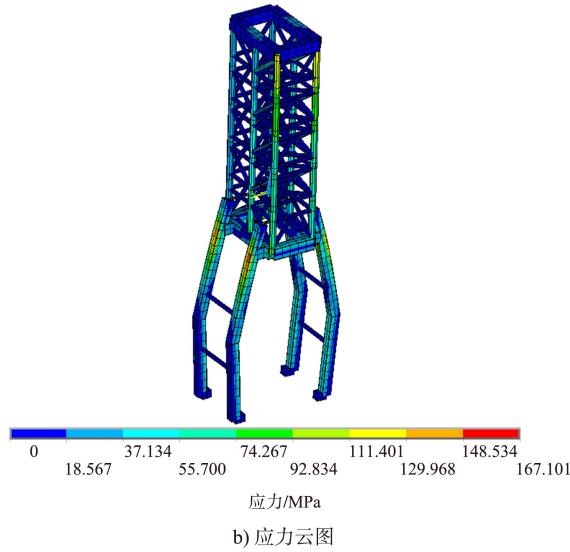


图 4 吊具位移和应力云图

表 1 吊具各部件最大应力

部件	最大应力 σ_{\max} /MPa	许用应力 [σ]/MPa
吊具桁架	151.8	240
吊具横梁	101.0	240
活动吊臂	167.1	240

注：最大应力取各最不利构件应力值。

1.4.2 吊具拉力试验

为验证吊具加工质量及受力变形情况，吊具加工后在无障碍疲劳拉力试验机上进行拉力试验，分吊钩和上部桁架两部分进行试验，分别逐级加载至额定载荷 1 800 kN 的 1.25 倍，并保证持荷时间不少于 10 min，通过拉力试验，吊具无明显变形、裂纹等现象，满足现场使用要求。

2 测量定位系统

2.1 工艺流程

空心构件水下测量定位系统由 GPS(全球定位系统)、双轴倾斜仪、电脑及相应控制软件组成, 测量定位系统工艺流程如图 5 所示。

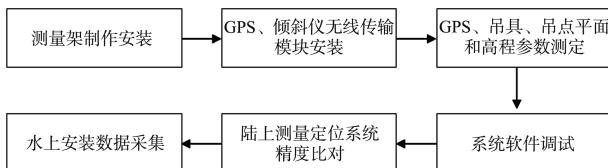


图 5 空心构件测量定位工艺流程

2.2 专用测量架设计

为了保证构件水下精确测量定位，设计专用

的测量架。测量架由一个基础底座和两侧外伸露出水面的测量杆组成，布置在吊架两组吊钩之间。测量架安放在梯形空心构件顶部，下部是与空心构件密贴的底座，测量架通过 2 根定位销插在空心构件顶部预留孔内，底座上安装 1 台水下双轴倾斜仪。两根外伸测量杆伸出水面，顶部各安装 1 台高精度 GPS 接收器。倾斜仪、GPS 接收器组成测量定位系统，连接至起重船上的控制电脑中，电脑控制软件实时显示空心构件实际位置与设计位置的偏差情况、与前一个构件实际安装位置的错台、缝宽以及构件的顶、底面四角坐标^[3]。

测量杆采用 $\phi 200$ mm 镀锌钢管制作，同时增加斜撑及连接横杆提高测量杆刚度，减小水流对测量杆的晃动引起的测量误差。

2.3 测量定位软件

空心构件测量定位软件可实时监控位置偏差(ΔX 、 ΔY 、 ΔH)和方位角偏差(ΔF)及二维倾角偏差(ΔP 、 ΔR)，同时还显示正在定位安装的空心构件和上一个已经安装的空心构件之间的间距、错牙等参数。该软件具有平面位置实时显示、精度高、简洁易操作的特点。通过测量架上的两台GPS及水下倾斜仪可以实时反映空心构件的4个角点坐标及高程，从而实现空心构件的水下精确定位。测量定位软件界面如图6所示。

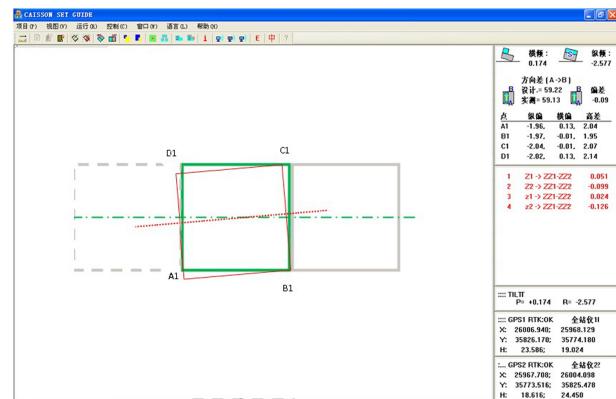


图 6 水下测量定位软件界面

2.4 测量精度分析

水下测量定位系统由 2 台天宝 GPS 和 1 台水下双轴倾斜仪组成。天宝 GPS 平面误差在 ± 2 cm 内，高程误差在 ± 3 cm 以内。倾斜仪精度在 $\pm 0.01^\circ$ 以内，

综合 GPS 及水下倾斜仪的仪器精度，代入空心构件和测量架的相对位置关系，经计算可得出测量定位系统的平面测量和高程精度在 ± 3 cm 以内。

通过用全站仪对构件测量定位软件的精度比对，测量定位软件的平面、高程数据与全站仪测量平面、高程数据的误差均小于 ± 3 cm，见表 2。

表 2 空心构件测量定位系统精度对比

点号	类型	X 坐标/m	Y 坐标/m	高程 H/m	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta H/m$
1	全站仪	3 567 739.239	432 277.725	9.981	0.024	0.007	-0.002
	软件	3 567 739.263	432 277.732	9.979			
2	全站仪	3 567 741.202	432 277.839	9.942	0.018	0.011	0.023
	软件	3 567 741.220	432 277.850	9.965			
3	全站仪	3 567 740.948	432 282.758	9.930	0.002	-0.017	0.011
	软件	3 567 740.950	432 282.741	9.941			
4	全站仪	3 567 738.578	432 282.540	9.940	-0.006	-0.018	0.014
	软件	3 567 738.572	432 282.522	9.954			

在头部潜堤首件空心构件安装过程中，根据测量定位软件的指示进行安装，构件着床稳定后趁低潮使用陆上全站仪对构件进行测量。与全站仪测量结果相比，实际安装过程中测量定位系统平面位置误差不超过 3 cm，高程误差不超过 5 cm。

通过多方验证，测量定位系统的精度能够满足本工程梯形空心构件水下安装的测控需要。

3 空心构件水下安装工艺

3.1 构件挂钩

起重船移船靠近运输船，起重船就位后，下放吊具至拟安装构件上方，由人工辅助将测量架插销插入梯形空心构件顶部预留孔内，然后调整吊具位置，吊钩对准吊点位置，遥控液压油缸控制吊钩合并，完成构件挂钩，将构件夹住吊起。

3.2 构件入水粗调

构件完成挂钩后，起吊至超过运输船船舱 1 m，通过绞锚移动起重船，根据安装软件的显示将构件大致对准拟安装位置，与前一个构件相距 1 m 左右，然后缓慢下钩至距基床面 60~70 cm。

3.3 精确定位

通过电脑上的测量定位系统绞锚移船，先将构件前后平移，使安装的构件轴线与设计轴线重合，再左右平移船体，缓慢将安装的构件靠近前一个安装好的构件。为方便水下构件精确定位，控制缝宽，在构件的侧面粘贴 5 cm 厚的木方，调节缝宽时可使构件紧贴前一个构件。

构件的姿态和位置调整完毕后，缓慢下放构件，使之平稳地放置在基床上，待构件完全着床后，观察电脑软件显示的构件轴线偏差、与前一个构件的间距以及错台等数据指标是否符合规范要求，如需要调整，则重新缓慢起钩微调直至满足要求。

3.4 脱钩

当确认构件位置正确无误后，液压油缸控制吊钩完全打开，使吊具处于不受力状态，指挥人员判断吊具的吊钩完全离开构件的吊点后，缓慢起钩，吊具提起，完成一个空心构件的安装。

4 应用效果

本专用吊具及测控系统是针对深水大流速工况条件下大型构件安装所开发的设备，采用该专用设备，仪征水道整治工程 3 个月即完成了全部 319 件梯形空心构件的安装，形成长 1 595 m 的空心构件混合堤结构，施工效率比预期大幅提高，且水下自动脱钩顺利，不需要潜水员配合，安全可靠。

在头部潜堤 196 个构件全部安装完成后，对轴线偏差、缝宽、错台等各质量指标做出统计，头部潜堤安装的全部构件数据均符合设计及规范要求^[4]，见表 3。构件安装完成后，采用水下探摸的方法对构件进行逐一检测，并使用高清摄像头对构件进行观察。通过探摸检测和水下摄像可以看出，定位软件和潜水探摸数据吻合，构件安装

的质量满足要求,通过多波束扫测空心构件混合堤水下地形,空心构件安装段线形顺直,说明水下高精度安装的设备和工艺是可行的。

表3 梯形构件水下安装检测结果

检测项目	允许偏差/mm	检测数量/件	合格率/%
轴线	150	196	100
接缝缝宽	±30	196	100
相邻块错台	80	196	100

注:轴线偏差在100 mm以内的构件比例大于95%;错台在60 mm以内构件比例大于85%。

5 结语

1)仪征水道整治工程梯形空心构件安装克服了水深、流速大、水下能见度低、安装精度要求高等多个难题,研制了深水吊具与测量定位系统,优化施工工艺,采用先进的测控和检测手段,成功实现梯形空心构件深水精确定位,高质量、高精度、高效率地完成空心构件安装任务。

2)实践证明,深水大流速大型构件安装吊具的可靠性与测控系统的精确度二者缺一不可,只

有吊具具有足够的刚度和抗变形能力,才能保证安装的精度和深水测量数据的准确。

3)通过仪征水道整治工程深水大流速安装设备的成功应用,随着航道整治越来越向深水发展,高精度深水安装设备和工艺可为类似复杂水文环境下的构件安装提供参考和借鉴,具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 周发林,李建军,程鹏,等.长江口深水航道治理工程中半圆体水上安装工艺的开发[J].水运工程,2006(S2):113-118.
- [2] 张宝昌,许文杰,付大伟.半圆体翻转与安装多功能吊具[J].中国港湾建设,2011(2):59-62.
- [3] 涂同珩,程茂林,杨秀礼,等.深水区大型构件安装水下测量定位技术[J].水运工程,2020(7):206-211.
- [4] 中交第一航务工程局有限公司.水运工程质量检验标准:JTS 257—2008[S].北京:人民交通出版社,2008.

(本文编辑 王璁)

(上接第211页)

- [7] 吴樊,闫智,孔祥平.Dynamo for Revit在基坑围护结构建模中的应用[J].土木建筑工程信息技术,2020,12(2):62-67.
- [8] 常亚杰.钻孔灌注桩水下混凝土配合比设计及施工工艺研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [9] 周惠祥,黄红喜.人工挖孔桩桩位偏差控制技术[J].建设科技,2015(1):86-87.
- [10] 杨元喜,李金龙,王爱兵,等.北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):72-81.
- [11] 郝明.北斗导航载波相位差分定位技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [12] 庄皓玥,原彬,张睿.基于北斗卫星导航系统的差分定位技术性能分析[J].现代导航,2018,9(3):172-176.

- [13] 潘冉冉,蒋浩,张洪,等.低成本实时动态载波相位差分GPS的定位精度研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2018,44(4):414-422.
- [14] 荀长龙,陈好宏,张宁峰,等.北斗(BDS)与GPS实时载波相位差分定位精度分析[J].经纬天地,2020(6):18-21,26.
- [15] 谭睿,何凤,原力智.两种大直径钻孔灌注桩成孔质量检测方法[J].资源环境与工程,2012,26(2):123-127,137.
- [16] 蓝树猛,周锡芳,李飞.接触式钻孔灌注桩成孔质量检测系统的应用[J].建筑施工,2010,32(11):1133-1135.
- [17] 王小强.基于区块链的建筑工程质量追溯系统构建研究[D].南京:南京工业大学,2019.

(本文编辑 郭雪珍)