

复杂工况下流场数据获取技术的 系统研究及应用

程志磊, 周良玉, 盛禄达
(中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 长江口南槽航道治理一期工程水流环境复杂, 流速流向成为项目实施过程中的重要研究参数, 通过系统研究流场数据获取技术, 分析了施工区域内的流场变化规律, 为施工方案制定、施工窗口控制提供依据, 保证了工程施工质量。

关键词: 长江口; 航道治理; 流速; 流向; ADCP

中图分类号: U617 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2020)07-0038-05

doi: 10.7640/zggwjs202007009

System research and application of flow field data acquisition technology under complex working conditions

CHENG Zhi-lei, ZHOU Liang-yu, SHENG Lu-da
(No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: The flow environment of the first phase of the south passage channel regulation project of the Yangtze estuary is complex, and the flow velocity and flow direction become an important research parameter in the project implementation process. Through the systematic study of the flow field data acquisition technology, the flow field change law in the construction area was analyzed, which provides the basis for the construction plan formulation and construction window control, and guarantees the project construction quality.

Key words: Yangtze estuary; channel regulation; flow velocity; flow direction; ADCP

0 引言

长江口区域水道众多, 航道资源丰富。长江口航道主要包括“一主两辅一支”航道和其他航道。“一主两辅一支”航道即主航道(“一主”)、南槽航道、北港航道(“两辅”)和北支航道(“一支”), 是长江口航道体系的主体。

长江南槽航道, 为中小型船舶及浅吃水大型船舶进出出海咽喉要道, 平均每日流量达1 000余艘次, 对上海乃至长江流域的地方经济发展至关重要, 然而, 受航道水深限制, 部分船舶必须候潮才能通行, 且航道内特别是九段沙警戒区附

近水域存在流动性浅点, 船舶搁浅险情时有发生。随着长江经济带的蓬勃发展和对外贸易日益增长, 在目前北槽深水航道几近饱和的情况下, 开展南槽航道治理, 改善南槽通航条件, 势在必行。

长江口南槽航道治理一期工程位于长江口南槽航道上段, 上游顺接长江口深水航道分流鱼嘴南线堤, 堤身沿江亚南沙南缘向下。本整治建筑物工程主要建设内容包括: 沿江亚南沙南缘向下游建设1条护滩堤, 以及护底、堤身范围的灯桩基础(不含灯桩), 总长约16 km。工程地理位置见图1。

工程主要分为3种结构, 半圆形混合堤、抛石斜坡堤和袋装砂斜坡堤。工程实施后满足5 000吨级船舶满载乘潮双向通航, 兼顾1万~2万吨级

收稿日期: 2020-04-05

作者简介: 程志磊(1974—), 男, 山东费县人, 高级工程师, 从事港口及航道工程施工管理工作。E-mail: 2960592175@qq.com



图 1 工程地理位置示意图

Fig. 1 Geographic location of the project

船舶减载乘潮通航和大型空载船舶下行乘潮通航。

本工程潜堤采用软体排护底, 堤身为抛石斜坡堤、半圆体混合堤及袋装砂芯堤结构。本公司

承建部分主要是抛石斜坡堤和半圆体混合堤结构, 其中软体排铺设约 90 万 m^2 , 抛石约 46 万 m^3 , 半圆体安装 722 个。堤身典型断面见图 2。

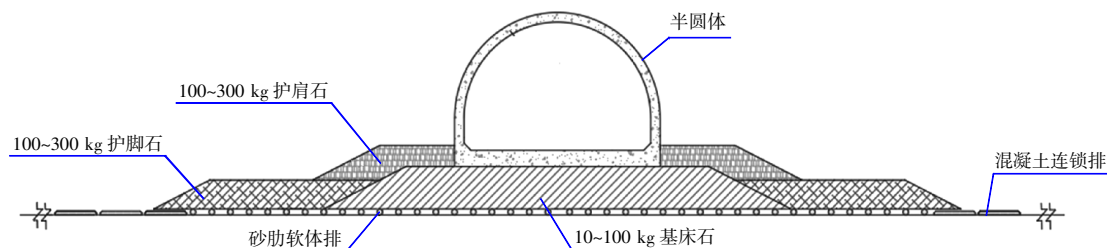


图 2 半圆体混合堤典型断面

Fig. 2 Typical section of semi-circular composite dike

工程堤身范围内最深处泥面标高-11.6 m, 余排范围内最深处泥面标高-11.3 m。工程区潮流运动主要受东海前进潮波控制, 是中等强度潮汐河口, 以落潮流为优势, 口外为正规半日潮, 口内为非正规半日浅海潮, 1 个太阴日内两涨两落, 平均潮周期为 12 h 25 min, 潮汐日不等现象明显, 平均潮差 2.73 m, 最大潮差 4.6 m。枯季最大流速为 1.14 m/s, 洪季测点最大流速为 2.36 m/s, 流速大, 平潮时间约 1 h。

鉴于工程区域内水流流速大, 涨落潮间平潮时间短, 潜堤沿九段沙湿地修建护滩堤, 泥面存在冲刷窜沟, 水流紊乱, 工程实施过程中软体排铺设、半圆体安装、基床抛石等主要分项受水流影响极大, 本研究适用于复杂工况下航道工程施工的流场数据获取、处理技术, 具有紧迫性和必

要性^[1-5]。

1 流速测量方式及设备的选择

目前常用的流速测量方式有定点测流和走航式测流, 走航式测流可快速获取某个时间该施工区域内全断面流场数据, 但是无法分析出一段时间内施工工点的连续的流场变化规律, 定点测流方式是将测流设备安装在施工工点, 连续观测, 可分析施工区域流场变化规律, 结合施工工艺进而分析分项施工的作业窗口。本工程施工测流方式选择定点测流^[6]。

工程施工过程中常用的定点测流方法有直读式海流计测流和 ADCP 流速剖面仪测流。利用 ADCP 测流是 20 世纪 80 年代发展起来的最有效的海流观测方法之一, 已广泛应用于海洋调查中^[7]。ADCP 向水体发射固定频率的声波, 然后接收水

体中泥沙颗粒等散射体的后散射信号,通过分析回波信号的多普勒频移,计算水体的流速。与传统流速仪不同,ADCP基于声纳和雷达的基本原理及数字信号处理技术,一次可测量剖面多层水流速度的三维分量和方向,能够对海流进行实时三维精细测量,具有对流层无破坏作用、测验时间短、分辨率高等特点,特别适于流速较小,存在复杂流况的海域^[8]。直读式海流计测流是将海流计放置需要测量的水层进行流速和流向测量,效率慢,需要测量人员全程操作,且在水深较深、水流紊乱区域难以操作。

在长江口南槽航道治理一期工程施工中,采用 Aquadopp Profiler(阔龙)流速流向仪,其利用声学多普勒技术测量流速剖面,使用3个夹角为25°的声波束来准确计算相关水层的剖面流速,固定安装时,内置罗盘、倾斜仪和指示流向。操作过程简单,可同时得到不同水深处流速和流向数据,并采用自容式设计,无需专人值守。本工程选择 ADCP 定点测流。

Aquadopp Profiler(阔龙)流速流向仪主要指标如下:

型号: 阔龙 600 kHz;
声学频率: 0.6 MHz;
最大剖面范围: 30~40 m;
层厚: 1~4 m;
最小盲区: 0.5 m;
流速范围: ± 10 m/s;
精度: 测量值的1%或者 ± 0.5 cm/s;
最高采样频率: 1 Hz。

2 ADCP 定点测流主要流程

定点测流前,应根据施工需要确定测流位置。Nortek 阔龙流速仪具有在线测量和自容式测量两种模式,施工中需要及时了解现场流速时可采用在线式测量模式,需要进行施工水域流程分析时可进行自容式测流模式。主要操作流程见图3。

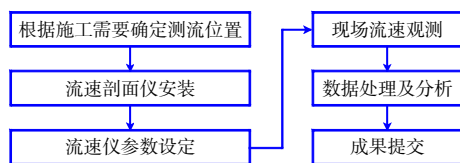


图3 定点流速测量主要流程

Fig. 3 Main flow chart of fixed point velocity measurement

3 海量流速数据提取及处理技术开发

3.1 开发数据处理工具的必要性及作用

采用 Nortek 阔龙流速流向测流设备,每10 min记录1次剖面流速数据,每次定点观测至少30 h,数据量大,并用TXT文本格式进行记录存储,不便于分析统计。需要将文本格式存储的海量数据进行提取到Excel中进行进一步统计分析,开发一种适用于施工技术人员使用的简单的数据处理工具是推广应用ADCP测流的前提。

3.2 海量流速数据处理工具的思路及实施

采用Excel VBA编辑代码进行海量TXT格式流场数据的提取、转换,形成以时间排序的流速流向表格,根据剖面流速流向数据计算公式,在Excel表格中编辑公式,计算得到剖面流速流向数据结果,然后在Excel中进行成图分析,确定铺排、抛石及半圆体安装作业窗口。

4 流场获取技术主要操作要点

4.1 流速剖面仪安装

Nortek 阔龙流速剖面仪的安装可采取座底式安装和船舷安装方式,根据长江口南槽航道治理一期工程特点,采用船舷安装进行定点流速流向测量。仪器安装采用固定支架,伸出船舷3 m,换能器入水深度0.5 m。

4.2 外业测量参数设定

采用 Aquapro 软件进行流速测量前参数设置,主要包括声速、分层厚度、分层数量、测量时间间隔等。声速采用声速仪在测流位置进行测量,并根据测量位置水深设置分层数量,分层厚度一般设为1 m。

4.3 内业数据处理及分析

ADCP 定点测量数据处理包括数据提取、表层及底层数据计算、垂线平均流速计算、成图分析等。

1) 流速数据提取

流速测量软件可直接生成文本格式或CSV格式的流速剖面数据,剖面数据文件按照仪器自身格式排列,不利于直接计算或使用,在长江口南槽航道治理一期工程测流过程中,根据导出数据的格式,利用Excel VBA进行简单数据分离,得到便于分析的数据格式。

2) 表层及底层数据计算

ADCP 流速剖面仪在测量过程中需要伸入水中,在水层表面存在一个盲区,同时,由于受到

旁瓣信号的影响,在河底有一个盲区,即存在表层和底层两个仪器盲区,表层盲区为仪器入水深度、仪器自身盲区及分层厚度之和,底层盲区可根据回波强度判断。底层和表层盲区流速数据可根据需要决定是否进行插补计算。

底层有效数据通过回波强度变化曲线进行判断,声波在水中传播,遇到水底后回波最强,基于这一特点,可利用流速剖面后处理 Storm 软件进行回波强度回放,选取突变点位置为水底,因水底层数据已受到干扰,选取上一层位置数据作为最后有效层数据。

表层、底层流速数据插补可采用幂函数进行,公式为^[6]:

$$V_{xT} = \frac{D_c(H^{b+1} - Z_2^{b+1})}{(H - Z_2)(Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (1)$$

$$V_{xB} = \frac{D_c Z_1^{b+1}}{Z_1(Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1})} \sum_{j=1}^n u_{xj} \quad (2)$$

式中: V_{xT} 、 V_{xB} 分别为表层和底层流速 x 方向分量; D_c 为分层厚度; H 为水深; b 为经验数据,取 1/6; Z_1 为河床至最后有效单位深度; Z_2 为河床至表层第 1 个有效单元的高度; u_{xj} 为各实测层 x 方向流速分量。 y 方向流速分量与 x 方向计算相同。

3) 垂线平均流速流向计算

长江口南槽航道治理一期工程施工中,用于软体排铺设、基床抛石等各工序计算基本采用垂线平均流速和流向,因此,应根据实测分层流速计算垂线平均流速和流向。垂线平均流速计算采用矢量合成法,根据各单元实测东西方向与南北方向流速分量的算术平均值计算垂线平均流速和流向,具体如下:

将测点各分层流速分解为东西方向的 V_E 及南北方向的 V_N , 并计算算术平均值 V_{Em} 和 V_{Nm} 。其中: $V_E = V \sin \alpha$, $V_N = V \cos \alpha$ 。

矢量法计算垂线的平均流速及流向,即:

$$V_m = \sqrt{V_{Em}^2 + V_{Nm}^2} \quad (3)$$

$$\alpha_m = \arctan\left(\frac{V_{Em}}{V_{Nm}}\right) \quad (4)$$

流向 α_m 根据具体的象限确定是否加 180° , 并根据施工需要进行磁方位角修正。大量数据的计算采用在 Excel 表格单元格中编辑计算公式,直接生成。

4) 数据成图分析

根据实测数据和计算的垂线平均流速数据,利用 Excel 进行成图可明显看出流速和流向变化规律,并用于施工过程中,垂线平均流速与水位关系图见图 4。

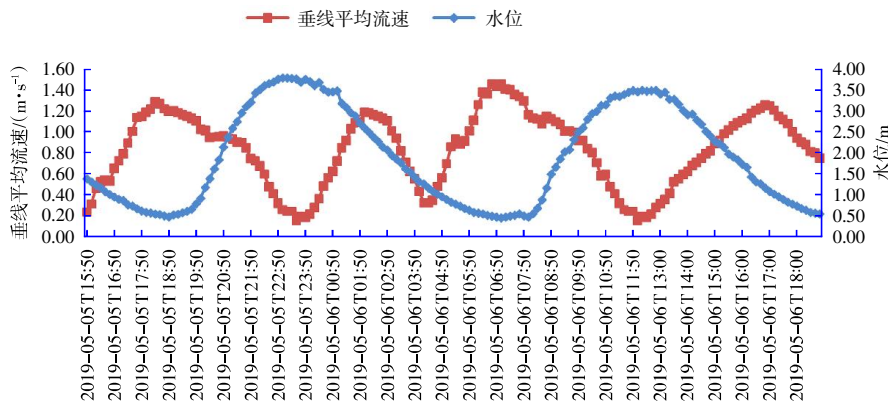


图 4 垂线平均流速与水位关系图

Fig. 4 The relation of vertical average velocity and water level

5 工程中具体应用情况及效果

5.1 测流位置分布及主要流场规律

长江口南槽航道治理一期工程本公司施工区段里程为 0+000—4+100, 自 2019 年 1 月开始至今, 沿潜堤每月组织定点测流, 分析流速变化规律, 共监测 13 次, 每次监测完成后采用流场获取

技术进行数据分析, 测流位置统计见表 1。

根据监测结果, 工程施工区域内实测流速最大 2.36 m/s, 高平潮流速最小, 低平潮流速最大, 大潮汛期间流速大, 小潮汛流速小, 施工范围平潮时间约 1 h。涨潮流向沿滩地潮西北方向, 角度为 300° , 落潮流向 100° , 流向变化迅速。

表1 测流位置分布及监测时间
Table 1 Location distribution and monitoring time of current measurement

测流里程	测流时间	平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1+460	2019-01-25	0.09~1.13	1.46
3+840	2019-02-17	0.04~1.02	2.36
3+450	2019-02-19	0.01~1.18	1.90
3+340	2019-03-01	0.02~0.62	1.01
3+720	2019-04-07	0.01~1.55	1.74
2+890	2019-04-24	0.01~0.96	1.19
0+600	2019-05-05	0.09~1.46	1.78
4+100	2019-05-21	0.04~1.55	1.71
0+400	2019-06-10	0.06~0.87	1.14
2+550	2019-06-17	0.03~1.54	1.86
1+250	2019-07-03	0.01~1.63	1.93
0+070	2019-07-21	0.08~0.86	1.23
3+160	2019-09-12	0.03~1.11	1.40

5.2 在分项工程施工中的应用及实施效果

根据监测数据,本工程流速在高水位时最小,每张排选择在高水位时下放排头,确保排头沉排位置准确,同时,由于涨落流流向基本顺原河滩,而软体排铺设垂直河滩,铺排过程中,水流对排边影响作用明显,易出现排边卷排现象导致搭接不够,因此,本工程铺排避开大潮汛期间农历15日、16日、17日。

同时,抛石施工根据流速计算漂移距离,提前布置船位,基床抛石、整平施工严格按照平潮时段进行,工程施工经监理及第三方检测单位检测,效果良好。

6 效益评估

通过复杂工况下流场数据获取技术的系统研究及数据提取工具的开发,能够实现对施工区域内流场进行持续监测、数据快速提取分析,采用Excel VBA进行数据提取、分析,操作简单,适用于航道整治施工技术人员应用。通过在长江口南槽航道治理一期工程中的应用,为本工程铺排提供排体下放时间和避流措施的依据,提供了基床抛石及整平作业时间窗口,确保了工程铺排施工的顺利实施,也保证了基床抛石整平施工质量。

7 结语

通过在长江口南槽航道治理一期工程中

对复杂工况下流场数据获取技术的研究与应用,快速获取测流点整个水层的流速流向分布规律,在施工方案的确定、施工过程的控制中均发挥了重要作用,且该方法操作简单,具有较好的推广价值。

参考文献

- [1] 寇军. 长江南京以下12.5 m深水航道治理工程仪征水道整治效果分析[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(6): 41-47.
KOU Jun. Regulation effect at Yizheng Waterway of 12.5 m deep-water channel project in the Yangtze River below Nanjing[J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(6): 41-47.
- [2] 左书华, 李蓓, 张征, 等. 长江口南汇嘴潮流滩围垦工程潮流数学模型研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(7): 1-5.
ZUO Shu-hua, LI Bei, ZHANG Zheng, et al. Tidal flow mathematical model of the reclamation project at Nanhui tidal flat of Yangtze River[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(7): 1-5.
- [3] 阮学成, 王翔, 刘滔. 长江南京以下12.5 m深水航道工程深水软体排设计施工[J]. 中国港湾建设, 2014, 34(12): 51-53, 65.
RUAN Xue-cheng, WANG Xiang, LIU Tao. Design and construction of deepwater soft mattress for 12.5 m deepwater channel project from Nanjing in the Yangtze River[J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(12): 51-53, 65.
- [4] 高敏. 长江口深水航道治理工程中现场观测方法及新技术应用[J]. 中国港湾建设, 2014, 34(7): 39-43, 76.
GAO Min. Survey method and new technology application of the Yangtze estuary deep-draft waterway regulation works[J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(7): 39-43, 76.
- [5] 冯海暴. 长江航道整治工程恶劣工况深水铺排悬链线理论研究及应用[J]. 中国港湾建设, 2014, 34(1): 22-25, 31.
FENG Hai-bao. Theoretical study and application on the arrangement of catenary in deepwater under severe operation conditions of the Yangtze River channel regulation project[J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(1): 22-25, 31.
- [6] 段文义, 张坚樑. 河口、浅海 ADCP 定点海流观测资料的比较与整理[J]. 浙江水利科技, 2006(9): 15-18.
DUAN Wen-yi, ZHANG Jian-liang. The comparison and processing of current observation data by ADCP at a given position in the estuary and shallow sea[J]. Zhejiang Hydraulics, 2006(9): 15-18.
- [7] 相文玺, 杨锦坤, 赵昕. ADCP 测量数据深度值的正确解析[J]. 海洋通报, 2012, 31(1): 94-96.
XIANG Wen-xi, YANG Jin-kun, ZHAO Xin. Identification and correction of layer depth and water depth data measured by ADCP[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(1): 94-96.
- [8] 张存勇. 海州湾湾顶浅海区 ADCP 测流中垂向流速分量分析[J]. 海洋通报, 2014(1): 62-67.
ZHANG Cun-yong. Analysis of upward velocity component of ADCP measurements in the shallow water on the top of the Haizhou Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2014(1): 62-67.