



块石深水精确抛填施工控制技术

冯海暴¹, 吴一鸣², 姜立志¹, 冯甲鑫¹, 周良玉¹, 章小旺¹

(1. 中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071; 2. 中国交通建设股份有限公司, 北京 100088)

摘要: 在分析国内外块石深水精确抛填施工技术的基础上, 开发设计了块石水下实时抛填测控系统和深水抛填装备。通过测试和断面复测, 该技术的抛石高程数据和平面位置偏差均控制在规范要求以内。该方法自动化程度高, 对工况适应性强, 可高效作业。

关键词: 深水; 块石抛填; 精确控制; 测控系统

中图分类号: U 655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0014-06

Accuracy control technology of block stone dumping in deep water

FENG Hai-bao¹, WU Yi-ming², JIANG Li-zhi¹, FENG Jia-xin¹, ZHOU Liang-yu¹, ZHANG Xiao-wang¹

(1. No.2 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao 266071, China;

2. China Communications Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the analysis of the construction technique of the domestic and foreign deep water precise stone filling, the underwater real-time measurement and control system and the deep water dropping and filling equipment are designed. By testing and retesting section, the technique of riprap elevation data and the plane position deviation are controlled within specifications, which has a high degree of automation, strong adaptability to operating conditions, high efficiency operation.

Keywords: deep water; block stone dropping and filling; precise control; measurement and control system

目前国内外对于深水块石抛填的施工控制方法研究较多, 主要有开体驳抛填工艺^[1-4]、方驳结合挖掘机抛填块石工艺^[5]、溜槽导向抛石工艺^[6]以及水下抛石漂移理论的方法^[7]等, 上述方法水下抛石的平面和高程偏差一般不小于1 m。在港珠澳大桥工程中采用了水下振动压实块石抛填的施工方法^[8], 该方法采用了“振驳28”带有抛填和振动密实双重功能的船舶对沉管基础进行处理, 结合文献[9]介绍采用网格控制高程精度可达到0.3 m。块石抛填测量控制一般采用人工潜水配合^[10]、GPS与测深仪、实时监测抛石的仪器等, 对水流流速和水深都会有一定的要求。

对于在2 m/s大流速和30 m以上的大水深工况条件下, 实现精确抛填块石的实时显示抛填效

果尚没有一种有效的方法, 对于开体驳抛填工艺、方驳结合挖掘机抛填块石工艺、溜槽导向抛石工艺以及水下抛石漂移理论的方法, 都需要根据块石的漂移距离将船舶移至上游一定距离, 通过水流的动力带动块石移动方式实现块石的抛填施工, 施工精度和效率低, 且需要根据水流的状况实时调整船舶的位置, 施工复杂。“振驳28”可实现水下精确抛填块石的施工, 但该方法对水流流速要求较高, 同时采用封闭溜管增加抛填结构的质量, 会对块石的直径有一定的限制, 施工作业高程控制时, 溜管需要频繁的上下移动, 结构对料管的摩擦会降低结构强度等。在深水大流速抛填不规则尺寸的块石施工时, 实现实时、精确抛填与检测一直都是一项难题, 本文结合该难题开展了块

收稿日期: 2016-05-09

作者简介: 冯海暴(1980—)男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道、沉管隧道等工程施工及研究。

石水下精确抛填施工控制技术的研究,并研发了抛填测控系统和检测方法作为辅助测控装备。

1 工程概况

本研究依托长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程和畅洲水道整治工程,位于江苏镇江与扬州之间的镇扬水道,工程施工现场由于抛填和畅洲水道整治工程内容包括新建 2 道长度分别为 1 817 m 和 1 919 m 的潜堤及其接岸工程,完成和畅洲水道共 10.771 km 的护岸专项工程,和畅洲工程方案布置见图 1。

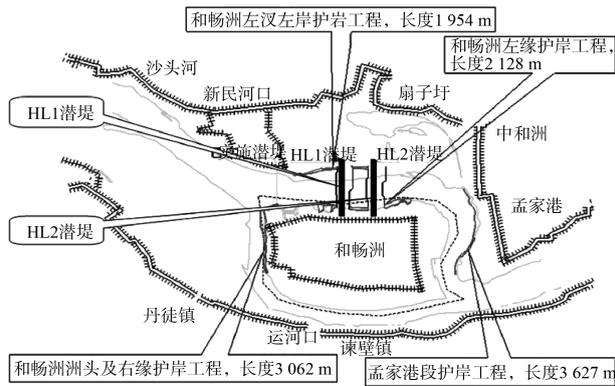


图 1 工程方案布置

工程内容包含抛石约 181 万 m^3 , 软体排铺设 157 万 m^2 , 砂肋软体排 33 万 m^2 , 以及冲灌砂被、堤心砂袋抛填等,施工区域深水、大流速工况特点明显,且含沙量较大,对工程施工测量验收有较大的影响。

1.1 水流及水深条件

1) 设计流速利用实测资料验证的模型计算,综合考虑模型研究成果与实测资料,和畅洲潜堤设计流速为 3.0 m/s。但考虑枯水期施工水域基本为单向下泄流,枯季最大流速为 1.08 m/s,洪季测点最大流速为 2.20 m/s。

2) 根据已有资料,堤身范围内最深处泥面高程-35 m,其中泥面高程低于-20 m 的抛填块石占比较大。

1.2 潮位

本河段虽属感潮河段,距河口较远,潮波变形十分显著,潮汐作用相对较弱^[11]。依据文献[12],

和畅洲水道设计高水位采用镇江水文站、南京下关水文站及附近工程设计高水位、考虑水位比降计算得到,设计低水位取设计最低通航水位,基准面为 1985 国家高程基准面,则设计高水位为 6.62 m,设计低水位为 0.33 m。

1.3 泥沙

长江水域泥沙含量大,和畅洲左汊床沙中值粒径为 0.155~0.180 mm,右汊相对稍细。根据 2010 年 2 月和畅洲水道水文测验成果,从世业洲尾至大港河段悬移质平均中值粒径为 0.006~0.009 mm,床沙平均中值粒径为 0.064~0.204 mm,对工程测控验收的视线有一定的影响。

2 块石抛填技术

2.1 总体思路

块石深水精确抛填施工控制技术采用自主研发设计建造的深水抛填装备^[13]进行块石抛填施工,利用测力系统实时检测抛填施工时的缆力情况^[14];开发块石抛填实时监测测控系统^[15],实时监测和控制块石抛填的平面位置与高程;利用多波束与侧扫声呐联合复合测施工结果。

2.2 测控系统

在水运工程施工中,传统块石抛填测控及检测方法多采用全站仪、GPS 或潜水探摸的方法进行检测,但随着技术的进步和测控方法的成熟,为了提高施工效率和节约人工成本,引进了应用了侧扫声呐扫测图像和多波束检测数据相结合作为最终的验收依据,但该方法属于事后测控验收核对,无法在工程施工中实时测控块石抛填的效果和精度。本文研究的水下块石精确抛填测控系统主要包括系统设计原理、实现的功能和系统界面等。

1) 系统设计原理。

通过声呐测控系统对水下抛石厚度高程和平面位置发射声波,待声波接触抛填块石后自动反射到接收器,测控系统通过发射和回收的时间自动计算出抛填块石的高程,然后通过溜槽上部的 GPS1 测出水下发射仪器的绝对位置,将竖向绝对高程、平面绝对位置传递至电脑进行处理记录,

实时动态显示记录抛填船的工作状态。

当溜槽固定在一定高程位置上时，通过 GPS 换算出下部高度计的端部高度，以水面高程为 0 位高程，GPS 测出读数为 $H_{读}$ ，GPS 与水面线之间的距离为 H_1 ，高度计距水面线距离为 H_2 ，高度计的读数为 H_3 ，设基床面的实时高程为 H_4 ，则基床面高程 $H_4 = H_{读} - H_1 - H_2 - H_3$ ，即为基床抛石面的高程。

同时编制相应的测控软件，当系统超过抛填高度时，会根据前期抛填的速度和移船速度计算出预计抛填的趋势形成预警，块石抛填测控系统安装及原理见图 2、3。

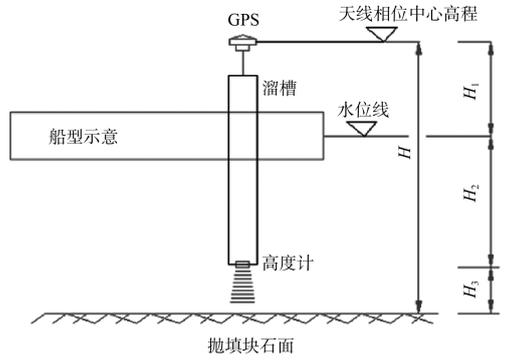


图 3 测控系统原理

2) 实现的功能。

该系统可实现对块石抛填过程中显示关键数据和坐标转换及图形处理的功能，主要显示设计位置、实际抛填位置、抛填精度偏差等数据的记录，同时为避免操作繁琐，可在超过铺设精度时主动报警。技术数据的采集主要通过水下声学块石抛填系统软件，实现块石抛填测控系统的校准和数据采集工作，可实时显示船舶和块石抛填的绝对位置及方位角。块石抛填测控系统软件的界面显示内容包括溜槽位置、平面位置、高程数据等(图 4)。

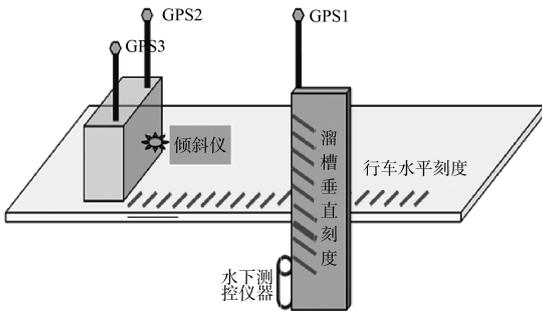


图 2 测控系统安装

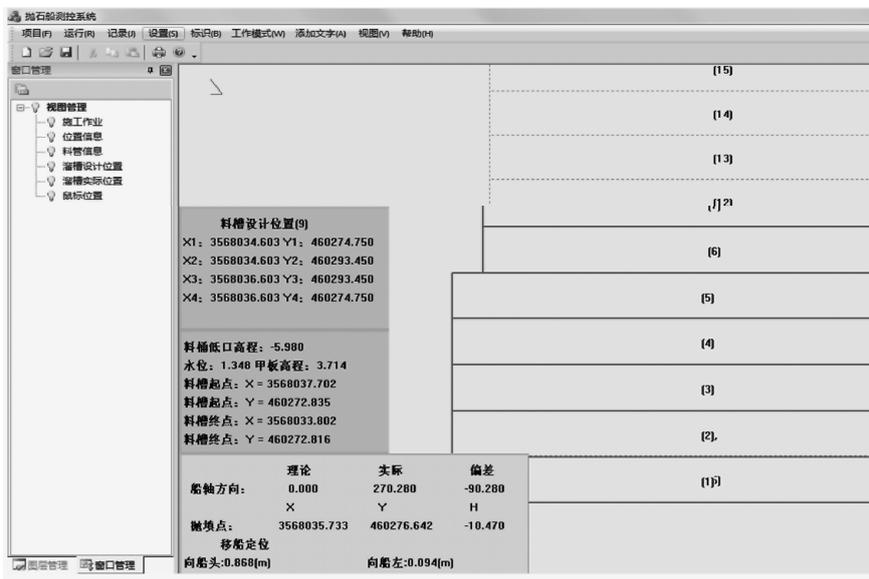


图 4 块石抛填测控系统软件界面

2.3 主要设备

1) 深水抛填设备。

采用新研制的深水抛填船，同时在该装备上配备能够实时显示抛填块石的测控系统，深水抛

填船是专为长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程设计的专用抛填块石的船舶，该船由母船和抛石结构组成，主船一侧安装抛石结构，一次移船驻位可实现延船纵轴方向移动 20 m，竖向可升降

高度为 30 m。抛填装备结构可参见文献[13], 深水抛填方案框架见图 5。

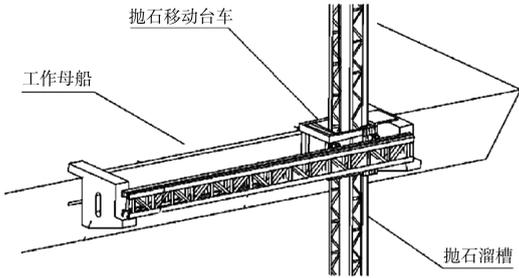


图 5 深水抛填方案框架

为了防止抛石施工时, 石料受水流影响导致石料落底位置偏离过大, 抛石施工作业采用一个深入水下的石料溜槽, 石料从上部料斗导入, 通过溜槽将石料引导下落到槽口溜槽安装在台车上, 可沿船舷方向前后直线移动, 也可上下调节溜槽口高度。

2) 系统定位系统。

系统定位设备由 GPS1、GPS2、GPS3 组成, 水

下抛石的高程和厚度由水下测量仪器测控, 船体的姿态由倾斜仪控制, 通过系统中安装的 RTK GPS、水下测量仪器等传感器, 实现对水下抛石施工的石料抛填点的实时精确三维定位与实时检测。GPS1 安装于抛填结构溜槽上部, GPS2 和 GPS3 安装于母船上, 母船定位通过 GPS2 和 GPS3 实现; GPS1 通过溜槽换算出换能器的高程和位置; 倾斜仪控制母船的姿态从而实现控制溜槽在水下的姿态控制换算修正; 水下测量仪器负责测出水下抛石的相对厚度, 再通过上述仪器转换换算出抛石的绝对厚度和平面位置, 通过数据采集与处理、图文显示等功能与方式, 精确测定石料抛填点实时位置, 从而实现抛填船测控系统的设计和目的, 指导施工作业。

3) 测控仪器。

测控系统的水下测控设备主要针对测深仪和高度计^[16-18]进行比选(表 1)。

表 1 数字单频测深仪与高度计主要工作参数对比

项目	设备构成	发射方式	精度/cm	工作水深/m	测深范围/m	工作频率/ kHz	波束角/(°)
数字单频测深仪	测深仪主机、换能器、数据线	声波	2+0.5%所测深度	≤10	0.3~100	208	≤8
高度计	主机、换能器、数据线	声波	1±0.1%所测深度	≥50	0.5~200	208	≤8

数字单频测深仪水深工作范围仅为 10 m, 该项目最大工作水深约为 50 m, 而高度计从精度上更加精确, 易于维护, 采用了高强度铝合金外壳防水一体化设计, LCD 数码、键盘设置参数操作简便, 水底自动跟踪门技术, 可适用于 50 m 以上的工作水深, 故选取高度计作为本系统设计的水下测控设备。

2.4 技术参数

系统技术数据采集主要根据项目的实际工况输入已知参数, 利用 GPS 进行船舶定位坐标导入, 利用姿态仪将数据导入软件进行修正, 高度计在姿态仪配合下, 水下高程测控精度可达到 1 cm ±0.1%所测深度, 如果按 35 m 计算则高度计精度可达到±1.035 cm; 本系统所选 GPS 高程测控精度约为±2 cm; 因此该系统理论计算测量精度为±3.035 cm; 但考虑其他因素影响, 取控制高程误差控制在±10 cm 为合格, 实际系统偏差参考理论计算测量精度值, 对工况条件适应, 可以实现实时测控及定位精度的要求。

3 块石抛填施工测试及应用效果

3.1 工程实施

1) 工程测试部位。

为了验证深水抛填船测控系统的设计和应用效果, 在长江航道二期工程施工现场开展了抛填块石定位测试试验, 结合工程的施工现场工况条件相对较差的部位, 选择在图 1 中 HL1 潜堤处进行施工应用测试, 具体测试部位为 HL10+775~HL11+725 处, 局部放大见图 6。

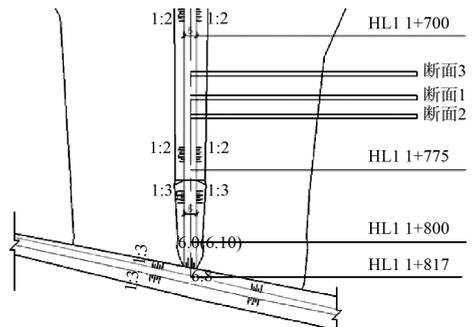


图 6 测试部位断面局部放大

2) 测试方法。

块石抛填施工测试包括抛填船就位、运料船靠泊、溜槽就位、抛填作业、扫测验收等工序。抛填船通过锚泊系统实现初步定位，然后开启GPS精确就位系统，通过缆系调整起抛填船精确就位，实现平面位置偏差不大于5 cm。

运料船采用平板驳，靠泊船舶航行速度不得大于0.3 m/s，且靠泊船舶的吨位不大于3 000吨级，靠泊后通过定位缆系绑定连接。启动系统提升或下降溜槽系统至一定的高度后，开启测控系统扫测水下原基床面的高程，并记录。

首先设定设计抛填高程后，通过送料系统向溜槽内送料，开启测控系统实时检测抛填块石厚度的变化情况，达到设计抛填高程后，停止送料作业，此时测控系统自动记录抛填块石的高程，并开启溜槽横向移动卷扬机，拉动系统延船舶纵向移动至设计行程后，通过锚系统缆移船至下一船位。

待整个船尾抛填完成后，提升抛填溜槽距离抛填面一定高度，开启扫测验收系统，进行抛填基床面的验收比对作业，并形成验收数据，完成该船位的块石抛填、验收作业。

测试过程中，GPS实时显示基床面抛填块石的高程并记录^[19-20]，该系统不受潮位的影响，并可以通过倾斜仪数据，在系统软件中实时修正抛填块石的厚度和高程，实现自动化作业。

3.2 抛填堤对比检测

系统测试过程中，整个定位系统调试运行正常，抛填船上测量控制系统与测量船上同步采集数据，共采集3个断面10个船位的数据进行对比。为测试测控系统数据的稳定性，在进行测控系统测试的同时进行多波束扫测声呐数据验收。

抛石断面完成后，采用多波束进行质量检测^[21-22]，采用了设计断面(图7)、多波束检测成型断面(图8)和施工复测断面(表2、图9)的对比检测。

表2 施工控制高程与断面复测高程数据对比

施工区域	断面	施工控制高程/m	断面复测高程/m	高程偏差/m	平面位置偏差/m	
					ΔX	ΔY
堤心	1#	-11.40	-11.38	0.02	0.02	0.10
		-10.60	-10.61	-0.01	-0.11	-0.12
		-9.90	-9.87	0.03	-0.13	-0.11
		-9.25	-9.12	0.13	0.11	-0.12
		-8.60	-8.63	-0.03	0.15	-0.14
		-8.30	-8.31	-0.01	0.12	-0.11
		-8.30	-8.25	0.05	0.10	0.02
		-8.30	-8.32	-0.02	0.05	-0.13
		-8.30	-8.34	-0.04	0.17	0.09
		-9.10	-9.15	-0.05	0.10	0.14
-9.90	-9.88	0.02	0.15	-0.05		
堤心	2#	-11.40	-11.47	-0.07	0.14	-0.14
		-10.60	-10.50	0.10	0.16	-0.21
		-9.90	-9.85	0.05	0.05	0.11
		-9.25	-9.31	-0.06	0.06	0.07
		-8.60	-8.71	-0.11	0.14	-0.14
		-8.30	-8.33	-0.03	-0.08	-0.23
		-8.30	-8.27	0.03	0.04	-0.08
		-8.30	-8.30	0	0.26	-0.15
		-8.30	-8.36	-0.06	0.27	-0.14
		-9.10	-9.12	-0.02	0.09	0.08
-9.90	-10.00	-0.10	-0.14	-0.07		
压脚	3#	-11.81	-11.84	-0.03	0.02	0.15
		-11.50	-11.42	0.08	0.01	0.13
		-11.50	-11.22	0.28	-0.10	0
		-11.50	-11.57	-0.07	0.12	0.10
		-11.50	-11.35	0.15	0.13	0.15
		-11.50	-11.69	-0.19	0.11	0.07
		-11.50	-11.37	0.13	-0.17	0.12
		-11.50	-11.46	0.04	0.06	0.14
		-11.50	-11.34	0.16	0.09	-0.12
		-11.50	-11.57	-0.07	0.11	0.14
-11.50	-11.35	0.15	0.10	-0.11		

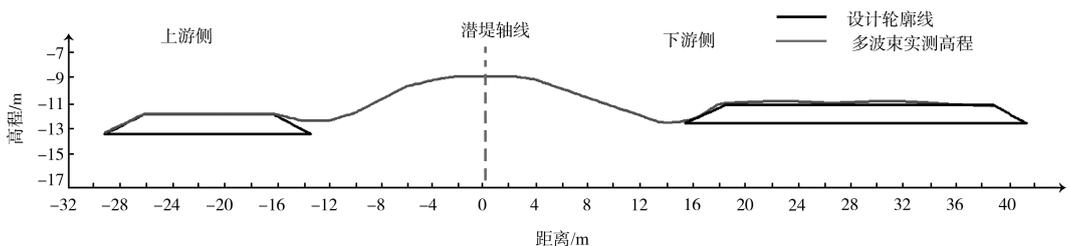


图7 堤身抛石设计断面

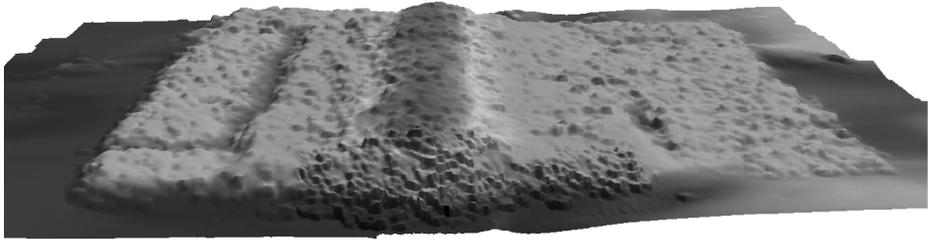


图8 多波束检测成型断面

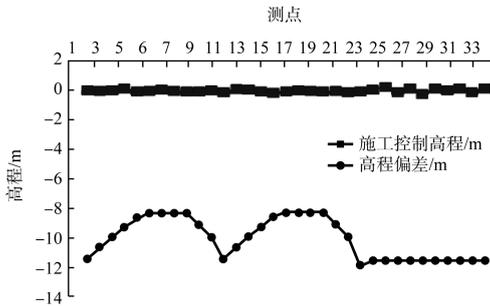


图9 施工复测断面

根据表2的测控和验收数据,采用该装备和测控系统进行块石水下抛填施工作业,与断面复测高程数据偏差值最大不超过0.19 m,平面位置偏差最大值为0.23 m,分析原因应该为工况和自然环境条件的影响,叠加了块石抛填过程中挖掘机对抛填船送料中引起的振动,使得偏差超过了仪器预测精度值,但最大偏差值仍远远小于早期传统施工方法的控制精度,同时也完全满足JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》的要求。

本文研究的块石水下精确抛填施工方法及线测控系统的数据复测验收高程结果相符合,同时在施工中测控系统和装备运行稳定,目前该装备已经成功抛填完成4.6万 m^3 块石,根据抛填面验收结果显示,该装备抛填的块石偏差不大于20 cm(允许偏差为 ± 40 cm),实现了定点、定量、高效率、高精度的块石抛填施工,施工效率、精度等技术参数都达到了预期效果,为工程施工提供全面的技术保障。

5 结论

1) 采用声呐和GPS联合控制的方式开发了块石水下精确抛填控制测控系统,通过声呐测控

方式进行块石高程控制,GPS控制抛填块石的平面位置,实现实时精确抛填施工作业。

2) 通过对比分析国内外块石抛填施工方法的基础上,开发设计建造了深水抛填装备,利用可减小水流阻力的溜槽作为抛石导向槽,实现水下块石精确抛填。

3) 通过现场施工复测,水下抛石高程控制不大于0.19 m,平面位置偏差不大于0.23 m,满足规范和施工要求。

4) 该系统具有深度大、精度高、工效高、自动化等显著优势,可为类似工程测控系统的设计及使用提供工程借鉴。

参考文献:

- [1] 周加杰,罗春艳,钟少杰,等.印尼Adipala防波堤水文特性分析及施工技术[J].水运工程,2013(6):183-186.
- [2] 崔珂琳,卫学亮.深水防波堤石料抛填施工工艺及质量控制[J].人民珠江,2007(4):69-71.
- [3] 潘伟,卫学亮.深水直立式防波堤石料抛填施工工艺及质量控制[J].中国港湾建设,2007(2):46-49.
- [4] 任宁,樊湘伟.深水防波堤抛填工艺[J].中国港湾建设,2013(1):60-64.
- [5] 陈斌.神华黄骅港外航道整治工程第三标段块石抛填施工技术[J].华南港工,2006(1):9-13.
- [6] 王瑞利,熊伟,孙立军,等.水抛石溜槽设计与施工[J].水运工程,2010(7):137-139.
- [7] 韩海骞,杨永楚.动水抛石漂移距离的计算[J].浙江水利科技,2001(3):6-7.
- [8] 付建宝,梁爱华.水下振动压实块石抛填层技术初探[J].地震工程学报,2015(S2):214-217.
- [9] 梁天戈,伍绍博,苏怀平.溜管抛石精度控制技术及其在港珠澳大桥隧道基础施工中的应用[J].中国港湾建设,2015(11):68-72.