



超大水深及流速条件下铺排施工技术

冯海暴^{1,2}, 曲俐俐^{1,2}

(1. 中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071; 2. 中国交建海岸工程水动力重点实验室, 天津 300222)

摘要: 结合长江南京以下12.5 m深水航道整治一期及二期工程, 采用滑板支撑式深水铺排船, 在一期工程中完成了35 m水深、2 m/s流速条件下的深水铺排施工, 并形成了深水铺排施工工法, 在二期工程施工中完成了46 m超大水深条件下的铺排施工, 该技术革新了传统的航道整治铺排施工采用滑板吊浮式铺排装备的施工方法, 铺排施工效率最快可达1 222.2 m²/h, 铺设排体单幅最长642.6 m。

关键词: 深水铺排; 35 m水深; 往复流速; 固定支撑滑板

中图分类号: U 615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0008-06

Concrete interlocking blocks construction technology in the condition of large depth-water and velocity

FENG Hai-bao^{1,2}, QU Li-li^{1,2}

(1. The Second Engineering Co., Ltd., of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao 266071, China;

2. CCCC Key Hydrodynamic Laboratory for Coastal Engineering, Tianjin 300222, China)

Abstract: Combined with the first phase and the second phase project of 12.5 m deepwater channel of the Yangtze River downstream Nanjing, using the supporting inclined plate geotextiles-laying vessel, the deepwater sinking soft matre was constructed. In the first phase of the project under the conditions of 35 m water depth and 2 m/s velocity, the construction method of deep water sinking soft matre was completed. In the two phase of construction under the 46 m water depth conditions, the sinking soft matre construction was completed. The construction method of waterway regulation reforms the traditional layout construction using hanging floating skateboard laying equipment. The construction efficiency was up to 1 222.2 m²/h, and paving soft matre longest single row body is 642.6 m.

Keywords: deepwater sinking soft matre; 35 m depth; reciprocal flow; fixed supporting inclined plate

航道整治工程中软体排铺设多在20 m水深范围内进行施工, 水深超过20 m时, 对船舶性能、锚泊系统、施工工艺及装备提出了极高的要求, 也是航道整治工程中的一大难题。随着国家重点工程长江口深水治理一期、二期、三期工程相继开工建设完成, 航道整治技术也不断提高。混凝土排体已大规模应用于国内的航道整治工程, 1998年排体铺设深度达到了9 m; 2007年随着新一代深水铺排装备研发应用成功, 铺排的深度达

到了25 m^[1]。

国外航道整治工程中, 深水航道整治工程水深基本也在20 m范围之内, 对35 m水深、2 m/s流速的航道整治工程, 没有相关的技术研究。通过国内外调研分析, 国内航道整治的发展逐渐以远离岸边深水区发展, 国外的航道整治则多在浅水区^[2]。

2012年国家重点工程——长江南京以下12.5 m深水航道一期工程整治建筑物工程开工, 在通州

收稿日期: 2016-08-05

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工作。

沙 II 标段水深复测时, 航道地形因洪季局部河段异常冲刷, 最大水深 35 m、流速 2 m/s, 施工条件非常恶劣, 采用当时铺排能力最大的装备典型施工时, 在流速低于该工况时出现了走锚和驱动装置被拉坏的现象。当时国内铺排水深基本都在 25 m 以内, 吊浮式滑板铺排船和传统技术无法满足该工况下铺排作业施工, 需要开发超大水深条件下铺排施工技术。

1 工程概况

长江南京以下 12.5 m 深水航道施工总河势见图 1。

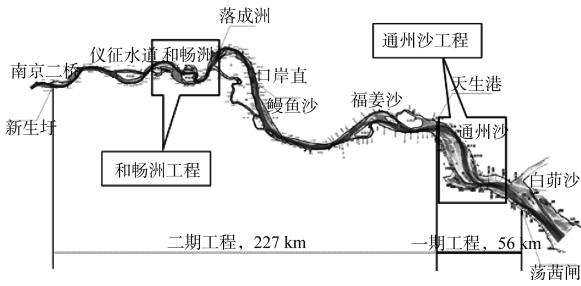


图 1 工程总河势

1.1 一期工程通州沙 II 标段

通州沙 II 标段项目施工水域位于河口区, 该河段为不稳定分汊河道或水下暗沙河段, 属感潮河段, 由于距河口较远, 潮波变形已十分显著, 潮汐作用相对较弱, 自然条件下河床冲淤变化频繁, 施工区域地质为粉细砂, 河床条件较差, 水道受径流和潮流的共同作用明显, 河道宽浅、暗沙密布, 河床可动性大, 存在异常冲刷的现象, 统计显示该水域平均潮差约为 2.5 m, 最大的潮差可大于 4.0 m, 在施工期间最大水深为 35 m, 统计最大流速为 2 m/s, 通州沙 II 标河道滩槽见图 2, 排体施工顺序见图 3。



图 2 工程河势滩槽

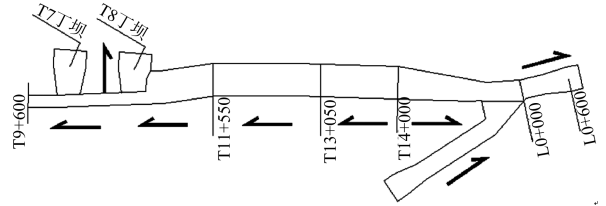


图 3 排体施工顺序

项目位于通州沙—狼山沙过渡段以及狼山沙区段, 航道整治总长度约为 9 130 m, 潜堤及丁坝断面护底结构均为砂肋软体排、混凝土联锁块软体排余排, 铺排作业主要工程数量约为 343 万 m², 其中砂肋软体排约为 30 万 m², 铺排工程数量见表 1。

表 1 铺排工程数量

排体类型	结构尺寸/mm	数量/m ²
砂肋软体排	φ300@1 000	306 275
混凝土联锁软体排	480×480×120	2 489 016
混凝土联锁软体排	480×480×160	567 619
混凝土联锁软体排	480×480×200	67 473

1.2 二期工程和畅洲标段

二期工程和畅洲水道整治工程也属感潮河段, 该区域河床条件较差, 水道受径流和潮流的共同作用明显, 和一期工程具有同样的河道宽浅、暗沙密布的情况, 二期工程和畅洲水道设计高水位 6.62 m, 设计低水位 0.33 m, 施工期间选择在枯水期进行, 基本为单向下泄流, 最大流速为 1.08 m/s, 但铺排水深可达 46 m, 需要铺设护底的单块最长排体达 642.6 m。和畅洲水道河势滩槽及工程布置见图 4、5。

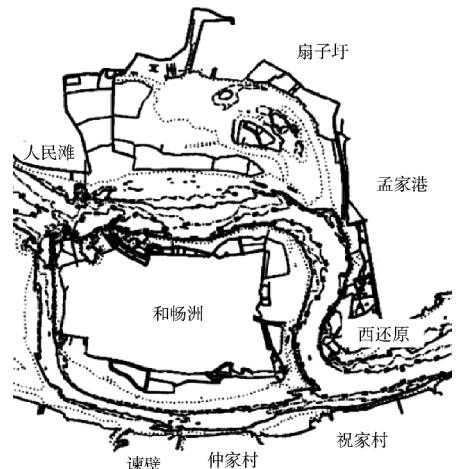


图 4 和畅洲水道河势滩槽

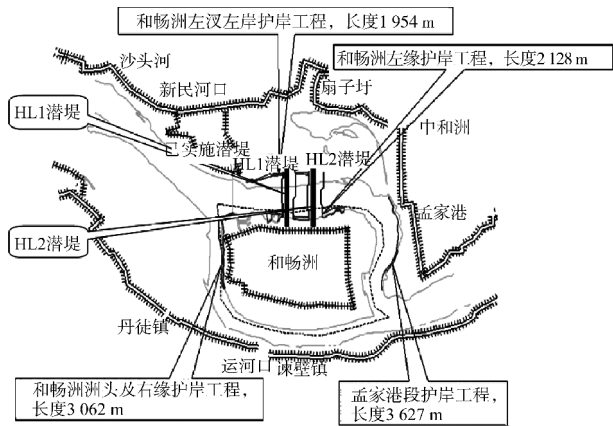


图5 和畅洲水道工程布置

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, 工程包括 10.771 km 护岸专项工程和新建 2 道长度 1 817、1 919 m 的潜堤及接岸工程, 工程量为抛石约 181 万 m^3 、软体排铺设 157 万 m^2 (其中砂肋软体排 33 万 m^2), 以及冲灌砂被、堤心砂袋抛填等。

3) 计算参数。

由于一期工程施工在前, 该技术的开发首先要满足一期工程的施工条件, 因此选取水深 35 m 和流速 2 m/s 作为计算参数, 同时在二期工程条件下进行复核计算, 得出最不利工况条件。

2 铺排施工技术原理

从锚泊系统、工艺操作等方面开发超大水深铺排施工技术 (图 6)。

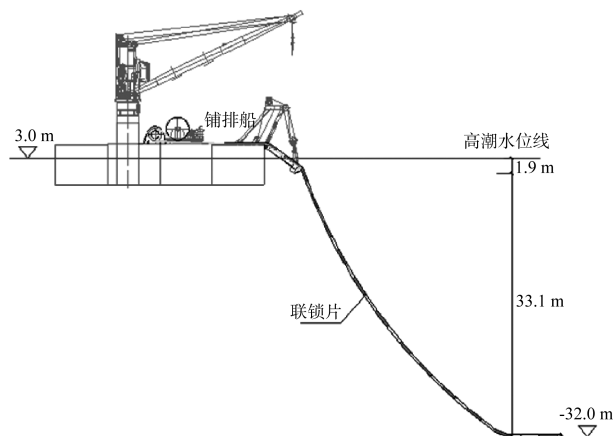


图6 深水铺排示意图

2.1 锚泊系统

通过现场试验确定粉细砂地质锚抓力抓重比

系数, 现场试验检测锚的起锚力, 确定锚的选型和粉细砂地质布锚方式, 检测粉细砂地质锚的拖曳距离; 锚缆力的受力计算, 满足深水铺排船舶在 35 m 水深、作业流速 2 m/s 的工况下的合理布锚方式, 并选取适合于粉细砂地质的锚泊系统。采用计算结合现场测试分析铺排船作业时的最大锚缆拉力, 得出适用于工程的锚泊系统, 并通过解析计算分析核对, 得出适用于深水航道整治工程中锚泊系统的合理设置。

2.2 深水铺排控制方法

通过滑板摩擦系数试验, 确定滑板与排体间的摩擦系数, 设计滑板固定支撑体系, 采用支撑式滑板铺排施工替代传统的吊浮式滑板铺排施工, 优化滑板结构, 发明了滑板固定支撑式铺排施工装备, 使滑板结构重力、吊索受力大幅减小。在满足深水铺排作业的条件下同时具有浅水铺排的作业能力。采用 GPS+声呐技术, 开发超短基线排体水下检测系统, 实现了水下实时监测排体的铺设质量和搭接长度, 使得排体水下铺设精度得到提高。

改进操作方法, 通过研究同步和异步放排移船施工技术, 在铺排装备上安装测力系统; 利用测力系统实时检测和控制放排长度和速度, 利用锚泊测力系统, 控制排体铺设过程中锚泊系统的稳定性。使该方法可在流速 2 m/s 往复流、作业水深范围 2~35 m 工况下施工作业, 铺排宽度达 40.5 m, 铺排效率不小于 1 000 m^3/h 。

3 深水铺排设计与计算分析

3.1 锚泊系统

3.1.1 锚泊系统设计原则

锚泊系统设计须满足工况条件下的作业受力要求, 以及较高的工作效率。结合本工程排体规格, 普通混凝土软体排长度一般在 200 m 左右, 对于潜堤段超长排体长度最大可达 400 m。本文研究的排体幅宽为 38.5 m, 锚泊系统设计时一次抛锚铺设完成普通排体, 对于超长排体则通过两次抛锚, 以可有效提高铺排施工效率为原则进行锚泊系统设计, 为留有一定的余量, 设计布锚实现一次抛锚移船达 250 m, 锚泊系统见图 7。

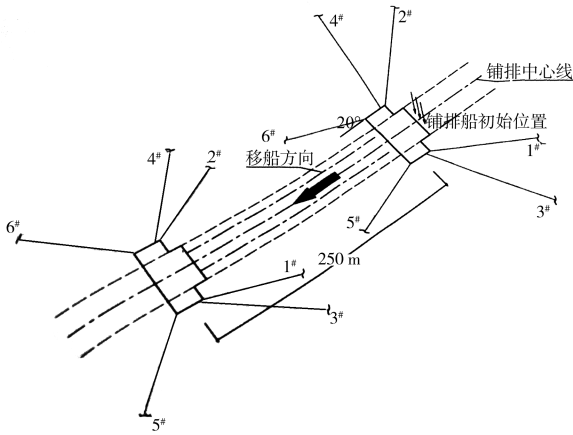


图 7 锚泊系统初步设计

3.1.2 锚泊系统受力分析

1) 水动力作用分析。

本文研究的铺排装备满足规定的锚泊系统受力设计要求, 要求达到作业水深 35 m、流速 2 m/s 的工况条件, 软体排铺设锚泊系统设计分析中, 排体铺设移船作业时, 根据图 7 可知, 锚泊系统与水流作业夹角随船舶移动在逐渐减小, 则锚缆在铺排船移动过程中受力随之变小。

通过作业过程分析可知, 初始布锚为最不利状态, 本文研究的受力模型以初始抛锚锚泊系统设计作为最不利工况。水流作用力在文献[1]中已经有了详细的计算分析过程, 计算得软体排受水流阻力为 741.2 kN, 铺排船受水流力为 276.5 kN; 由于排体拖地承受一部分水动力, 但为留有一定的安全系数, 铺排船舶的锚系统设计考虑承受全部的水流对排布的作用力。

2) 大抓力锚试验及选型。

通过文献[2]中详细的试验过程及结果分析, 得出了 HY-14 锚的抓重比为 8, HY-17 最大抓重比可达到 10, 海军锚最大抓重比可达到 5, HYD-14 最大抓重比可达到 11, 该技术数据为试验所得, 但和规范文献中的数据有一定偏差, 在粉细砂地质条件下, 试验取得的锚抓力的抓重比系数具有较强的指导意义。

3.1.3 锚泊系统测试验证

锚泊系统缆系受力测试验证采用新研究的 35 m 水深铺排装备, 吃水为 2.3 m, 装备船长 75 m、型宽 26 m, 利用三辊轴测力装置, 通过传感器采集缆绳对辊轴的压力, 换算出缆绳的受力, 由于三辊轴测力方案较成熟且在多个工程中成功应用, 因此采用了三辊轴测力方案应用于缆力测试, 通过连续记录数据, 并对应流速和潮位, 进行现场缆力测试, 缆系布置为一次移船 250 m 的布缆方案。根据工况在施工现场进行相应的受力测试和计算比对, 通过 5 d 的时间测试到水流流速区间为 0.8~1.98 m/s 的 6 万个数据, 进行数据提取和筛选。单缆力测试和计算数值差 5.1~35.14 kN, 偏差为 1.35%~8.78%, 通过预留 2 倍安全系数为缆力设计值完全可满足施工要求。

3.2 铺排工艺

3.2.1 深水铺排方法

深水铺排施工分为同步和异步放排移船两种。同步放排移船施工方法操作见图 8。

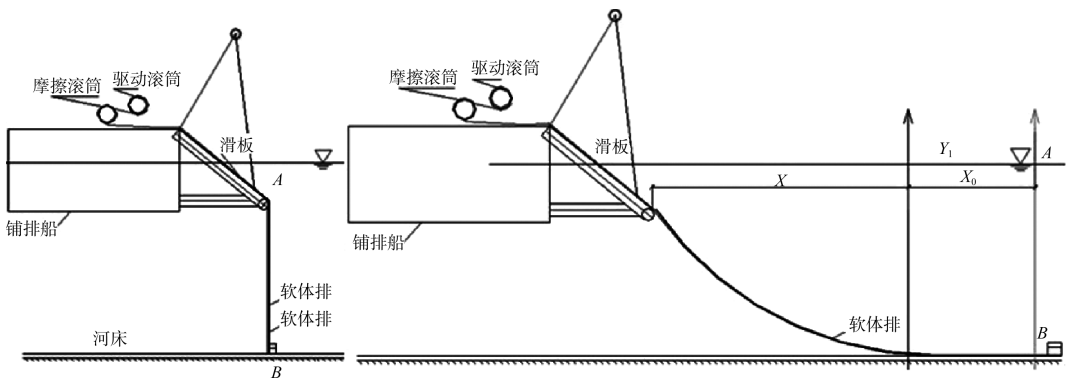


图 8 同步放排操作

异步放排移船铺排方法是在同步方排操作的基础上再次放松排体至排体垂直状态。

同步放排移船施工需要边放排边移船,放排和移船连续操作容易出现移船和放排不协调,导致船体和排布局部受力过大的现象。异步放排移船施工将放排和移船分开进行,步骤明确易于控制。本工程工况恶劣,船舶和排布受力都需要精确控制,需要明确地分开施工步骤,因此这里采用异步放排移船施工方法铺排施工。

3.2.2 异步放排移船工艺受力分析

1) 计算参数。

缆力设计值取2倍安全系数,船舶钢质缆绳的配备按国家标准GB 8918—2006《重要用途钢丝绳》规定的安全系数选取;排头沉放相应计算以首次超放重叠3m为例,见表2。

表2 首次放排移动船舶使排体被拉开至临界悬链线状态时技术参数

项目	数值	输入值
总水深	35 m	设定值
水面至滑板端部距离	1.9 m	设定值
滑板端部至河床深度 H	33.1 m	设定值
排布宽度	38.5 m	设定值
联锁块水下每米质量 q	760 t	设定值
首次超放排体长度 L	3 m	设定值
滑板端部至河床放排总长度 $H+L$	36.1 m	计算值
排布与基床摩擦系数 μ	0.5	实测值
求 a 单变量方程 1	0.00	等式值
悬链系数 a	1.00	求解值
求 X 单变量方程	0.00	等式值
悬链线横坐标 X	4.24 m	求解值
悬链线长度 S	34.09 m	求解值
首次移船长度 B	6.25 m	求解值
排布铺底长 OL	2.01 m	求解值
排布拉力 T	2 591.9 kN	求解值
水平移船力	76.36 kN	求解值
$T\sin\theta$	0.999 5	求解值
排体与水平线夹角 θ	88.310	求解值
放排长度至垂直状态	3.25 m	求解值

注:计算公式见文献[1]。

35 m 水深排头沉放超放排体完全被拉开时的技术参数,超放排体长度 1.5~5.0 m (每次计算增幅为 0.5 m),需要的移船长度为 3.5~9.6 m,

水平移船力为 38.1~127.7 kN,排布拉力为 2 553.7~2 643.3 kN,排布卧底长度为 1.0~3.36 m,悬链线夹角为 87.2°~89.2°。

35 m 水深正常铺排移船长度对应相关技术参数,超放排体长度 1.5~5.0 m (每次计算增幅为 0.5 m)时,移船长度为 1.5~5.0 m,水平移船力为 26.8~144.3 kN,排布拉力为 2 542.4~2 659.9 kN,拉起排布卧底长度为 0.4~1.9 m,悬链线夹角为 86.9°~89.4°。

船舶在软体排排头沉放时,控制水流流速 v 在不大于 0.5 m/s 的作业窗口下进行,此时取最大控制值 0.5 m/s 作为计算流速, F_w 取正向迎流,此时船舶滑板端部以下长度排体为 33.1 m,排体宽度为 38.5 m,则排体迎流面积为 1 274.35 m²,水流阻力系数在流向角为 20°时取值为 0.85^[3],正向迎流时迎流面积最大,此时阻力系数取值为 1,按规范^[4]计算得水流量 F_w 为 159 kN, q 值为联锁片水下重力 76 kN/m,排体与基床摩擦系数 μ 经试验测试为 0.5,由于排体水下卧底承受的水流上下各分 1/2 保守 (实际 1/3) 计算,需要卧底最小长度

$$L_{\min} = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_w}{q\mu} = 2.09 \text{ m}。$$

3.2.3 结果分析

结合一期工程的计算结果,在二期工程条件下进行复核计算,由于流速和排体的作用力成平方关系,一期工程的 35 m 水深、2 m/s 流速工况条件比二期工程 46 m 水深 1.08 m/s 对排体作用力更大,工况条件更恶劣,因此该技术满足一期工程工况条件下亦可满足二期工程施工条件。根据本工程施工中的最不利工况分析计算,得出混凝土软体排受力最大可达到 2 752.1 kN。

3.3 测控

采用人工打水陀和浮漂倒垂法^[5]检测和验收。水深浅于 20 m 时浮漂倒垂法测量精度可达到 1 m 左右;水深超过 20 m 时,误差大,测量精度难以保证。该方法施工效率低、人工占用高且精度较低,无法实现精确测量,造价也较高。本文针对该情况开展了测控系统的调研,可利

用声呐测控技术的方式实现水下构件的定位, 依靠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, 其超短基线测控系统的数据与多波束扫测结果相符合, 测控精度满足要求^[6]。

4 应用效果分析

在长江南京以下 12.5 m 深水航道整治一期工程通州沙 II 标段工程中制造出 2 艘铺排水深达 35 m、流速 2 m/s 的铺排船, 铺排船最快速度达 1 222.2 m²/h。在二期工程和畅洲水道整治施工中铺设最长 642.6 m 的超长排体, 系统运行平稳, 操作方法简单, 实现了高效率、高精度的铺排施工。根据铺排现场实测数据, 铺排平面精度控制偏差不大于 0.3 m, 采用该方法进行铺排与传统的滑板吊浮式铺排施工方法相比, 提高施工效率近 1 倍。铺排效果见图 9。

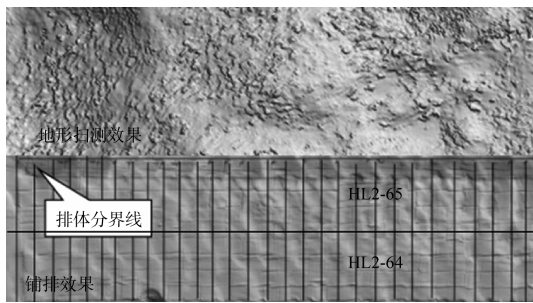


图 9 和畅洲 HL2 堤身处地形及铺排效果

5 结论

1) 设计了合理的锚泊系统, 实现一次抛锚铺排移船 250 m 的高效率;

2) 分析验证了 35 m 水深、2 m/s 流速(流向角 20°)时, 连接联锁块的排布横断面拉力的控制值取 2 752.1 kN, 通过试验和现场施工验证该方法正确;

3) 滑板支撑式深水铺排船实用性更强, 比传统吊浮式铺排装备具有较多的优势, 支撑滑板结构重力、吊索受力大幅减小;

4) 采用 GPS+声呐技术水下实时测控, 精度满足规范要求。

参考文献:

- [1] 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(1): 22-25.
- [2] 单国辉, 李玉峰. 不同型号锚在粉细砂地质中锚抓力大小测定[J]. 科技创新导报, 2013(5): 127-128.
- [3] 刘德进, 冯海暴. 用概率法结合 ANSYS 分析深水航道整治铺排锚缆在恶劣工况下的受力[J]. 水运工程, 2013(12): 8-12.
- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [5] 中交第四航务工程局有限公司, 中交四航局港湾工程设计院有限公司. 重力式码头设计与施工规范: JTS 167-2—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [6] 冯海暴, 徐加峰, 周良玉, 等. 超短基线软体排深水水下定位检测系统设计思路[J]. 水运工程, 2014(6): 126-130.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

中国挖泥船首次进行大挖深施工作业

近日, 正在马来西亚槟城吹填二期工程施工的天航局“通途”轮成功进行了 60 m 挖深的取砂吹填作业。该轮成为我国首艘把大挖深的设计能力应用在具体施工项目中的船舶, 这也标志着中国挖泥船正式走进大挖深时代。