



# 混凝土联锁块护岸软体排设计方案优化

南铁雷<sup>1</sup>, 刘江<sup>1</sup>, 李建英<sup>1</sup>, 任思成<sup>2</sup>

(1. 中国水电建设集团十五局有限公司第三工程公司, 陕西 咸阳 712000;

2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 针对引江济淮工程 J002-1 标段护岸软体排出现的预制块挤压破损、施工效率低下等问题, 对原设计方案护岸软体排结构以及施工方法进行优化。通过参考工程实例以及方案比选, 采用 C25 混凝土预制块联锁片软体排结构和铺排船施工的方法。结果表明, 优化施工方案技术上可行, 预制块破损少、施工效率高, 达到预期效果。软体排结构优化和铺排船施工工法在引江济淮工程的成功应用, 为类似工程提供良好示范, 具有较好的推广应用价值。

**关键词:** 护岸软体排; 铺排船; 结构优化; 工法改进; 引江济淮工程

中图分类号: U656.3; TV861

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0224-07

## Design scheme optimization of soft mattress of concrete interlock blocks for bank revetment

NAN Tielei<sup>1</sup>, LIU Jiang<sup>1</sup>, LI Jianying<sup>1</sup>, REN Sicheng<sup>2</sup>

(1. The Third Engineering Company of China Hydropower Construction Group 15th Bureau Co., Ltd., Xianyang 712000, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Regarding the problems such as extrusion damage of prefabricated blocks and low construction efficiency in the soft mattress for bank revetment of J002-1 section of the Yangtze River to Huaihe River diversion project, we optimize the original design scheme of soft mattress structure for bank revetment and construction method. We adopt the soft mattress structure of C25 concrete prefabricated blocks interlock sheet and the construction method of geotextiles-laying boat by referring to engineering examples and scheme comparison and selection. The results show that the optimized construction scheme is technically feasible, the prefabricated blocks have the advantages of less damaged and high construction efficiency, and the expected effect is achieved. The successful application of soft mattress structure optimization and geotextiles-laying boat construction method in the Yangtze River to Huaihe River diversion project provides a good demonstration for similar projects and has good popularization and application value.

**Keywords:** soft mattress for bank revetment; geotextiles-laying boat; structure optimization; improvement of construction method; the Yangtze River to Huaihe River diversion project

引江济淮工程 J002-1 标段计划对南岸一级平台以下边坡采用厚 120 mm 的 C25 混凝土水下联锁式软体排铺设护岸, 一级平台及以下采用 C25 混凝土倒梯形预制块加厚 120 mm 的 C25 混凝土水下联锁式软体排铺设护岸, 压载体的设置可以有效改善近底水流流态、促进泥沙落淤, 提高工程对

边滩的守护效果<sup>[1]</sup>, 从而达到保土、防浪、抗冲刷、防淘蚀等功能的要求。

类似工程中, 河南省信阳市淮滨段淮河治理工程 SG003 标段固滩工程水下铺排设计采用 C25 素混凝土预制块软体排, 排体与排体、排体与铺排布均采用丙纶绳连接; 长江中游熊加洲—城陵

收稿日期: 2022-10-10

作者简介: 南铁雷 (1973—), 男, 高级工程师, 从事项目管理及市场营销。

矶段采用混凝土铰链排, 块体采用C20混凝土长方块体, 单块中间部位设置1道箍筋, 与其他块体进行螺栓连接; 长江中游荆江航道整治工程以守护功能为主, 沉排工程量巨大, 采用由排垫和圆形混凝土单元块组成的单元块D形软体排<sup>[2]</sup>; 长江干线武汉—安庆段6 m水深航道整治工程沉排主要采用D形联锁软体排, 联锁块采用C20混凝土, 施工采用顺水流沉排系混凝土块排铺放方式<sup>[3]</sup>; 长江荆江河段利用软体排铺排船进行混凝土铰链排施工工艺技术, 施工效果较传统方法改善明显, 有效缩短了工期并降低工程成本, 同时保证工程的安全和质量<sup>[4]</sup>。

根据工程需求以及已有的J010-2标段试验结果, 在不改变原有设计功能和技术要求的前提下, 满足本工程水下软体排施工的进度要求和质量要求。本文对水下软体排预制块的结构形式、预制块的拼接布置、排布材料、系排方式等进行优化和调整, 计划采用铺排船进行水下作业施工, 从而保证施工质量、减少材料浪费、提高施工效率, 能较好地满足工程建设需要, 为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

引江济淮工程由长江下游上段引水、向淮河中游地区补水, 是一项以城乡供水和发展江淮航运为主要目的, 兼具灌溉补水和改善巢湖及淮河水生态环境主要任务的大型跨流域调水工程, 同时也是集供水、航运、生态等效益的水资源综合利用工程。其中J002-1标段所属的江淮沟通段输水河道自巢湖西北部派河口起, 沿派河经肥西县城关上派镇、在肥西县大柏店附近穿越江淮分水岭, 沿天河、东淝河上游河道入瓦埠湖, 由东淝河下游河道, 经东淝闸后入淮河, 全长为155.1 km。江淮沟通段中的河道输水流量为: 起点派河口295 m<sup>3</sup>/s、蜀山泵站枢纽提水流量290 m<sup>3</sup>/s、入瓦埠湖280 m<sup>3</sup>/s<sup>[5]</sup>。

J002-1标段位于江淮沟通段内, 始于派河口泵站枢纽, 终点位于金寨路桥。对应河道桩号J3+240—J18+220, 总长14.98 km。河道相对平直,

河宽60~80 m, 地面高程6~10 m。参考《建筑地基基础设计规范》<sup>[6]</sup>, 工程区主要为Ⅱ类场地, 基本地震动峰值加速度为0.10g, 相应地震基本烈度为Ⅶ度。

地质勘察深度范围内揭露标段内上覆地层主要为全新统粉质壤土、淤泥质壤土、砂壤土、上更新统粉质壤土、粉质黏土、砂性土及部分中更新统黏土夹砾石; 下伏基岩主要为白垩系粉砂岩、细砂岩、粉砂质泥岩。

工程区域属巢湖流域, 属北亚热带湿润季风气候区, 主要特征为气候温和、四季分明、日照充足、无霜期长。根据《2011年中国水资源公报》<sup>[7]</sup>可知, 该区域受季风气候影响, 降雨年际变化大, 年内年际分配不均匀, 降雨主要集中在汛期。

## 2 原设计方案

### 2.1 水下软体排运行条件

J002-1标段河道设计标准断面底宽60~180 m, 河道为派河中下游段, 受巢湖水位顶托, 派河河道常水位在7.0~7.5 m, 设计河底高程1.8 m, 水深5.2~5.7 m。J3+240—J15+340渠道南岸为退堤段, 断面采用半挖半填方式, 填筑段堤防堤顶高程为设计洪水位超高1.0 m。引江济淮工程建成后, 渠道水位受巢湖所控制, J002-1标段河渠设计输水位为8.195~8.900 m, 最高通航水位11.84~10.83 m, 最低通航水位5.8 m, 控制运行水位6.1 m, 设计100 a一遇防洪水位11.60~12.62 m。江淮沟通段J002-1标段河渠工程主要采用挖泥船进行水下开挖施工。输水渠道是利用现有派河河道扩挖疏浚而成, 沿线弯道迎流顶冲, 凹岸众多, 加上有Ⅱ级通航要求, 根据有关研究<sup>[8-10]</sup>可知, 在船行波和引水流的长期共同作用下, 渠道边坡易形成浪坎, 并最终威胁渠道边坡的稳定安全。防护工程和消能工程中应用软体排<sup>[11-12]</sup>, 可以防止渠道冲刷破坏、提高渠道水利用系数、减少糙率、加大流速, 确保渠坡安全, 是满足保土、防浪、抗冲刷、防淘蚀等功能的护坡结构。计划对J002-1

标段一级平台 8.6 m 高程以下边坡表面均采用厚 120 mm 的 C25 混凝土水下联锁式预制块护坡。

## 2.2 水下软体排运行条件

根据《引江济淮工程(安徽段)江淮沟通段 J002-1(河渠)标段水下联锁式软体排设计变更报告》<sup>[13]</sup>的原设计方案,水下联锁式软体排采用中间闭孔式混凝土预制块,结构形式见图 1。护坡从上至下为厚 120 mm 的 C25 混凝土预制块、500 g/m<sup>2</sup> 土工布,块体之间采用钢绞线串联。北岸 J3+240—J16+870 段软体排头采用 C60 预应力混凝土空心预制方桩固定,方桩中心距 2.0 m, 方桩型号为 PS-B350(170)-8-b。北岸 J16+870—J18+220、南岸 J3+240—J18+220 段软体排排头系接在坡顶压顶梁上。渠底坡脚采用水平铺设 2.0 m(平均)进行固脚。土工布为 500 g/m<sup>2</sup> 的聚丙烯长丝无纺土工布,钢绞线为稀土锌铝合金镀层钢绞线。

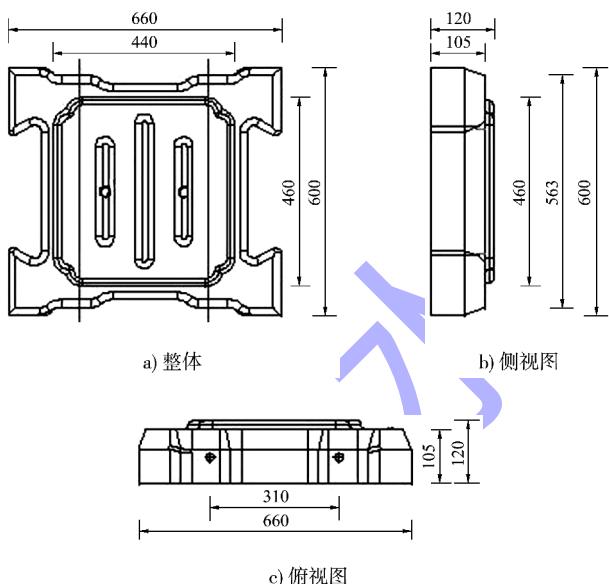


图 1 原设计预制块结构 (单位: mm)

## 2.3 原方案存在问题

根据与本标段原设计方案相同的 J010-2 标在工程现场的铺排试验,在陆地拼排吊装沉排的起吊试验中出现矩阵吊起过程中折角处预制块挤压破损的现象,尤其预制块间联锁的卡锁扣破损严重。

此外,还存在以下阻碍施工的因素:1) 巢湖非汛期蓄水位维持在 7.0 m 及以上可能性较大,

对陆地拼排吊装沉排的施工方法极为不利,加上汛期的影响,可以施工的时间段非常有限,工期不能保证;2) J3+240—J15+340 的填方段平台宽仅 4.5 m,对预制块矩阵拼接场地、吊机站位等施工场地难以布置。

## 3 优化设计方案

### 3.1 优化内容

根据工程需求和 J010-2 标段试验结果,以及 X 形排在长江治理工程中的成功应用<sup>[14-16]</sup>,拟采用 C25 混凝土预制块联锁片软体排方案,同时根据本标段实际情况,对原软体排方案进行优化设计。同时根据 J010-2 标在工程现场进行的铺排试验,通过对原设计方案的吊装铺排和修改调整方案的水下铺排船铺排的实施和对比,发现采用铺排船铺排施工时不受场地条件影响,可大幅提高铺排效率,施工进度容易控制,且在长南京以下 12.5 m 深水航道整治等大量工程中,铺排船的应用已非常广泛<sup>[17-20]</sup>。鉴于以上实际情况,本标段水下连锁块软体拟采用铺排船沉排完成施工。

### 3.2 方案设计

根据 J010-2 标段现场水下铺排试验验证,J002-1 标段水下铺排方式采用相同铺排船进行水下作业施工。排体选择上, J010-2 标段采用的预制块孔隙率较大,需要进一步优化。根据《水运工程施工标准化建设指南施工工艺篇-内河航道整治工程》<sup>[21]</sup>推荐的软体排混凝土压载块建议,并结合新孟河延伸拓浚工程软体排结构形式,将 J002-1 标段软体排结构形式调整为 C25 混凝土预制块联锁片软体排。

根据优化设计方案《江淮沟通段 J002-1(河渠)标段水下软体排铺设专项施工方案(修改)》<sup>[22]</sup>,参考混凝土联锁块软体排在木兰溪潮汐河道防护等工程中的应用<sup>[23-25]</sup>,确定水下软体排的结构,见图 2。块体长、宽均为 460 mm,厚度为 120 mm,四周边缘采用 30 mm×30 mm 倒角,单个块体体积为 0.024 m<sup>3</sup>,质量为 57.48 kg,单块之间采用 φ14 mm 丙纶绳连接,块体之间净距为 50 mm,孔

隙率为19.6%。铺排布采用380 g/m<sup>2</sup>丙纶复合布(230 g/m<sup>2</sup>长丝机织布和150 g/m<sup>2</sup>无纺布的复合布),铺布上垂直水流向长度与铺排长度相同,铺布垂直水流向布置70 mm宽丙纶加筋带,加筋带中心距为510 mm,即每条加筋带布置在预制块中间部位,铺布与加筋带单位面积质量略大于500 g/m<sup>2</sup>,达到原设计土工布单位面积质量的要求。每一条加筋带上,垂直水流向间隔2块预制块布置一条长500 mm丙纶带,用于铺布与块体之间绑扎连接。预制块之间采用丙纶绳连接,可根据需要预制成品矩阵,初拟矩阵为10块×8块(可根据实际排体长度调整),单次铺设顺水流向长度根据铺排船实际情况确定,且排体之间的设计搭接长度不小于2.0 m。

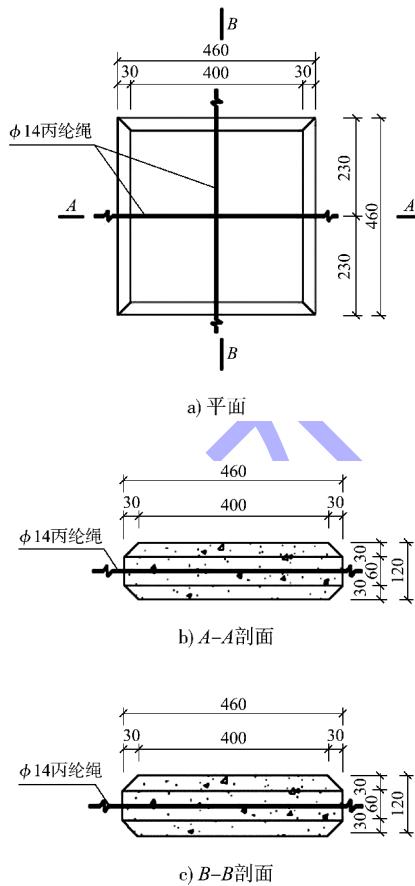


图2 优化后的预制块(单位: mm)

北岸J3+240—J16+870段,软体排头采用挖地沟形式,将排头埋置于一级坡坡顶或者滩地部位,地沟采用梯形断面,底宽0.6 m、深0.9 m、两侧边坡坡比1:0.5。根据GB 50286—2013《堤防

工程施工规范》<sup>[26]</sup>,施工时当地沟位于水上时排头压顶采用素土回填压实,反之位于水下时则采用C25混凝土等腰梯形预制块,长度2 m、底宽0.58 m、顶宽1.36 m、深0.78 m,上部设置2道钢筋吊环,方便吊装。

北岸J16+870—J18+220、南岸J3+240—J18+220段软体排维持原设计方案,将排头系接在坡顶压顶梁上,坡顶梁每隔0.51 m设置1道钢筋拉环,排头丙纶绳系入拉环内。考虑到排布为聚丙烯材料,为防止紫外线照射,导致排布质量降低,在水位变幅区6.1~8.6 m高程范围内,预制块之间采用16.0~31.5 mm碎石回填,主要目的是促淤防晒,保护土工布。具体施工布置见图3。

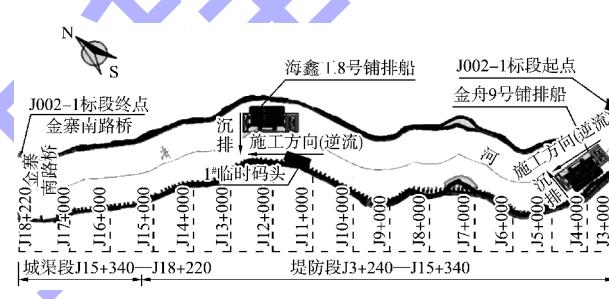


图3 联锁式软体排施工平面布置

## 4 结果分析

### 4.1 结构及稳定性分析

#### 4.1.1 丙纶绳拉力

预制块之间采用丙纶绳连接组成矩阵单元,初拟矩阵为10块×8块进行验算,在实际施工情况下,单个预制块矩阵单元在吊运过程中丙纶绳受力最大,起吊时的荷载主要为构件的自身重力,另外还要考虑构件底面和地坪(或底模)之间的附着力(包括黏结力和真空吸附力),以及起吊时的动力作用,并且假定附着力和动冲击力不同时发生,设计时取其大者进行验算<sup>[27]</sup>。

考虑动力作用时丙纶绳的拉力T计算公式为:

$$T = mF/n \quad (1)$$

考虑附着力作用时的计算公式为:

$$T = (F + QA)/n \quad (2)$$

式中:T为丙纶绳的拉力,kN;m为吊装动力系数,取1.3;Q为单位面积附着力,取5 kN/m<sup>2</sup>;A为单块排体单元面积,m<sup>2</sup>;F为单个连锁块软

体排单元重力, kN;  $n$  为吊装系结点数, 根据以往工程经验取 10。

计算结果见表 1, 求得丙纶绳最大拉力为 14.20 kN, 本文采用  $\phi 14$  mm 丙纶绳, 要求设计断裂力不小于 14.5 kN, 故可以满足设计要求。

表 1 丙纶绳拉力计算结果

考虑情况	T/kN	
	实际值	容许值
动力作用	7.47	14.50
附着力	14.20	14.50

#### 4.1.2 加筋带抗拉安全系数

根据 JTS/T 148—2020《水运工程土工合成材料应用技术规范》<sup>[28]</sup>可知, 计算排体极限抗拉强度时, 缝制加筋带方向仅按加筋带受力计算, 所以拟通过选用加筋带的强度推求软体排施工期抗拉安全系数是否达到规范的要求从而复核加筋带规格选用是否合理。对软体排施工期时纵向抗拉系数  $K_{sm}$  采用式(3)(4)计算:

$$K_{sm} = \frac{\sum T_{sm}}{F_{sm}} \quad (3)$$

$$F_{sm} = G_1 \sin\alpha \sqrt{G_2^2 + p_w^2} \quad (4)$$

式中:  $K_{sm}$  为软体排施工期时纵向抗拉系数, 取

表 2 水流作用下混凝土联锁块软体排压载稳定验算结果

计算工况	设计垂线平均流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	软体排边缘部位设计失稳垂线 平均流速 $v_{s1}/(m \cdot s^{-1})$	软体排搭接部位设计失稳垂线 平均流速 $v_{s2}/(m \cdot s^{-1})$	软体排中间部位设计失稳垂线 平均流速 $v_{s3}/(m \cdot s^{-1})$
坡顶	0.64	1.767	1.621	1.851
坡脚	1.49	1.509	1.384	1.851

对于边缘、搭接部位压载稳定可按下式验算:

$$\gamma_0(\gamma_p M_p + \gamma_n M_n) \leq \frac{1}{\gamma_d} \gamma_c M_c \quad (7)$$

式中:  $\gamma_0$  为结构重要性系数, 取 1.1;  $\gamma_p$  为波浪正向水平力分项系数, 取 1.30;  $M_p$  为正向水平波浪力标准值对压载块后趾的倾覆力矩, N·m;  $\gamma_n$  为波浪浮托力分项系数, 取 1.3;  $M_n$  为波浪浮托力标准值对压载块后趾的倾覆力矩, N·m;  $\gamma_d$  为结构系数, 取 1.25;  $\gamma_c$  为自身重力分项系数, 取 1.0;  $M_c$  为自身重力标准值对压载块后趾的稳定力矩, N·m。

根据式(7), 可得到公式左侧数值为 3.04 N·m 远小于右侧数值 158.98 N·m, 计算结果满足

2~3;  $T_{sm}$  为排体极限抗拉强度, kN/m;  $F_{sm}$  为软体排纵向承受的荷载, kN/m;  $G_1$  为滑板上排体的单位长度重力, kN/m;  $G_2$  为悬空部分排体的单位长度重力, kN/m;  $\alpha$  为施工时铺排船滑板的水平倾角, (°);  $p_w$  为施工时排体受到的水流力, 可忽略不计。

考虑到铺排施工在巢湖常水位条件下, 经计算得到软体排施工期时纵向抗拉系数为 2.29, 本工程施工期水深、流速不大, 容许值为 2~3, 故软体排抗拉系数在合理范围之内。

#### 4.1.3 混凝土连锁块软体排压载稳定性

根据 JTS/T 148—2020《水运工程土工合成材料应用技术规范》进行水流作用下混凝土联锁块软体排压载稳定验算, 计算公式为:

$$v \leq v_{s1} \quad (5)$$

$$v \leq v_{s2} \quad (6)$$

式中:  $v$  为设计垂线平均流速, m/s;  $v_{s1}$  为边缘或搭接部位设计失稳垂线平均流速, m/s;  $v_{s2}$  为中间部位设计失稳垂线平均流速, m/s。

验算结果见表 2。可以看出, 软体排各部位的临界失稳平均流速均大于设计平均流速, 满足规范要求。

要求。

当  $H/d \leq 0.2$  且  $d/L \geq 0.2$  或者  $H/d > 0.2$  且  $d/L \geq 0.35$  时, 作用在边缘、搭接部位压载块上的波浪正向水平力由速度分力和惯性分力组成<sup>[29]</sup>, 可按照下列公式计算:

$$P_{D,max} = C_D \cdot \frac{\pi \rho g H^2 l t}{2L} \cdot \frac{1}{\sinh(4\pi d/L)} \quad (8)$$

$$P_{I,max} = C_v \cdot \frac{\pi \rho g H l b t}{2L} \cdot \frac{1}{\cosh(2\pi d/L)} \quad (9)$$

式中:  $P_{D,max}$  为作用在压载块上波浪正向速度力的最大值, N;  $C_D$  为速度力系数, 取 0.8;  $\rho_w$  为水的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $H$  为设计波高, 取 0.7 m;  $l$  为压

载块长度(沿波浪方向), m;  $t$  为压载块厚度, m;  $L$  为波长, m;  $d$  为滩面水深, m;  $p_{l,\max}$  为作用在压载块上波浪正向惯性力的最大值, N;  $C_v$  为惯性力系数, 取 1.25;  $b$  为压载块宽度, m。

计算得  $p_{D,\max} = 0.252$  N、 $p_{l,\max} = 4.932$  N, 根据 JTS/T 148—2020《水运工程土工合成材料应用技术规范》, 当  $p_{D,\max} \leq 0.5p_{l,\max}$  时, 取  $p_{D,\max} = p_{l,\max}$ , 则  $p_{D,\max}$  取为 4.932 N, 所以计算结果为: 作用在压载块上波浪正向水平力最大标准值  $p_{\max} = 6.165$  N、 $p_{D,\max} = p_{l,\max} = 4.932$  N, 故可得波浪作用下混凝土联锁块软体排压载稳定满足规范要求。

#### 4.1.4 软体排的抗滑稳定性

根据 JTS/T 148—2020《水运工程土工合成材料应用技术规范》可知, 软体排抗滑稳定分析可按下式计算:

$$\rho'_m g t_m \sin \alpha \leq (\rho'_m g t_m \cos \alpha - \rho_w g \Delta h) f_{sg} / K_m \quad (10)$$

式中:  $\rho'_m$  为软体排的浮密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t_m$  为软体排等效厚度, m;  $\alpha$  为坡脚, ( $^\circ$ );  $\Delta h$  为软体排上下水头差, m;  $f_{sg}$  为软体排与坡面的摩擦系数, 取 0.3;  $K_m$  为软体排抗滑稳定安全系数, 取 1.2。

经计算得到浪击区下滑力, 即  $\rho'_m g t_m \sin \alpha$  为 1 182 N/m; 上部稳定块体富余阻滑力, 即  $(\rho'_m g t_m \cos \alpha - \rho_w g \Delta h) f_{sg} / K_m$  为 1 987 N/m。则该工况下抗滑稳定满足要求。

#### 4.2 现场试验结果

现场采用铺排船试验试铺两矩阵的优化预制块, 水下预制块铺排试验结果证明优化设计施工方案技术上可行, 预制块破损少、整体效果较好。

### 5 结语

1) 通过现场船只试铺 C25 混凝土预制块联锁片软体排可见, 减轻混凝土预制块结构的单位面积质量以及优化预制块轮廓, 可减小锁角部位破损, 增强铺排、吊装的适应性, 使块体之间咬合紧密, 适应变形能力强。同时取消原设计排体采用的钢绞线串联, 块体之间采用锁扣自锁, 使排体紧凑、变形能力小, 能够避免派河现状天然弯道较多而可能造成的排体悬空问题。

2) 由于混凝土预制块结构预制块轮廓的优

化, 可以有效避免原有设计方案中出现的矩阵吊起中折角处预制块挤压破损、预制块间联锁的卡扣破损严重等问题, 能够有效降低块体损坏率, 避免实际施工困难等问题, 提高材料利用率。

3) 由于工程在前期进度受疫情、汛情等不利影响下, 需要提高效率、加快工程进度, 保障施工工期。通过采用铺排船水下施工的方法, 同时取消土工布和钢绞线, 增设铺排布, 依靠铺排布作为固定预制块形成排体, 可以提高铺排效率, 使施工不受场地影响, 进度容易控制; 避免由于河道长、铺排量大而导致的施工期历时长、吊装施工效率低下的问题。

#### 参考文献:

- [1] 夏炜. 航道整治工程软体排压载体的水力特性[J]. 水运工程, 2019(10): 98-105.
- [2] 熊波. 混凝土单元块 D 型软体排结构研究及应用[J]. 水运工程, 2018(10): 17-21.
- [3] 常留红, 王瀚锐, 李小超, 等. D 形软体排顺水沉排受力特性分析[J]. 水运工程, 2022(3): 78-84.
- [4] 黄建宇, 张璠, 曾涛, 等. 长江中游航道软体排压载体布置型式优化试验研究[J]. 水道港口, 2020, 41 (3): 309-317.
- [5] 冯家豪, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 90-103.
- [6] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [7] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2011[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [8] 宋晓龙, 白玉川. 基于河流阻力规律的河型统计与分类[J]. 水力发电学报, 2018, 37(1): 49-61.
- [9] 韩其为, 何明民. 三峡水库修建后下游长江冲刷及其对防洪的影响[J]. 水力发电学报, 1995(3): 34-46.
- [10] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [11] 王亚莉, 邹国语, 李保红. 混凝土联锁块软体排在潮汐河道防护工程中的应用[J]. 水利建设与管理, 2015, 35(1): 12-14.
- [12] 程永东, 詹小米. 混凝土铰链联锁软体排在闸坝消能中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005(4): 92-93.

- [13] 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司. 引江济淮工程(安徽段)江淮沟通段 J002-1(河渠)标段水下联锁式软体排设计变更报告[R]. 合肥: 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司, 2020.
- [14] 李志江, 段斐, 李伟林. X型排在长江中下游护滩工程中的应用[J]. 水运工程, 2007(4): 88-89.
- [15] 周海, 陈琳, 王费新. 长江口航道整治建筑物护底软体排结构的优化和运用 [J]. 水运工程, 2012 (12): 173-177.
- [16] 韩林峰, 王平义, 苏伟. X型系混凝土块软体排水毁量化分析及整治效果评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(4): 487-493, 499.
- [17] 周涛, 何炎平, 黄超, 等. 超深水铺排作业计算方法与结果分析[J]. 水运工程, 2016(5): 156-161.
- [18] 李开志, 杨建兵, 戴望德. 混凝土铰链排用软体排沉放船沉排施工工法[J]. 水利建设与管理, 2019, 39(1): 63-67.
- [19] 陈媛媛, 苏颖. 铺排船深水铺设充泥管袋技术在围垦工程中的应用[J]. 水利建设与管理, 2014, 34(8): 44-47.
- [20] 兰昌志, 蔡亮, 李建. 铺排船在感潮区充泥管袋施工中的应用[J]. 四川水力发电, 2014, 33(3): 17-20, 96.
- [21] 交通运输部安全与质量监督管理司. 水运工程施工标准化建设指南施工工艺篇-内河航道整治工程[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [22] 中国水电建设集团十五工程局有限公司第三工程公司. 江淮沟通段 J002-1(河渠)标段水下软体排铺设专项施工方案(修改)[R]. 咸阳: 中国水电建设集团十五工程局有限公司第三工程公司, 2022.
- [23] 黄金志. 混凝土连锁块软体排在木兰溪防洪工程中的应用[J]. 水利科技, 2011(3): 47-48.
- [24] 范学平, 邵宇阳. 软体排稳定厚度研究进展[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(2): 230-232.
- [25] 李彪, 徐晗, 黄成涛, 等. 冲刷条件下 D型软体排护底破坏机理研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 158-162.
- [26] 水利部水利水电规划设计总院. 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [27] 刘林双, 柴华锋, 赵凤亚. 新型混凝土单元块 D型软体排结构计算及稳定性分析[J]. 水运工程, 2018(9): 1-8.
- [28] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程土工合成材料应用技术规范: JTS/T 148—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [29] 田鹏, 马兴华, 周海, 等. 波流作用下混凝土联锁块软体排压载失稳机理和计算方法[J]. 中国港湾建设, 2014(10): 31-35, 56.

(本文编辑 王璁)

(上接第 223 页)

**参考文献:**

- [1] 龚晓南. 地基处理手册 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 周健, 王冠英, 贾敏才. 无填料振冲法的现状及最新技术进展[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 37-42.
- [3] 周健, 贾敏才, 池永. 无填料振冲法加固粉细砂地基试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1350-1355.
- [4] 何开胜, 过发兴. 吹填粉细砂的无填料振冲密实试验与工程应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1129-1133.
- [5] 叶观宝, 裴红涛, 徐超, 等. 无填料振冲法在液化粉细砂中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 917-921.
- [6] 李继才, 丛建, 曹军. 振冲法加固砂土地基工艺选择及施工参数控制[J]. 水运工程, 2018(10): 197-202.
- [7] 梁小从, 方金玉, 何丽平, 等. 国内外无填料振冲间距的设计原则对比[J]. 水运工程, 2018(2): 189-193.

- [8] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 港口工程地基规范: JTS 147-1—2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [9] MITCHELL J M, JARDINE F M. A guide to ground treatment [M]. London: [s. n. ], 2002.
- [10] Department of Defense. Soil dynamics and special design aspects [M]. Washington D. C.: [s. n. ], 1997.
- [11] WEBB D L, HALL R I. Effects of vibroflotation on clayey sands [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1969, 95(6): 1365-1378.
- [12] D'APPOLONIA E. Loose sands-their compaction by vibroflotation [J]. American society for testing and materials, 1953, 156: 138-154.
- [13] BROWN R. Vibroflotation compaction of cohesionless soils [J]. Journal of geotechnical engineering division, 1977, 103(12): 1437-1451.

(本文编辑 赵娟)