

超深动水环境下护岸施工技术研究与应用

文 / 彭锦华 肇庆市银华投资建设有限公司

摘要：本文以广东省西江干流治理工程(肇庆段)——高要区标段深塘围段项目为背景,针对最大施工水深达34米、流速较大的超深动水环境,系统研究了两项关键技术水下抛石施工和模袋混凝土护岸施工。通过“网格法”进行块石抛填,保障了水下抛石落点位置准确和设计坡度;通过自主研发的深水护岸摊铺船,应用“先水上浇筑后水下摊铺”的新工艺,实现了模袋布展铺、混凝土充灌等关键工序全部在摊铺板上完成。本研究为超深动水环境下的护岸施工提供了技术参考和实践指导,对提高沿江两岸防洪能力具有重要意义。

关键词：超深动水环境;水下抛石;模袋混凝土;护岸施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.006

引言

随着我国水利基础设施建设的不断推进,江河湖库治理工程逐渐向复杂水文地质条件区域延伸,超深动水环境下的护岸施工已成为当前水利工程领域面临的重要技术难题。在深水、高流速、宽河面等恶劣工况下,传统护岸施工技术普遍存在定位精度低、材料易漂移、施工效率差、质量控制难及安全风险高等问题,尤其在水深超过30米的动水环境中,常规的水下抛石与模袋混凝土施工工艺已难以满足工程质量和安全要求。广东省西江干流治理工程(肇庆段)——高要区标段深塘围段项目即面临最大施工水深达33.58米、水流流速高达2.0 m/s的严峻挑战,且单幅模袋混凝土长度达127.95米,施工难度大、技术要求高。为解决上述难题,本文依托该重点工程,系统研究了超深动水环境下水下抛石与模袋混凝土护岸的关键施工技术。通过创新采用“网格法”精准抛石工艺、自主研发深水护岸摊铺船并应用“先水上浇筑后水下摊铺”的模袋混凝土新工艺,结合水下机器人(ROV)多波束扫描检测技术,实现了深水条件下护岸施工的高精度、高效率与高安全性。研究成果不仅保障了项目的顺利实施,更为同类复杂水域的护岸工程建设提供了可复制、可推广的技术路径与实践范例,对提升我国江河防洪体系的建设水平具有重要意义。

一、超深动水环境特点与施工难点分析

(一) 西江干流肇庆段高要区标段深塘围段水文地质特点

西江是高要区的主干流,自西向东流经禄步、小湘、大湾、南岸、金渡、金利等镇,蜿蜒长达94.78km。西江高要水文站的集水面积为351535km²。根据高要水文站记录,西江高要河段的最大流年平均流量为6990m³/s,历年平均流速0.21m/s,年径流量2210亿m³。年平均含沙量0.48kg/m³,河道水面宽度一般为1000-1500m,最窄处为羚羊峡,约200m-360m。汛期一般出现在4-9月,多年平均最高水位为71.10m-79.85m,枯水期出现在10-3月,平均水位为70.89m-70.97m。

(二) 超深动水环境下的施工难点

本项目在超深动水环境下进行护岸施工,施工条件

复杂,单幅模袋混凝土最长达127.95m,最大施工水深达33.58m,有2/3的水下护岸施工水深超过15m。施工期间水流流速达到2m/s,部分河段淤积明显,深泓高程变化剧烈,给护岸施工带来了极大挑战,主要技术难点包括:

(1) 定位精准度问题:水深大、流速高的条件下,传统定位方法难以保证抛石、模袋混凝土等施工材料的精准定位。

(2) 材料稳定性问题:抛石、模袋混凝土在深水、高流速环境中容易发生漂移、变形,影响施工质量。

(3) 设备适应性问题:传统施工设备难以适应超深动水环境,需要研发专门的施工设备。

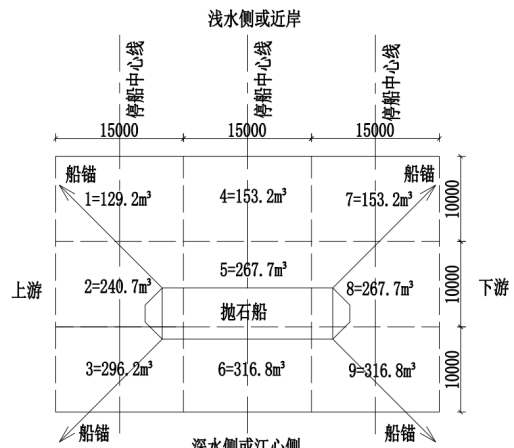
(4) 施工安全性问题:深水环境和高流速条件下,作业人员安全风险高,设备稳定性要求严格。

(5) 施工效率问题:超深动水环境下的施工难度大,传统方法效率低下,工期难以保证。

二、超深动水环境下水下抛石施工技术研究与应用

(一) “网格法”水下抛石施工工艺

采用“网格法”进行块石抛填,将抛填区按船只大小划分网格,每个网格进行编号,按实测地形、设计图纸计算出各网格抛填量。遵循“勤测量、勤补抛、宁欠抛、勿超抛、少抛投、多次抛”原则确保水下抛石落点位置准确,保证设计坡度。“网格法”如图一。



图例(网格编号=网格抛石量: 1=129.2m³)

图一: “网格法”示意图

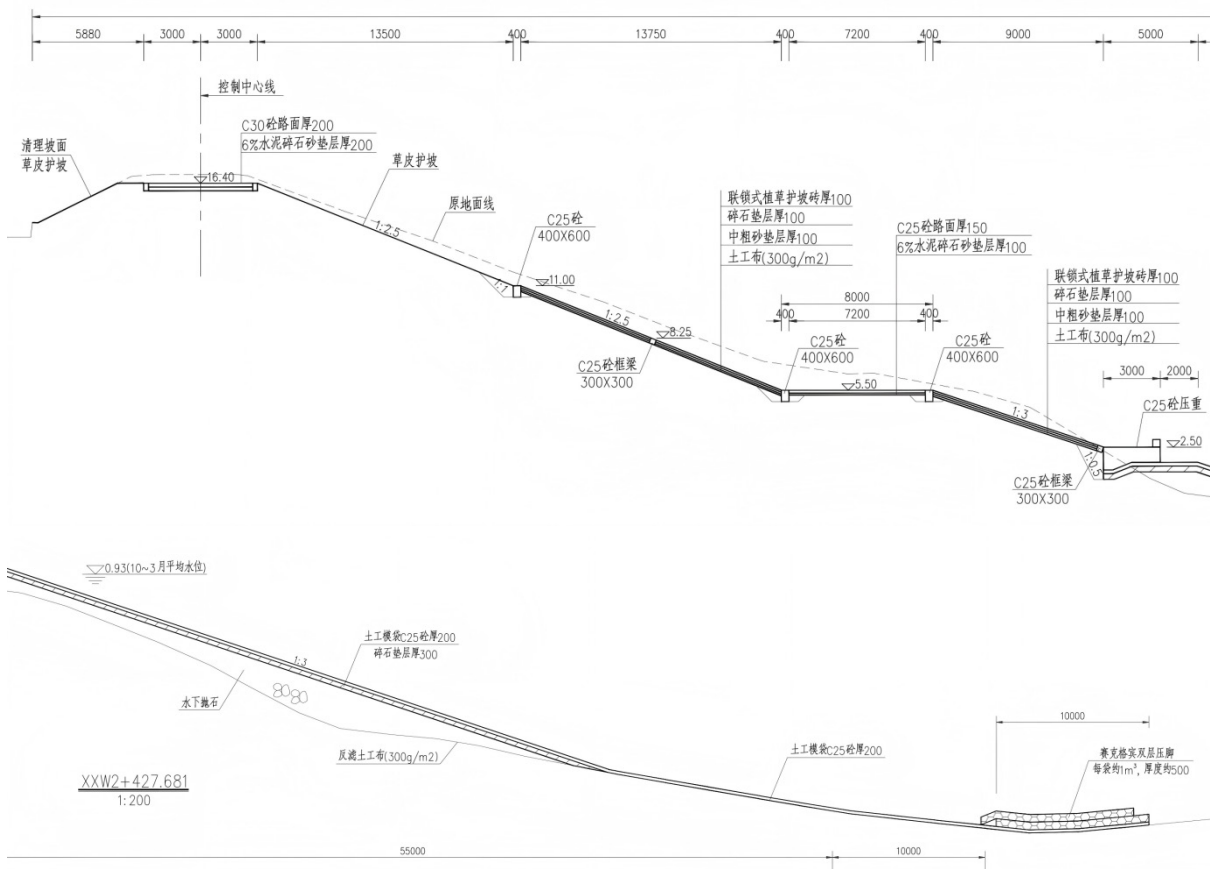
(二) 抛石材料选择与质量控制

抛石材料选择上，抛填块石重量控制在 35-80kg 之间，抛投时级配大于 60kg 占 75% 以上；块石采用坚固耐久的微风化或新鲜磨石，其抗压强度 \geq MU50，软化系数 $K_d > 0.75$ 。对不大于 1m 的薄基床宜采用较小的石块，应用轮船在水上定位后分层平抛，每层厚度不宜大于 2.5m。当抛石体达到固定断面高程，对于块石间不平整部分，用级配碎石填充，其级配碎石层高程偏差控制在 $\pm 100\text{mm}$ 以内，采用二级级配 5mm-20mm 和 20mm-40mm，最大粒径 40mm，其中 20mm-40mm 含量不少于 40%。石料需分批次送检有资质的单位，重点对块石密度等指标进

行试验检测，监理单位见证并抽样送至不同的检测单位进行平行检测，两次检测结果相互印证。

(三) 抗冲刷性能验证与优化

通过 CFD 模拟分析，项目团队验证了不同粒径块石在不同流速条件下的沉降时间和漂距关系。模拟结果表明，当块石粒径大于等于 0.26m 时，块石在下落过程中漂移现象并不显著。在 2.0m/s 流速下，大粒径块石首先开始沉降且水平漂距较近，小粒径块石沉降时间较长并且水平漂距相对较远，但通过“网格法”精准控制，可以有效减少抛石漂移，保证抛石厚度和范围符合设计要求。抛石典型断面如图二。



图二：抛石典型断面图

(四) 水下机器人抛石扫描检测技术

为突破传统水下地形测量方法在超深动水环境下精度低、成本高、风险大的瓶颈，创新引入了水下机器人 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 搭载多波束声呐系统，对水下抛石区域进行高精度、高效率的扫描检测。技术优势与应用效果主要有：

(1) 高精度：多波束声呐的测量精度远高于传统单波束测深仪，平面定位精度可达厘米级，高程精度可达分米级，能够精确反映抛石体的形态和厚度。

(2) 高效率：ROV 可连续作业，扫描速度快，覆盖范围广，单次作业可完成大面积区域的扫描，显著提高了检测效率。

安全性：ROV 作业完全取代了传统的潜水员水下探

摸，彻底消除了深水、高流速环境下的潜水作业风险，保障了人员安全。

(3) 可视化：ROV 搭载的高清摄像头可实时回传水下影像，结合三维点云模型，实现了水下施工过程的可视化，便于管理人员直观了解施工情况。水下影像如图三。

(4) 数字化：扫描数据以数字化形式存储，便于长期保存、追溯和分析，为工程验收和后期运维提供了可靠的数据支持。

在本项目中，水下机器人抛石扫描技术的应用，使抛石质量检测的精度提高了 50% 以上，检测周期缩短了 60%，检测成本降低了 30%。通过实时反馈和动态调整，有效避免了返工和补抛，进一步提升了施工质量控制水平，为超深动水环境下隐蔽工程的质量检测树立了新的标杆。



图三：水下摄影

三、超深动水环境下模袋混凝土护岸施工技术研究与应用

(一) “先灌后铺法”新工艺原理与优势

针对超深动水环境下的模袋混凝土护岸施工，应用“先水上浇筑后水下摊铺”的工艺，模袋布展铺、混凝土充灌等关键工序全部在摊铺板上完成，达到陆上作业的效果，施工全过程可视化，如图四；该新工艺、新技术首次成功应用于本项目，施工质量、安全、精度等方面有保证，并且缩短了工期，节约了成本，有效解决了传统潜灌法（先铺后灌法）在水深超过10m时的施工难题。

(二) 深水护岸摊铺船设计与制造

组织各参建单位成功研发了一种用于深水护岸的专业化施工设备—深水护岸摊铺船。深水护岸摊铺船由2艘700t散货船（44m×9m）通过3条横梁连接形成的“双体船”及1块沉放摊铺板（40m×6m，重63t）组成。该设备设计如图五。



图四：超深动水环境下模袋混凝土摊铺施工



图五：深水护岸摊铺船

(三) 模袋混凝土技术指标

模袋采用矩形无滤点模袋充实厚度最小处为200mm

的锦纶、涤纶，重量>500g/m，等效孔径 $O_{95}<0.25\text{mm}^2$ ；抗拉强度：纵向>2200N/5cm，横向>2000N/5cm，垂直渗透系数> $1.0\times 10^{-2}\sim 5\times 10^{-3}\text{cm/s}$ ，CBR项破强度>4000N。

模袋进行施工前进行试验段试验，调整每块模袋的宽度灌口间距等工艺参数，试验宽度为16m。泵送混凝土强度等级为C25，塌落度>20cm，水下砼掺入适量分散剂，在模袋内混凝土要求充填密实。模袋铺设前坡面应按设计断面进行理坡抛石表面采用碎石进行整平；坡面表面水下不大于150mm，水上不大于100mm。模袋砼压边后，水上采用现浇C25砼压项，水下采用赛克格宾压脚，每个制面至少 10m^2 截面面积的赛克格宾压脚。

(四) 施工工艺创新与应用效果

“先水上浇筑后水下摊铺”的工艺，模袋布展铺、混凝土充灌等关键工序全部在摊铺板上完成，陆上作业占比提升至80%以上，施工效率显著提高。在西江干流治理工程（高要区标段）项目中，该工艺成功应用于最大施工水深达33.58m的区域，单幅模袋混凝土最长达127.95m，有效解决了超深动水环境下的施工难题。该新工艺、新技术首次成功应用于本项目，施工质量、安全、精度等方面有保证，并且缩短了工期，节约了成本。

四、未来应用前景

项目关键技术的研究与应用为超深动水环境下的护岸施工提供了技术参考和实践指导，具有显著的推广价值：

(1) 水下抛石“网格法”施工工艺可推广应用于其他水深超过10m的河道治理工程，提高抛石施工的精准度和效率。

(2) 深水护岸摊铺船的研发为超深动水环境下的模袋混凝土施工提供了设备支持，可推广应用于其他深水护岸工程。

(3) 水下机器人抛石扫描技术为水下隐蔽工程质量检测提供了全新的解决方案，可推广应用于水下基础、护坦、沉箱等隐蔽工程的质量检测，实现检测过程的可视化、数字化和精准化。

参考文献

[1] 田正宏，迟福海，肖洋，等．长江南京段砂袋深水护岸施工技术[J]．施工技术，2013，42(21)：47-50。
 [2] 张姝，刘进关．高压喷射灌浆技术在水利工程建设中的应用研究[J]．现代工程科技，2025，4(16)：137-140。
 [3] 陈先义．超深动水环境下模袋混凝土护岸施工技术[J]．广东水利水电，2024，(07)：77-82+98。
 [4] 王继宗．超深动水环境下模袋混凝土护岸施工工艺探索[J]．工程技术研究，2025，10(10)：97-99。
 [5] 陈剑亮．临江软基承压水环境下超深基坑的地源热泵埋管施工关键技术[J]．建筑施工，2016，38(05)：607-609。
 作者简介：彭锦华(1976.04-)，男，汉族，广东肇庆，本科，高级工程师，主要从事建筑工程管理。