

装配重力式混凝土护岸结构的设计及施工

顾宽海¹, 汪 涛², 陈明阳¹, 叶上扬¹

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

摘要: 装配式建筑施工效率高、质量可靠, 且符合国家提倡的绿色低碳、可持续的发展理念, 是未来发展的方向。结合近年来我国现有装配重力式混凝土护岸结构工程实例, 通过对结构选型、构件拆分、构件连接、模具组合、运输吊装等关键技术进行全面、系统的研究分析和提炼, 形成成套技术。该技术可为装配重力式混凝土护岸结构的设计和施工提供安全可靠、经济适用、示范性强的方法。

关键词: 装配式; 重力式护岸结构; 构件拆分; 构件连接

中图分类号: U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0006-07

Design and construction method of assembly gravity concrete bank revetment structure

GU Kuan-hai¹, WANG Tao², CHEN Ming-yang¹, YE Shang-yang¹

(1.CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2.CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The assembly building has high construction efficiency, reliable quality, and conforms to the green, low-carbon and sustainable development concept advocated by the country. Thus it is the direction of future development. This article combines the existing engineering examples of the assembly gravity concrete bank revetment structure in my country in recent years, and forms a complete set of technology through comprehensive and systematic research, analysis, and refinement of key technologies such as structure selection, component disassembly, component connection, mold assembly, transportation, and hoisting, etc. This technology can provide a safe, reliable, economical, and demonstrative method for the design and construction of the assembled gravity concrete bank revetment structure.

Keywords: assembly; gravity bank revetment structure; component disassembly; component connection

护岸结构是一种防御波浪和水流对岸坡和陆域的侵袭、保障陆域人员和基础设施安全的水工建筑物^[1], 常用的结构形式主要有现浇 L型挡墙护岸、现浇扶壁挡墙护岸、预制方块护岸等。近年来, 随着社会经济的快速发展, 人们越来越期望工程建设符合绿色低碳、可持续的发展理念^[2]。传统现浇混凝土结构护岸建设存在生产效率低、施工周期长、环境负面影响大等缺点, 越来越难以适应新时期发展的需要。

为推动绿色低碳、可持续的发展理念, 《“十三五”国家科技创新规划》和《国家中长期科学和技术发展规划纲要》明确提出, 应加强绿色建筑设计技术和服务研究, 特别是装配式建筑设计理论、技术体系和施工方法研究, 相关主管部门已率先开展了装配式建筑技术的研究和应用^[3-5]。目前, 在工民建、市政领域中, 装配化、智能化建造技术在大力推进, 涉及设计、生产、施工安装、监测检测、运营维护等全产业链流程, 并形

成了一些技术标准, 出现了装配化、智能化建造的雏形和代表, 如预制 PC 构件的自动化流水生产线、机电液一体化施工装备、BIM 信息技术的应用等。但在水运工程领域中, 挡土高度相对较低的水工护岸装配式结构不像挡土高度较高的重力式沉箱码头和方块码头等装配式结构应用较多且较成熟, 其技术研究相对较少, 尚未形成完整的技术体系和技术方法, 深入、系统地开展相关设计和施工技术研究, 对促进水运工程建设转型发展, 适应水运发展新形势具有重要意义。

本文基于对国内装配重力式护岸结构案例的调研, 进行全面、系统的研究分析和提炼, 形成装配重力式混凝土护岸结构成套技术方法以及完整技术体系, 可为装配重力式混凝土护岸结构的设计和施工提供示范作用, 促进水运工程建设转型发展。

1 装配重力式混凝土护岸结构设计建造的特点、难点

1) 装配式护岸结构选型考虑因素多。

在传统的护岸设计中, 常考虑自然条件、材料来源、使用要求和施工条件等因素进行多方案比选, 择优选用结构方案即可, 一般不是十分注重结构是否简单且便于拆分与运输等因素。可装配式护岸结构具有自身的特点, 除考虑常规的设计因素外, 还要考虑选用的结构是否便于标准化设计、工厂化生产、机械化施工, 即可推广、可预制。因此, 不是所有重力式护岸结构形式都具备该条件, 结构选型须多方考虑。

2) 装配式结构构件拆分与连接是装配式结构成败的关键。

传统的护岸结构是在现场陆地施工, 一般不受工厂制作条件、运输条件等限制, 而装配化结构将陆地工作搬到厂内工作, 势必受到工厂制作条件、运输条件等限制, 如预制工厂吊车的起吊质量会影响构件质量, 运输方式会影响构件的质量和尺寸等。为满足各种限制条件常需对结构进行拆分, 不是简单随意的拆分, 若拆分不好会影

响结构的安全性和稳定性等。另外, 在拆分合理、可行的前提下, 一般还要求有可靠、施工便捷的连接方式。这对拆分和连接均提出很高要求, 也是装配式护岸结构需要重点解决的技术难点之一。

3) 预制生产、安装等施工技术决定成本与效率。

装配式结构是采用工厂化生产、机械化施工, 每个环节均影响施工效率、施工质量和成本等。为提高预制效率和降低预制成本, 一般要求预制模具能够多次周转使用, 最好还可根据不同模数进行任意组合预制。同时, 大量的预制构件要运至现场并进行安装, 常要求选取便捷、经济的运输与吊运方式, 如何选取符合高要求的模具和吊运安装也成为了施工的关键点。

2 关键技术

2.1 结构选型

装配重力式混凝土护岸结构是通过现场安装、可靠连接预制构件形成的护岸结构, 通过标准化设计、工厂化预制、机械化施工来实现, 具有施工效率高、工期短、节省劳动力、节能环保等优势^[6]。结构复杂不便于合理拆分的结构, 难以实现大规模复制、批量生产, 并不是所有传统的重力式混凝土护岸结构均符合上述条件。例如, 传统的大体积重力式素混凝土护岸, 从上到下变截面, 无论从纵向还是横向去拆分均较难标准化, 不太适合装配化。

根据自然条件、材料来源、使用要求、施工条件、预制与运输条件及生态要求, 结合所收集的装配式护岸技术方案, 分析总结出较利于开展装配化的重力式混凝土护岸结构主要有: 装配式预制挡墙护岸结构、装配式方块护岸结构、装配式空箱护岸结构。其中, 装配式预制挡墙护岸结构又分为装配式预制 L 型护岸结构和装配式预制扶壁式护岸结构, 装配式空箱护岸结构又分为装配式单层空箱护岸结构和装配式多层空箱护岸结构^[7], 具体结构断面见图 1, 基本特征见表 1。

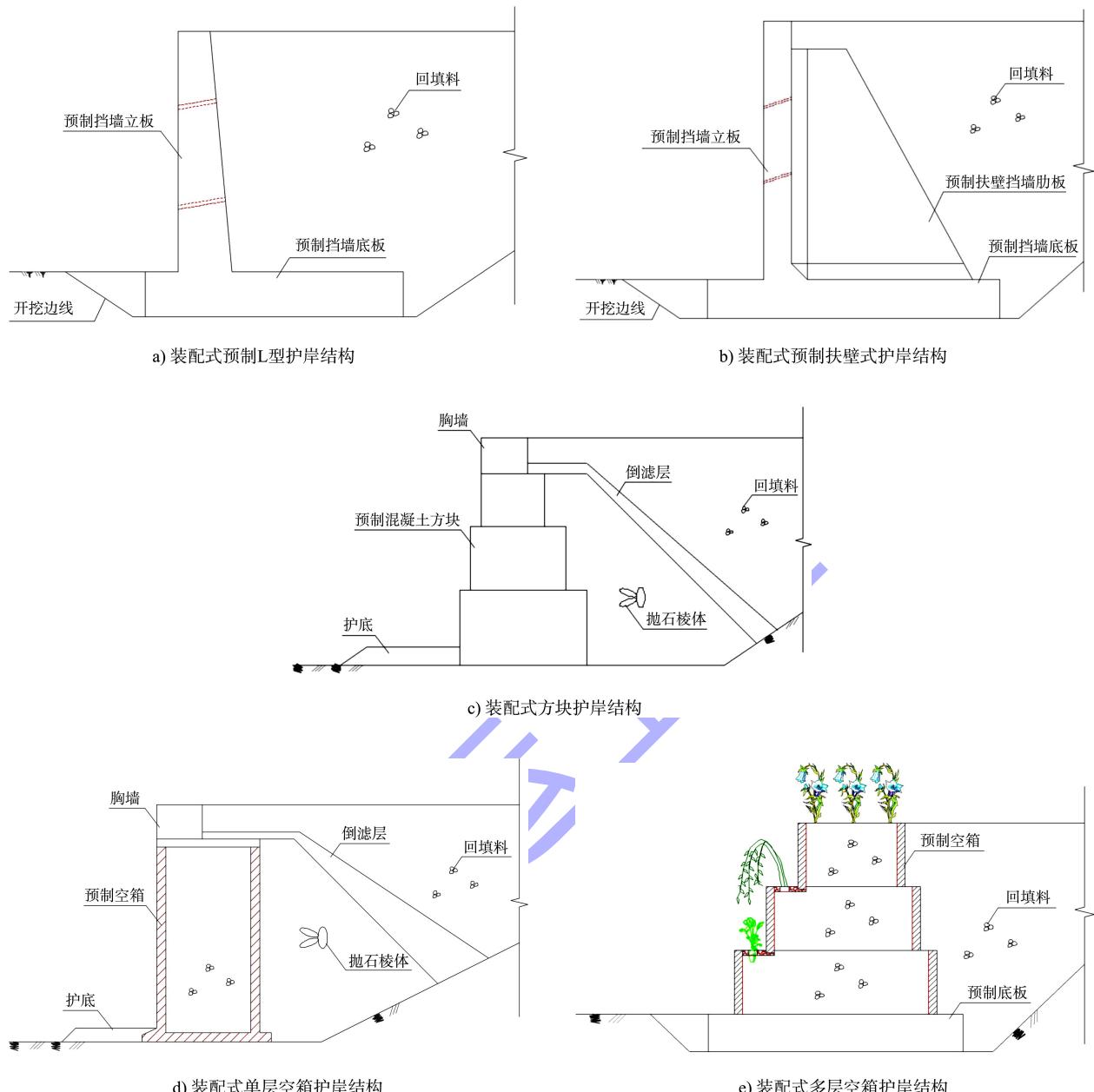


图 1 装配重力式混凝土护岸结构形式

表 1 各种装配重力式混凝土护岸结构基本特征

结构	适用范围	技术特点
装配式预制 L 型护岸结构	地基承载力较高, 挡土高度较小, 浪流较大, 环境生态要求较低的护岸工程	预制构件简单, 可拆分为整体 L 型、立板和底板, 构件厚度小、自质量较小, 施工工艺简单
装配式预制扶壁式护岸结构	地基承载力高, 挡土高度较高, 浪流较大, 环境生态要求较低的护岸工程	预制构件较简单, 可拆分为 T 板和底板, 构件厚度小、自质量较小, 施工工艺较简单
装配式方块护岸结构	地基承载力较高, 挡土高度较小, 浪流较小, 环境生态要求较低的护岸工程	预制构件简单, 为方块构件, 施工工艺简单, 缺点是自质量较大、混凝土工程量较大
装配式单层空箱护岸结构	地基承载力高, 挡土高度较高, 浪流较大, 环境生态要求较低的护岸工程	预制构件简单, 可为单体箱体构件, 结构能充分利用混凝土材料的力学性能, 空箱内回填各种填料, 施工工艺简单, 缺点自质量较大
装配式多层空箱护岸结构	地基承载力较高, 挡土高度较高, 浪流较小, 环境生态要求高的护岸工程	预制构件较简单, 为箱体构件, 结构能充分利用混凝土材料的力学性能, 空箱内回填各种填料, 结构生态环保、外观美观, 自质量较小, 施工工艺简单

2.2 预制构件拆分技术

与传统现浇混凝土护岸结构相比, 装配式重力式混凝土护岸结构采用工厂预制、运输至现场进行安装等。对装配式结构来说, 预制构件越大, 预制、安装等效率会越高, 工期会越短。实际上, 预制构件并不是越大越好, 其预制尺寸、形式、质量等受到预制条件、运输能力、运输方式、吊装能力等方面限制, 需要根据上述限制条件进行合理的结构拆分, 确保装配化结构可靠、顺利实施。一般可根据护岸结构形式选择整体预制式或结构分块预制, 例如: 装配式方块护岸结构和装配式多层空箱护岸结构, 其自身主要由块体或箱体组成, 较易采用整体预制的方式,

而装配式预制 L型护岸结构和装配式预制扶壁护岸结构, 一般结构分段长约 10 m, 一次性整体预制、运输比较困难, 也不利于吊装等, 需进行拆分。

通过对国内工程案例分析、研究及总结, 装配重力式混凝土护岸结构拆分后的预制构件主要包括 L型挡墙、立板、底板、混凝土方块、空箱块体等形式, 其拆分遵循的主要原则是: 1) 拆分接缝一般设置在构件受力较小的部位; 2) 拆分构件要符合模数协调原则, 预制构件的种类尽量少; 3) 拆分构件满足制作、储存、运输、施工、安装等要求。装配式重力式混凝土护岸结构常用构件形式特性见表 2。

表 2 装配重力式混凝土护岸结构常用构件形式特性

结构形式	构件组成	断面尺度/m	纵向长度/m	简图
装配式预制挡墙护岸结构	L型挡墙或立板(肋板)、底板	$2 \leq H \leq 7, 2 \leq L \leq 8$ 变化模数为 0.25	2.0~5.0	
装配式方块护岸结构	预制混凝土方块	$0.5 \leq H \leq 2, 0.5 \leq L \leq 3$ 变化模数为 0.5	1.0~3.0	
装配式空箱护岸结构	单层预制空箱块体	$2 \leq H \leq 6, 2 \leq L \leq 6$ 变化模数为 0.5	2.0~5.0	
	多层预制空箱块体	$0.5 \leq H \leq 1.5, 1.5 \leq L \leq 3$ 变化模数为 0.25	1.5~3.0	

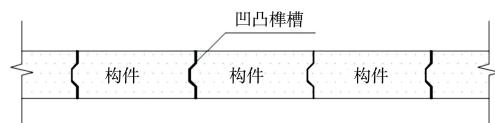
2.3 构件连接技术

受力明确、传力可靠、施工便捷、质量可控的连接方式是确保装配式护岸结构安全、稳定工作的关键。目前, 连接方式可分为湿法连接和干法连接, 湿法连接主要指预制构件通过现场后浇混凝土、水泥基灌浆等进行连接的方式, 结构性

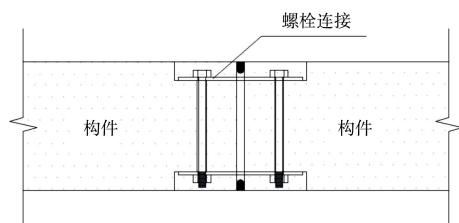
能等同于整体现浇混凝土结构; 干法连接主要指预制构件通过螺栓、法兰、焊接、凹凸榫槽等连接的方式, 该连接一般要进行节点与接缝承载力验算^[8-9]。

经分析总结, 装配式预制挡墙护岸结构的连接采用湿法连接和干法连接均有, 主要包括立板

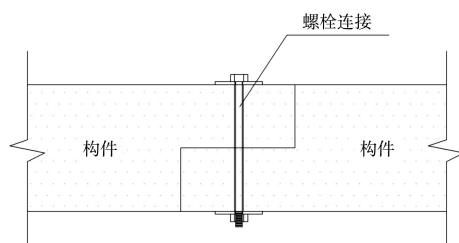
与底板之间的垂直连接和构件水平连接。垂直连接方式主要有套筒灌浆连接、浆锚搭接连接及垂直现浇混凝土连接等方式；水平连接主要有凹凸榫槽连接、螺栓连接、焊接连接、套筒灌浆连接、浆锚搭接连接及水平向现浇混凝土连接，连接方式见图 2。



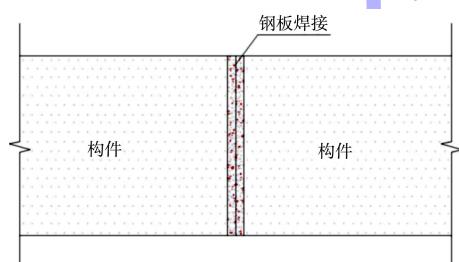
a) 凹凸榫槽连接平面



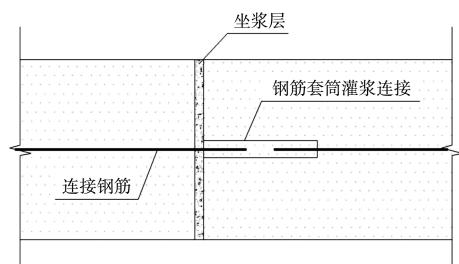
b) 螺栓连接方式一平面



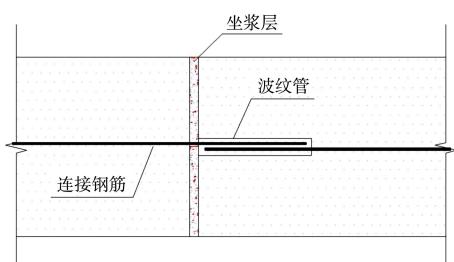
c) 螺栓连接方式二平面



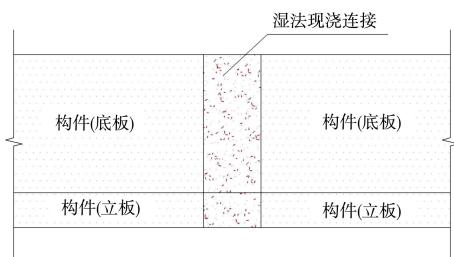
d) 焊接连接平面



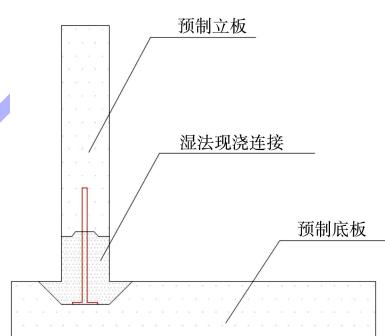
e) 套筒灌浆连接平面



f) 浆锚搭接连接平面



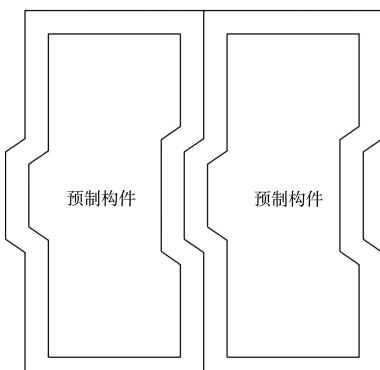
g) 水平向现浇混凝土连接平面



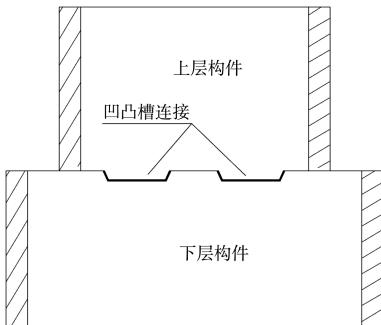
h) 垂直向现浇混凝土连接断面

图 2 装配式预制挡墙护岸结构构件连接

装配式空箱护岸结构的连接主要采用干法连接，主要包括同层构件间的水平连接以及上下层构件之间的竖向连接，构件间通过凹凸榫槽进行相互连接，见图 3。



a) 同层箱体构件连接平面



b) 上下层箱体构件连接断面

图 3 装配式空箱护岸结构构件连接

2.4 装配重力式混凝土护岸结构关键施工技术

2.4.1 组合模具

预制构件模具是装配式混凝土预制构件生产中非常重要的环节, 对构件的质量、生产周期和成本影响很大, 不仅要满足强度、刚度和整体稳定要求, 还应满足预制构件质量、生产工艺、模具组装与拆卸、周转次数要求; 满足预制构件预留孔洞、预埋件安装定位要求; 满足自身设置吊点等要求。因此, 为提高模板周转利用, 保证预制构件质量, 降低预制构件成本, 一维板式预制构件尽量采用流动钢台模, 二维和三维预制构件尽量采用独立钢台模。如某装配式 L 型护岸工程采用的二合一 L 型独立钢台模, 由底座、立模组成, 宽度和高度可根据不同预制构件模数进行调节组合, 为避免 L 型预制构件整体浇筑时出现振捣死角问题而影响质量, 将正常的“座式”改为“卧式”进行浇筑, 同时为确保模具整体稳定及提高浇筑效率, 将两组 L 型预制模具组合成一套模具, 一次浇筑两块构件。该模具浇筑质量可靠、拆卸方便、预制效率高, 见图 4。



a) 平视



b) 俯视

图 4 二合一 L 型独立钢台模

2.4.2 运输吊装

装配式护岸施工与传统现浇混凝土有所差异, 装配式护岸在进行施工时, 势必有大量预制构件运至施工现场, 并进行现场吊装。若采用公路运输, 预制构件不仅要考虑运输各种限制, 如 2.20~2.45 m 超宽限制、4.0 m 超高限制、20~30 t 超质量限制等, 而且要考虑运输过程中的行驶平稳性难以保证等问题, 运输效率低, 成本高, 相应的吊装也需采用陆上的轮胎吊车、履带吊车等设备。根据调研, 轮胎吊车费用低、效率高, 适用于便道通畅、作业场地条件好的小构件安装; 履带吊车起吊能力大、施工灵活, 但费用高, 适用于较大吨位构件安装。若采用水上运输及吊装, 不仅可充分发挥水上运输量大、运输平稳等优点, 而且可直达现场, 直接吊装施工, 施工效率高、经济性好, 优势明显。根据调研, 水上设备主要有全旋转浮吊和固定杆浮吊两种。全旋转浮吊施工效率高, 适用于小吨位(质量在 7 t 以下)构件安装; 固定杆浮吊起吊能力大, 吊距长, 适用于宽水域大吨位(质量在 30 t 以下)构件安装, 缺点是效率较低、费用较高。因此, 在装配式护岸施工时, 要充分考虑施工场地作业条件和周边运输条件, 尽量优先采用水上运输吊装方式, 吊运的预制构件质量宜控制在 10 t 左右, 以获得较高的综合效益。

2.4.3 垫层座浆施工

装配重力式混凝土护岸结构是一种座落于承载力较大的天然地基或人工地基上的结构, 按传统现浇混凝土结构的施工方法, 在主体结构浇筑

前, 地基上先铺设一定厚度的素混凝土垫层, 再进行立模浇筑。显然, 装配式预制构件安装前, 同样需要先铺设一定厚度的素混凝土垫层, 然而两者铺设的平整度要求是有区别的, 装配式的平整度要求一般是垫层顶面高程只允许低于设计高程而不允许高于设计高程, 即高程允许偏差为 $-10\sim0$ mm, 以确保构件安装精度。在实践中, 该要求施工效率低、质量不易控制。为此, 为满足预制构件安装对垫层平整度的要求, 提出一种施工效率高、易操作的座浆技术, 即: 在预制构件安装前, 地基基础先行浇筑约 100 mm 厚度的素混凝土垫层, 待垫层强度达到设计强度后, 再在每块预制构件底板下部铺设 20 mm 厚水泥砂浆座浆层, 垫层上设置 4 个钢制调平垫块, 并采用仪器抹平水泥砂浆座浆层。

3 工程案例

上述技术成果已在多个项目中成功应用, 不仅确保了装配式护岸结构安全、施工便捷高效、节能环保、经济合理, 而且促进了我国水运工程港口走资源节约的内涵式发展道路, 符合建设资源节约型和环境友好型社会的要求, 取得了较好的经济和社会效益, 装配式混凝土护岸结构成套技术方法具有广泛的行业应用前景。

1) 典型案例 1。湖南某护岸工程总长约 3 240 m, 考虑到该工程建设周期短、环保要求高, 同时该工程附近有现成的混凝土预制场, 并结合自然条件、施工条件等综合比选, 护岸断面采用了复合式断面, 其中直立部分采用装配重力式混凝土护岸结构, 现场施工照片见图 5。根据该结构形式、地基条件确定结构分段长为 10 m, 考虑到装配式构件要从预制场预制后运输至现场拼装, 河道不具备水运条件, 陆上运输道路、吊装条件也相对较差, 对结构分段进行拆分, 构件采用整体预制 L 型, 每构件总质量控制在 10 t 左右, 经复核, 每构件纵向长度在 2.5~3.0 m, 长度模数按 0.25 进行预制调整。构件连接采用凹凸榫槽连接方式, 垫层施工采用座浆工艺, 施工采用履带吊车进行安装。



图 5 案例 1 现场施工照片

2) 典型案例 2。江苏常州某Ⅲ级航道护岸工程长约 1 000 m, 为响应国家提出的节能、环保等建设要求, 积极开展护岸结构装配化应用研究。根据工程平面布置, 新建护岸结构所在场地地质条件良好、承载力较高、挡土高度较小, 且具备大开挖施工条件, 选择装配式多层空箱护岸结构, 现场施工照片见图 6。根据该结构形式、地基条件, 确定结构分段长为 12 m, 考虑该河道具备水运条件, 也考虑到吊运安装的效率, 对结构分段进行拆分, 构件分上下两个箱体, 上箱体 I 型构件宽 2 m、长 1.7 m、高 2 m; 下箱体 II 型构件宽 1.5 m、长 2.7 m、高 1.5 m, 每构件总质量控制在 6 t 左右。构件连接凹凸榫槽进行相互连接, 施工采用 25 t 全回转浮吊进行安装。



图 6 案例 2 现场施工照片

4 结论

1) 便于标准化设计、工厂化生产、机械化施工的装配重力式混凝土护岸结构形式主要有装配式预制 L 型护岸结构、装配式预制扶壁护岸结构、装配式方块护岸结构、装配式单层空箱护岸结构、装配式多层空箱护岸结构。