

内河航道重力式生态护岸的设计及应用

金罗斌¹, 刘勇军², 徐云¹, 李佳玮¹, 金彬彬¹

(1. 浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030; 2. 湖州市港航管理中心, 浙江 湖州 313000)

摘要: 内河航道护岸在保证耐久、安全、经济的基础上, 同时要兼具良好的生态和景观特性。通过浙江省限制性航道典型重力式护岸结构型式分析, 设计提出了一种开孔圆筒+T形插板的新型重力式生态护岸, 并在此基础上针对不同墙高, 对其结构特性进行分析。结果表明, 该护岸结构能满足整体稳定和应力强度要求, 具有生态景观效果好、施工速度快、消浪能力强、造价低等优点。

关键词: 内河航道; 重力式; 生态护岸; 结构特性; 生态景观

中图分类号: U617.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 12—0066—03

内河航道具有运能大、成本低、污染轻等优势。航道工程的建设, 对提升航道通过能力, 推进货物运输结构调整, 实现“碳达峰、碳中和”的总体目标具有重要的作用。

随着经济发展、人们日益增长的美好生活需要, 对航道建设也提出了更高、更新的要求, 希望将其打造为“安全耐久、舒适美观、生态和谐、服务优质”的美丽绿色航道。设计作为“品质工程”理念的先行者, 要大力推进设计标准化, 树立全寿命周期、动态设计理念, 从源头上为品质工程建设打下良好的基础。

浙江省拥有内河高等级航道里程 1669 公里, 已实现全省 11 个地市通江达海。杭嘉湖地区水系尤为发达、河网密布, 大部分航道为限制性航道, 考虑护岸的耐久性、适用性、经济性及浙江省内建设用地的紧缺现状, 采用的主要型式为直立式护岸。近年来改建的京杭运河、杭平申线等航道工程中, 衡重式、预制开孔沉箱、预制块体+加筋带、预制扶壁式等重力式护岸比较常见。

本文在我省典型的重力式护岸结构的基础上, 综合考虑设计标准化、经济合理性、生态景观性、施工便捷性、稳定耐久性等方面, 提出一种新型的重力式生态护岸结构型式, 并在此基础上针对不同墙高, 对其结构特性进行分析, 可为其他类似结构研究及应用提供参考和依据。

1 典型的重力式护岸结构型式

1.1 衡重式护岸

衡重式护岸挡墙迎水面常水位以上多采用浆砌面石、劈离块或条石贴面, 呈现天然装饰石料的效果, 整

体景观性较好, 且具有适用性广、抗冲刷能力强、后期维护方便的特点。但存在施工速度慢、机械化程度低、生态性较差等缺点。该类护岸在浙江京杭运河航道中较为普遍, 每延米工程造价约 6000 元。

1.2 预制开孔沉箱护岸

预制开孔沉箱护岸采用预制混凝土结构, 具有工厂化制作, 质量容易保证, 施工速度较快, 耐久性较好的特点, 且箱体内填筑片石, 常水位以下设有生态孔, 有利于水体交换和动物栖息, 生态性较好。但由于其整体预制, 重量相对较大, 对吊装起重要求较高。该类护岸在浙江湖嘉申线、长湖申线等航道中有应用, 每延米工程造价约 8800 元。

1.3 预制块体+加筋带护岸

预制块体+加筋带护岸为柔性结构, 迎水面的生态预制砌块多采用舒布洛克砌块或荣勋砌块, 具有工厂化制作, 质量容易保证, 砌块腔体内种植绿化后景观效果好的特点。但墙体后采用分层加筋带铺设, 土方分层压实, 施工速度慢; 预制块体间仅通过锚固棒及错缝衔接, 抗撞、抗冲刷能力较弱, 整体稳定性较差, 后期维护麻烦。该类护岸在浙江杭平申线航道中有应用, 每延米工程造价约 3500 元。

1.4 预制扶壁式护岸

预制扶壁式护岸整体采用预制结构, 配件采用工厂化制作, 质量较易保证, 通过吊装安放在碎石垫层上, 对安装精度要求较高, 耐久性相对较好。为了保证扶壁预制构件的整体性及耐久性, 其厚度较预制空箱结构大, 对吊装要求也较高。该类护岸在新坝船闸导航墙等航道工程中有应用, 每延米工程造价约 7000 元。

2 新型生态护岸结构型式

本文结合典型重力式护岸的特点,在箱体平面布置、结构形式、预制方式等方面优化改进,设计了一种开孔圆筒+T形插板的新型重力式生态护岸,在杭申线航道养护工程中进行试验研究,每延米工程造价约6000元。护岸钢筋砼底板厚0.5m,上部间隔布置预制钢筋砼圆筒,圆筒之间采用T型预制板连接,圆筒外径1.5m,筒壁厚0.16m,插板长度3m,厚0.2m,墙后设置顶高程为0.4m、坡度1:1.5的抛石棱体。

该护岸具有以下优点:

(1) 护岸底板上圆筒与T形插板交替布置,可节约工程材料,降低造价,且消浪效果好。

(2) 圆筒、插板和底板分节分块预制,以减小预制块体的重量,降低施工中对起吊能力的要求,施工方便快速且质量易保证。

(3) 圆筒内填筑片石,常水位以下设有生态孔,有利于水体交换和动物栖息,且顶部填土种植绿化,使护岸融入景观中,减小护岸混凝土面层的突兀感,生态景观效果好。

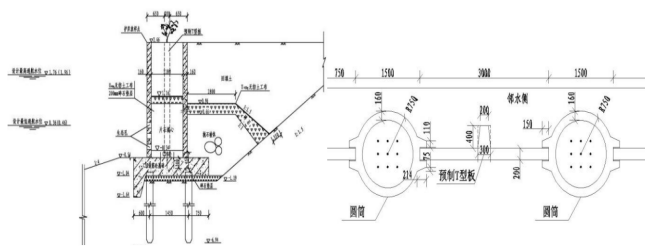


图1 开孔圆筒+T形插板护岸

3 计算原理

3.1 整体稳定性计算方法

3.1.1 抗滑稳定性验算

$$\gamma_o(\gamma_E \bullet E_H + \gamma_{Pw} \bullet P_w + \gamma_E \bullet E_{qH} + \Psi \gamma_{PR} \bullet P_{RH}) \leq \frac{1}{\gamma_d}(\gamma_G G + \gamma_E \bullet E_V + \gamma_E \bullet E_{qV})f$$

3.1.2 抗倾覆稳定性验算

$$\gamma_o(\gamma_E \bullet M_{EH} + \gamma_{Pw} \bullet M_{Pw} + \gamma_E \bullet M_{E_{qH}} + \Psi \gamma_{PR} \bullet M_{PR}) \leq \frac{1}{\gamma_d}(\gamma_G \bullet M_G + \gamma_E \bullet M_{EV} + \gamma_E \bullet M_{E_{qV}})$$

采用易工水运工程结构软件 V3.0 计算。

3.2 构件内力计算方法

采用迈达斯 MIDAS 公司开发的大型通用岩土有限元分析软件 Midas GTS NX v2017r1, 内力计算采用修正的莫尔-库伦模型。该模型对偏平面进行圆角处理,消除了分析过程中的不稳定因素,使计算的收敛性更好。

4 结构特性分析

4.1 稳定性分析

4.1.1 计算参数与工况

根据浙江杭嘉湖平原地区工程实际,护岸墙身高度选取2.7~5.2m范围,每0.5m为一级进行设计。护岸顶高程一般按设计最高通航水位加0.7m左右确定,设计最高通航水位与设计最低通航水位的差值一般在1.5m~1.9m。

填土重度18kN/m³,饱和重度19kN/m³,内摩擦角30°,外摩擦角10°;抛石棱体重度17kN/m³,饱和重度21kN/m³,内摩擦角45°,外摩擦角15°;底板与地面摩擦系数取0.40。设计荷载考虑人群荷载3.5kPa,后方防洪堤荷载为18kPa。

计算工况考虑持久组合设计高水位和设计低水位工况。

4.1.2 计算结果与分析

计算结果见表1。设计高水位时,抗滑安全系数Kc≥1.10,抗倾覆安全系数Ko≥2.25;设计低水位时,抗滑安全系数Kc≥1.04,抗倾覆安全系数Ko≥2.15。综上,该生态护岸的稳定安全系数均满足规范要求,最不利情况是设计低水位时的抗滑稳定性,可根据实际地质情况,通过在底板下增设前趾或打设桩基等方法提高抗滑稳定性。

表1 稳定性分析成果表

墙高 (m)	顶标高 (m)	底板顶标高 (m)	设计高水位 (m)	设计低水位 (m)	设计高水位		设计低水位	
					抗滑安全 系数 Kc	抗倾覆 安全系数 Ko	抗滑安全 系数 Kc	抗倾覆 安全系数 Ko
2.7	2.7	0	2.1	0.6	1.19	2.87	1.11	3.01
3.2	2.70	-0.50	2.10	0.30	1.12	2.54	1.07	2.65
3.7	3.20	-0.50	2.40	0.50	1.10	2.41	1.06	2.53
4.2	3.70	-0.50	2.90	1.00	1.14	2.44	1.07	2.46
4.7	4.20	-0.50	3.40	1.50	1.15	2.34	1.06	2.29
5.2	4.70	-0.50	3.90	2.00	1.15	2.25	1.04	2.15

4.2 内力计算分析

4.2.1 计算参数

对于圆筒、插板、底板等钢筋混凝土结构,由于弹性模量很大,可以视作弹性体,在模型中采用各项同性的弹性模型计算,混凝土材料重度25kN/m³,弹性模量30000MPa,泊松比0.30。各种材料的参数设置见表2。

4.2.2 计算结果与分析

图 2 给出了设计低水位工况下生态护岸下部底板和上部圆筒 + 插板的应力云图, 护岸整体应力自顶部到底部逐渐增大, 圆筒及插板与底板交接部分产生应力集中。不同墙身高度的计算结果见表 3, 底板承受最大压应力为 691.95kN/m^2 , 圆筒最大压应力为 1338.85kN/m^2 , 插板凸榫处最大压应力为 3075.30kN/m^2 , 皆小于 C30 混凝土的抗压强度值; 底板承受最大拉应力为 597.90kN/m^2 , 圆筒最大拉应力为 1089.94kN/m^2 , 插板最大拉应力为 825.18kN/m^2 。护岸构件预制均采用 C30 钢筋混凝土, 经复核能满足构件抗压、抗弯的要求。

表 2 土层材料模型参数表

地层名称	天然重度 γ (kN/m^3)	饱和重度 γ_{sat} (kN/m^3)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 ψ ($^\circ$)	压缩模量 E_s (MPa)
回填土	18.0	19.0	10	10	3.0
抛石棱体	17.0	21.0	0	45	12.25
粉土	18.42	19.0	11.4	28.1	11.0

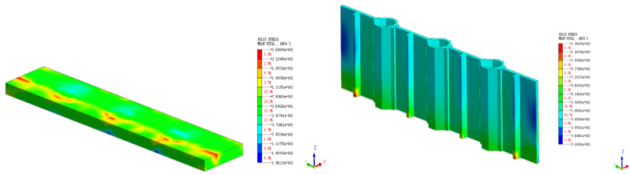


图 2 生态护岸下部底板和上部圆筒 + 插板应力云图

表 3 结构内力分析结果表

序号	圆筒高度 (m)	圆筒直径 (m)	插板长度 (m)	插板厚度 (m)	最大压应力 (kN/m^2)				最大拉应力 (kN/m^2)		
					底板	圆筒	插板	凸榫	底板	圆筒	插板
1	2.7	1.5	3	0.2	129.59	238.33	425.67	528.45	58.94	42.80	127.26
2	3.7	1.5	3	0.2	260.09	489.40	619.92	1342.09	184.90	142.14	512.48
3	4.7	1.5	3	0.2	481.22	826.12	1220.08	2167.58	456.76	500.79	556.45
4	5.2	1.5	3	0.2	691.95	1338.85	1860.03	3075.30	597.90	1089.94	825.18

5 结语

本文结合浙江省典型重力式护岸结构型式, 从生态性、景观性及标准化角度出发, 设计了一种开孔圆筒 + T 形插板的新型重力式生态护岸, 应用易工水运软件和 Midas 有限元分析软件分别进行稳定性验算和内力计算。主要结论如下:

(1) 该生态护岸工程造价低, 消浪效果好; 施工方便快速, 质量易保证; 可实现水体交换, 为动植物提供栖息场所, 圆筒顶部填土种植绿化, 可满足人们对生

态景观的需求, 经济效益和社会效益显著。

(2) 根据标准化原则, 将护岸分解成开孔圆筒、T 型插板及底板三部分, 通过计算复核, 确定墙身高度 $2.7 \sim 5.2\text{m}$ 的护岸结构尺寸, 为护岸标准化设计打下基础。

(3) 该生态护岸在外界荷载作用下, 不同墙身高度的稳定安全系数均大于允许值。为提高抗滑稳定性, 可采取在底板下增设前趾或打设桩基的方式。

(4) 该生态护岸的内力最大值集中在 T 型插板凸榫底部, 但仍能满足钢筋混凝土预制构件抗压、抗弯等要求。建议可以从圆筒直径、插板长度及截面形状等方面深入研究, 从而达到尽可能降低应力集中, 进一步提高结构安全性的效果。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. JTS167-2018 码头结构设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [2] 徐朝辉, 步海滨, 程巍华等. 内河航道生态护岸的发展及应用分析 [J]. 水运工程, 2009, 432(9): 107-110.
- [3] 朱胜辉. 试论生态护岸在航道整治工程中的应用 [J]. 中国水运, 2014, 14(2): 188-189.
- [4] 廖鹏, 丁天平, 郑龙等. 箱体与插板组合型生态护岸消浪试验研究 [J]. 东南大学学报, 2018, 48(5): 815-820.

