

内河航道重力式生态护岸的设计及应用

刘勇军¹ 金罗斌² 李佳玮² 金彬彬²

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

[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的分析,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

1 引言

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 1669km,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紧缺的现状,采用的主要型为直立式护岸。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。

2 典型的重力式护岸结构型式

根据浙北杭嘉湖平原地区工程实际,航道护岸墙身高度一般在 2.7~5.2m,以此作为本文护岸研究的墙高范围。

2.1 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、抗淘刷能力强、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 4500~9500 元。

2.2 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

收稿日期: 2021-12-03

作者简介: 刘勇军(1988-),男,工程师,主要从事航道工程建设管理。

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 5500~11000 元。

2.3 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 2000~6000 元。

2.4 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 5000~10000 元。

3 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 4000~8500 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。该护岸结构适用于硬黏土等地质条件较好的区域，软弱土层较厚的区域需进行地基处理。

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，施工方便快捷且质量易保证。

(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。

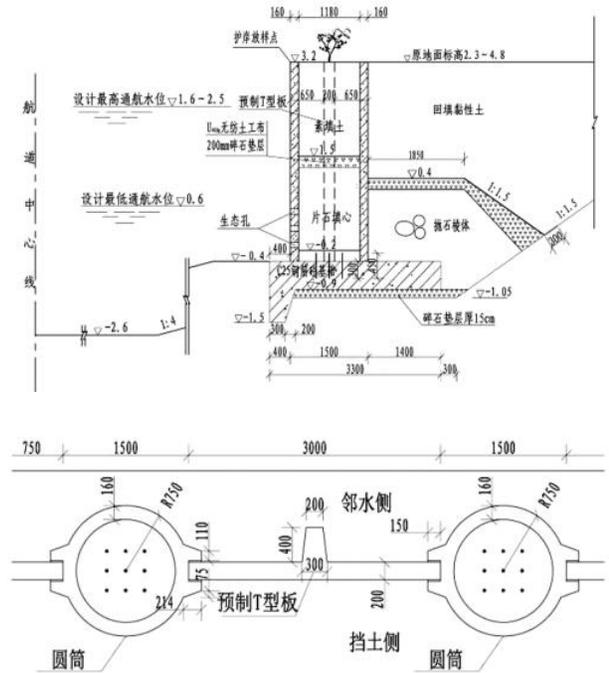


图 1 开孔圆筒+T形插板护岸

4 计算原理

4.1 整体稳定性计算方法

4.1.1 抗滑稳定性验算

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

4.1.2 抗倾覆稳定性验算

$$\gamma_o (\gamma_E \cdot M_{EH} + \gamma_{Pw} \cdot M_{Pw} + \gamma_E \cdot M_{EqH} + \Psi \gamma_{PR} \cdot M_{PR}) \leq \frac{1}{\gamma_d} (\gamma_G \cdot M_G + \gamma_E \cdot M_{EV} + \gamma_E \cdot M_{EqV})$$

采用易工水运工程结构软件 V3.0 计算。

4.2 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。

5 结构特性分析

5.1 稳定性分析

5.1.1 计算参数与工况

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/m^3 ，饱和重度 19kN/m^3 ，内摩擦角 30° ，外摩擦角 10° ；抛石棱体重度 17kN/m^3 ，饱和重度 21kN/m^3 ，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 。

施工期护岸墙后回填至抛石棱体标高后，要求采取墙前放水反压至设计低水位来保证护岸稳定性，故不再计算施工期工况，仅考虑持久组合设计高水位和设计低水位工况。

5.1.2 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 $K_c \geq 1.10$ ，抗倾覆安全系数 $K_o \geq 2.25$ ；设计低水位时，抗滑安全系数 $K_c \geq 1.04$ ，抗倾覆安全系数 $K_o \geq 2.15$ 。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 K_c	抗倾覆安全 系数 K_o	抗滑安全 系数 K_c	抗倾覆安全 系数 K_o
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

5.2 内力计算分析

5.2.1 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/m^3 ，弹性模量 30000MPa ，泊松比 0.30。各种材料的参数设置见表 2。

5.2.2 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

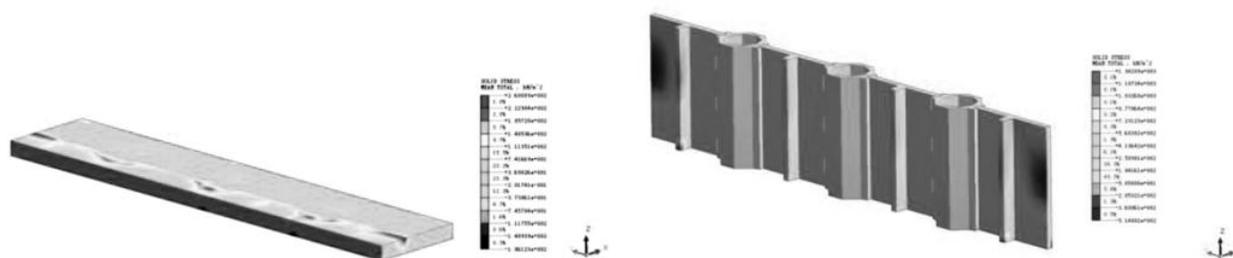


图2 生态护岸下部底板和上部圆筒+插板应力云图

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

6 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;施工方便快捷,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 2.7~5.2m 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.
- [5] 宋睿,高礼洪.生态型鱼槽砖应用研究 [J]. 城市道桥与防洪,2014,11(3):200-202.