

半圆体结构在长江深水航道 整治工程中的应用

赵凯, 罗少桢, 王效远

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 在长江深水航道一期工程白茆沙整治工程中, 部分堤身采用了半圆体混合堤结构。根据工程实际情况, 对堤身结构选型进行了比较分析, 对半圆体结构受力和构造进行分析研究。工程实践运用表明, 该结构稳定性优, 实现了整治建筑物的功能要求, 应用效果良好。

关键词: 半圆体; 受力分析; 结构设计; 整治工程

中图分类号: U 653; TP 72

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)10-0141-05

Application of semi-circular structures in the Yangtze River deepwater channel regulation project

ZHAO Kai, LUO Shao-zhen, WANG Xiao-yuan

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The semi-circular structures were used as part of the dam body of Baimaoshan waterway regulation engineering of the Yangtze River deepwater channel phase I project. According to the actual working conditions, this paper analyzed and compared different options of dike structure types, and recommended the semi-circular structures as a selection scheme. Based on this, the force and construction of semi-circular structures were further analyzed and the results were shown and verified by practice. The practical application showed that the structures owned the feature of excellent stability, and well achieved the functional requirements of the engineering.

Keywords: semi-circular structures; force analysis; structure design; regulation engineering

半圆型防波堤是 20 世纪 90 年代由日本开发的一种新型结构形式, 1992 年在宫崎港建造了总长 36 m 的半圆型结构试验堤^[1]。该结构由半圆形拱圈和底板组成, 由于其上部拱形的形状特点, 该结构比传统的直立防波堤受力性能更优, 自身所受波浪力较小, 抗滑抗倾稳定性好, 堤身断面更经济, 应用前景广阔, 类似结构在我国天津港防波堤和长江口治理工程导堤工程^[2]中已有应用。

1 工程概况

长江南京以下 12.5 m 深水航道建设工程一期工程, 主要通过实施长江太仓至南通河段洲滩关键部位守护工程并结合疏浚措施, 实现 12.5 m 深水航道延至南通, 航道整治工程主要包括通州沙、白茆沙整治工程, 白茆沙整治工程建筑物主要包括白茆沙南堤、北堤、头部潜堤及南侧齿坝等, 整治建筑物布置见图 1。头部潜堤长约 3.5 km, 南侧齿坝 S1、S2、S3 长度分别为 1 300、1 600、

收稿日期: 2016-06-16

作者简介: 赵凯 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道工程设计研究工作。

800 m, 南堤、北堤沿 0 m 等高线附近布置, 南堤、北堤长约 8.8 km。

2 堤身结构选型

2.1 设计条件

设计水位为: 极端高水位 4.53 m, 设计高水位 2.56 m, 设计低水位 -0.75 m, 极端低水位 -1.69 m。

设计波要素见表 1。

表 1 设计波要素

分类	水位/m	$H_{1\%}$ /m	$H_{4\%}$ /m	$H_{5\%}$ /m	$H_{13\%}$ /m	\bar{H} /m	\bar{T} /s
极端高水位	4.53	2.76	2.34	2.26	1.89	1.20	6.01
设计高水位	2.56	2.70	2.28	2.21	1.85	1.17	5.94
设计低水位	-0.75	2.63	2.23	2.16	1.81	1.16	5.89
极端低水位	-1.69	2.58	2.19	2.12	1.78	1.14	5.83

2.2 堤身结构选型

根据总平面布置要求, 白茆沙堤身高度在 3~13 m, 河床主要为粉细砂, 承载力一般, 白茆沙整治工程水工建筑物功能主要为固沙稳槽、导流增深, 结合地质和水流特点分析, 直立式结构形式对地基要求高, 不适用本工程, 因此选择对地基要求较低、对水流流态影响较小的斜坡式结构形式和混合式结构形式。由于砂源匮乏, 袋装砂堤心耐久性较差, 施工工序和难度较抛石堤复杂, 选择抛石堤心作为斜坡堤方案, 典型断面见图 2。半圆形状受波浪力小、对地基要求低, 选择半圆体结构作为混合堤方案, 典型断面见图 3。

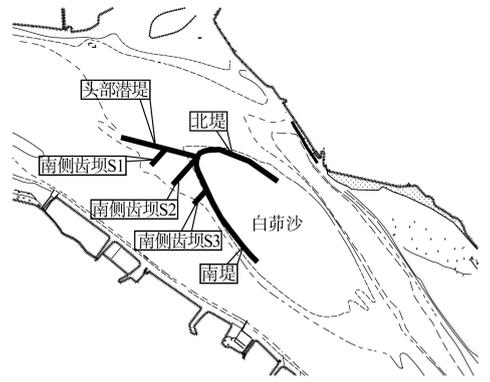


图 1 白茆沙整治建筑物布置

根据工程区的自然和地质条件, 针对抛石斜坡堤和半圆体混合堤两种形式的不同高度进行断面设计, 对比分析每延米造价(图 4)。从比较结果来看, 当堤身高度超过 6.5 m 时, 半圆体混合堤比抛石斜坡堤更经济, 若再考虑本工程规模大, 全部采用抛石斜坡堤结构, 石料用量巨大, 会导致石料价格上涨, 半圆体混合堤在堤身较高区间经济性将更加明显。因此, 在本工程中对于水深较浅处采用抛石斜坡堤结构, 对于水深较大处采用半圆体混合堤结构的方案是合理的, 实际设计中在堤身高度大于 7 m 的南侧齿坝 S2、S3 采用半圆体混合堤结构, 长度约 1.2 km。

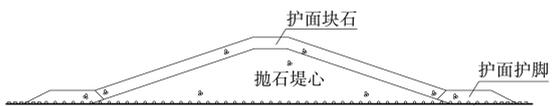


图 2 抛石斜坡堤典型断面

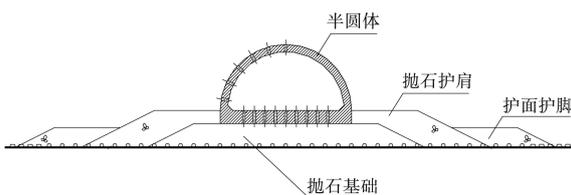


图 3 半圆体混合堤典型断面

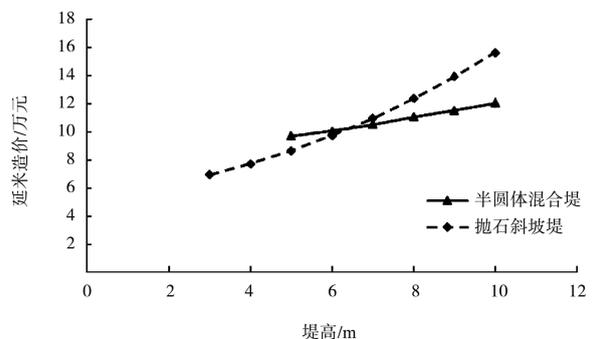


图 4 不同堤高典型断面造价比较

3 半圆体受力分析

3.1 波浪力作用

波浪力根据 JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》中有关半圆型防波堤波浪力公式计算, 先按照与半圆形堤相同水深、相同基床高度和相同堤顶高程的直立堤计算, 再进行相位修正和角度修正, 计算过程见图 5。

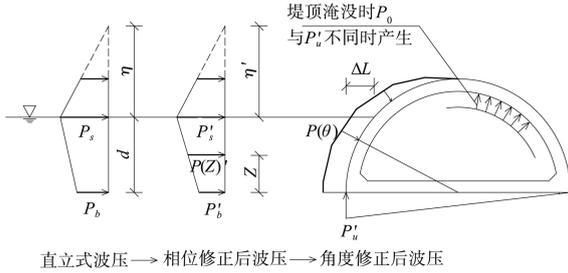


图 5 半圆体波压力分布及计算过程

由于白茆沙整治工程水位差较大, 齿坝顶高程范围又从 $-7.0 \sim 1.0 \text{ m}$, 因此, 堤顶高程高于或低于计算水位的情况均有可能发生, 当堤顶高程高于计算水位 0.7 倍设计波高时, 相位修正系数为:

$$\lambda_p = \cos^4\left(\frac{2\pi\Delta L}{L}\right) \quad (1)$$

当堤顶高程位于或低于计算水位时相位修正系数为:

$$\lambda_p' = \cos\left[\frac{2\pi(\Delta L)'}{L}\right] \quad (2)$$

波峰作用于半圆型堤面上各点的波压力强度, 其方向垂直于堤面, 进行角度修正

$$P(\theta) = P(Z)' \cos\theta \quad (3)$$

式中: λ_p 为相位修正系数; ΔL 为半圆型堤面上的 P_s' 与 P_b' 作用点间的水平距离 (m); θ 为波压作用点的圆心角 ($^\circ$); $P(\theta)$ 为经角度修正后的堤面波压力强度 (kPa); $P(Z)'$ 为经相位修正后 Z 点的波压力强度 (kPa)。

各工况水平波浪力计算结果见表 2。

表 2 各工况水平波浪力计算结果 kN

工况	修正前水平波浪力	修正后水平波浪力
极端高水位	81.84	64.52
设计高水位	97.29	72.90
设计低水位	122.56	101.50
极端低水位	116.89	102.42

根据实际极端低水位工况计算波压力分布见图 6。

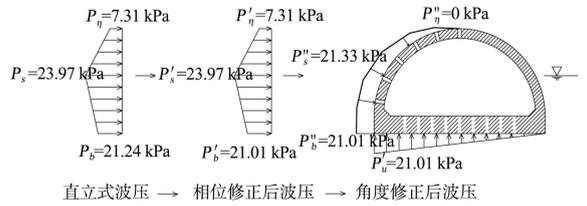


图 6 波压力分布及计算过程

从水平波浪力计算结果可以看出, 通过相位修正及角度修正, 作用于半圆体上的水平波浪力比直立堤计算方法计算所得的水平波浪力小, 两者比值为 $0.75 \sim 0.88$, 可见同等条件下, 半圆体结构受波浪力比直立堤小, 因此半圆体结构能够减少堤身重力, 从而提高堤身经济性。

3.2 水流力作用

在以往半圆形防波堤的设计中很少考虑水流力的作用, 本工程由于所处河段为长江下游, 不仅波浪较大, 径流作用也比较明显, 因此还需要考虑半圆体所受水流力作用。目前, 对于半圆体堤身水流力变化规律及计算方法尚不清晰, 根据国内外有关水流力计算的研究成果, 目前采用的计算公式结构上基本一致, 只是对于水流阻力系数选取不同。

$$F = K\rho A \cdot \frac{v^2}{2} \quad (4)$$

式中: F 为水流力标准值 (kN); K 为水流阻力系数; A 为计算构件垂直于流动方向的投影面积 (m^2); v 为水流设计流速 (m/s); ρ 为水密度 (t/m^3)。

由于本工程水位变化范围大, 齿坝堤顶高程也是变化的, 所以半圆体堤身淹没和出露的情况都会发生, 水流阻力系数涉及到流速和堤高水深比等多种因素, 情况较为复杂, 根据试验^[3]测量得到的水流力反算水流阻力系数在 $11 \sim 23$, 选取最大值 23 作为计算半圆体水流力用的水流阻力系数。另外, 试验结果还表明, 相对堤长 b/B (b 为堤长, B 为河宽) 对水流力影响较大, 同等条件下, 堤身只占部分河宽情况如齿坝或丁坝等, 实际所受水流力比堤身横贯河流的情况 ($b/B = 1$) 如

潜坝、锁坝等所受水流力要小，相对堤长越小，水流力折减越厉害，水流力折减系数和相对堤长关系见图7。

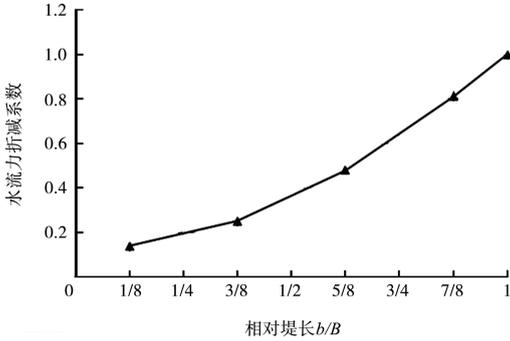


图7 半圆体构件相对堤长对水流力影响

本工程半圆体结构所在的齿坝并没有横贯整个河宽，相对堤长 b/B 约 1/8 左右，因此，水流力折减系数为 0.14，综合考虑水流力阻力系数和折减系数相乘为 3.22，比 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》中规定的矩形梁水流阻力系数 2.32 大，各水位水流力计算结果见表3。

表3 各工况水流力计算结果

工况	水流力/kN
极端高水位	33.01
设计高水位	33.01
设计低水位	21.45
极端低水位	15.25

从波浪力和水流力比值看，本工程波浪力仍占主导作用，半圆体结构对承受波浪力有优势，选择结构形式合适，根据物理模型试验结果，半圆体在波浪和水流共同作用下能够保持稳定。

3.3 内力分析

通过有限元软件对半圆体构件进行内力分析，运用工况受波浪、水流力作用，另外半圆体构件较大，还需考虑吊装工况，两种工况内力分布分别见图8、9。从计算结果看，运用工况最大拉应力 0.94 MPa，吊运工况最大拉应力 1.21 MPa(仅在吊点附近的小范围内)，底板最大拉应力 0.54 MPa，拉应力都非常小，变形最大不超过 2 mm，可见半圆体构件受力性能好。

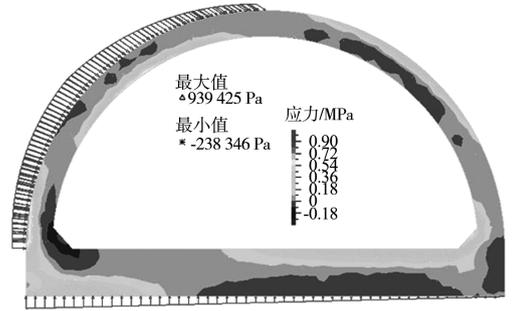


图8 运用工况最大拉应力



图9 吊运工况变形放大效果及横向应力

4 工程应用情况

在白茆沙整治工程 S2、S3 齿坝建筑物采用了半圆体混合堤结构，S2 应用长度 917 m，S3 应用长度 305 m，混合堤应用范围见图 10。

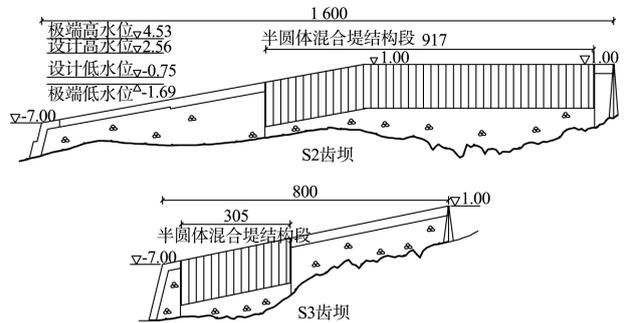


图10 半圆体混合堤应用范围 (高程: m; 尺寸: mm)

半圆体结构上部拱圈半径 5 m，下部直线段长度 1 m，堤身总高 6 m，堤身宽度 10 m，拱圈壁厚 0.55 m，底板厚 1.0 m，两侧不设突出的前后趾，单个构件质量约 160 t。半圆体两侧为 5 m 宽抛石护肩，下部为 1~4 m 厚抛石基床，基床下为砂肋软体排，两侧为宽 5 m 抛石护脚。根据相关试验研究^[4]，在高水位情况下，开孔形式及开孔与否，对总水平力影响不大，在平顶水位和低水位时，开长条孔受力大于圆孔和不开孔情况，结合工程实际条

件, 在底板布置直径为 320 mm 的圆形排水孔, 开孔率为 10%, 拱圈上游侧布置直径为 320 mm 的圆形透气孔, 开孔率为 5%, 半圆体混合堤断面见图 11。

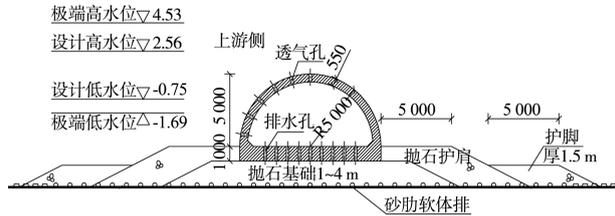


图 11 半圆体混合堤断面 (高程: m; 尺寸: mm)

半圆体混合堤施工快、工程景观好, 预制半圆体构件施工质量有保证, 半圆体结构段施工于 2013 年完成, 白茆沙整治工程于 2015 年竣工, 截至目前为止, 半圆体混合堤结构无失稳破坏现象, 稳定性优, 实现了整治建筑物的功能, 应用效果良好, 半圆体预制及施工见图 12。



图 12 半圆体应用

5 结语

1) 由于半圆体结构受波浪力小、稳定性能好、内部不填充填料, 适合于波浪较大、堤身高度较大、地基承载力比较低的工程。

2) 根据堤身形式比较可以看出, 堤身高度较大时, 半圆体混合堤结构比抛石斜坡堤结构形式经济性好, 白茆沙整治工程以提高 7 m 为分界点, 提高 7 m 以上采用半圆体混合堤, 7 m 以下采用抛石斜坡堤。

3) 从受力分析来看, 半圆体受波浪力较传统的直立式防波堤更小, 从而能够减少堤身重力, 提高堤身经济性。由于拱形结构特点, 半圆体构件自身所受拉应力较小。

4) 在以往半圆形防波堤的设计中很少考虑水流力的作用, 对于半圆体堤身水流力变化规律及计算反法尚不清晰, 还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 徐光, 谢善文, 李元音. 防波堤的新结构形式[J]. 水运工程, 2001(11): 20-25.
- [2] 谢世楞. 半圆型防波堤的设计和研发进展[J]. 中国工程科学, 2000(11): 216-226.
- [3] 南京水利科学研究院. 水流对新型混合堤结构作用的物模试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2015.
- [4] 郭科, 李梅英. 半圆型防波堤试验研究[J]. 中国港湾建设, 2000(6): 27-30.

(本文编辑 武亚庆)

编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygcc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。