

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.250487

基于水安全与生境营造相融合的湖泊堤岸生态化改造方案研究

濮 勋

(上海市水利工程设计研究有限公司,上海市 200232)

摘 要: 为研究风浪较大区域湖泊堤岸的生态化改造方案,以淀山湖堤防达标及岸线生态修复工程(一期)为例,梳理淀山湖岸线现状存在的问题,分析开展水生态修复的必要性。同时,根据风浪及现状水生态情况选取了适合开展水生态修复试验的岸段,充分考虑波浪对植物生长、护岸稳定的影响,并结合岸后景观风貌,通过相关分析计算,提出较为新颖的护岸改造方案。此方案兼顾水安全、水生态、水景观,且经济、可行,在类似工程中有着较大的应用前景。

关键词: 护岸改造;水生态修复;墙前地形重塑

中图分类号: TV876

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0195-06

Study on Ecological Reconstruction Scheme for Lake Embankments Based on Integration of Water Security and Habitat Construction

PU Xun

(Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200232, China)

Abstract: To study the ecological reconstruction scheme for lake embankments in areas with significant wind and wave activity, taking the Dianshan Lake Embankment Upgrading and Shoreline Ecological Restoration Project (Phase I) as an example, the existing issues in the present shoreline of Dianshan Lake are sorted out, and the necessity of water ecological restoration is analyzed. The shoreline sections suitable for the ecological restoration trials are selected according to the wind-wave conditions and current aquatic ecosystems. The impacts of wave on plant growth and embankment stability are fully considered. And combined with the waterfront landscape features, an innovative revetment reconstruction scheme is proposed through the relevant analysis and calculation. This scheme takes into account water security, water ecology and water landscape, and is economically feasible, which has the greater application prospect in the similar projects.

Keywords: revetment reconstruction; water ecological restoration; topographic remodeling in front of revetment

0 前 言

如图 1 所示,淀山湖位于上海市与江苏两省市交界处,是上海最大的天然湖泊,现有水域面积约 60.2 km²,其中上海市境内面积约 47.5 km²。堤防总长度约 54 km,其中上海段约为 31 km。淀山湖具有防洪、生态、航运、旅游等综合功能,对周边地区经济社会发展具有举足轻重的作用^[1]。

随着长三角一体化上升为国家战略,相关规划^[2]和总体方案^[3]提出要以“一河三湖”(即“太浦河、淀山湖、元荡、汾湖”)为重点,加强生态环境综合



图 1 淀山湖区位示意图

治理,构建优美和谐生态空间,建设著名文化生态湖区。淀山湖区位优势明显,在许多针对长三角示范区水环境的研究中^[4-7],淀山湖区域一直都是研究重点。然而,淀山湖岸线上海段仍有 17.7 km 防洪不达标,局部岸后道路不贯通,影响了淀山湖及周边区域整体发展。为此,启动了淀山湖堤防达标及岸线生

收稿日期: 2025-05-08

作者简介: 濮勋(1984—),男,硕士,高级工程师,从事水利工程设计工作。

态修复工程。

根据总体计划安排,工程分三期实施。如图2所示,一期工程东起牛尾巴港,西至杨舍村江,岸线长度约4.7 km^[1]。



图2 分期实施计划示意图

如图3所示,为了进一步提升生态修复效果,拟在一期工程选取局部岸段开展水生态修复试验,为后续环淀山湖湖滨生态缓冲带修复,恢复湖滨湿地生态功能积累宝贵经验,也为风浪较大区域生态修复及护岸生态化改造提供参考和技术支持。

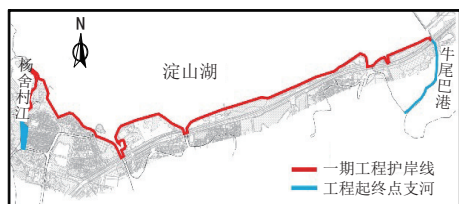


图3 一期工程范围

但目前相关的堤岸生态化改造研究^[8-11],大部分仅限于采用生态材料对护岸本身进行改造,缺少对近岸水下地形的统筹考虑,也基本不考虑风浪影响因素。本文结合墙前的水生态修复措施,既解决较大风浪下的堤岸防汛安全问题,又提升堤岸生态效果,兼顾水安全与水生态。

1 水生态修复试验的必要性

1.1 现状情况

1.1.1 风浪较大,存在安全隐患

淀山湖堤防上海段,为20世纪90年代上海市西部防洪工程时期所建,堤顶高程(上海吴淞高程)为3.8~5.0 m。不同于上海地区一般河道,淀山湖湖面宽阔,吹程较长,护岸受风浪侵蚀严重,导致部分挡墙墙身存在脱浆、破损及墙后掏空的情况,存在安全隐患。

1.1.2 水深较深,滨水生态性差

淀山湖水深大约为0.5~2.5 m,较大的水深不利

于水生植物生长,加之湖面风浪大,导致现状淀山湖墙前几乎没有水生植物。另一方面,硬质护岸隔绝了水与岸的能量交换。因此,护岸整体生态性较差。

1.1.3 护岸结构硬质,景观性不佳

为满足防汛要求,现状护岸结构多为浆砌块石及钢筋混凝土挡墙,而且一墙到顶。一方面生硬的结构令整体景观性较差,另一方面高出常水位1.5~1.8 m的墙身令亲水性大打折扣。

1.2 生态化改造及水生态试验的必要性

1.2.1 推进长三角一体化示范区生态发展

环淀湖区地处长三角生态绿色一体化发展示范区核心,是重要和稀缺的滨水生态空间。

发育良好的湖滨生态缓冲带不但是外源污染物的消纳场所,也是水生动物的栖息繁育之地,是湖泊中生态服务功能最高的热点区域。但淀山湖沿线直立式的护岸、较大的水深以及风浪,均不适合墙前植物的生长。因此,通过一定的工程措施,营造生境,增加生物多样性,改善水生态是十分必要的。

1.2.2 落实《太湖流域水环境综合治理总体方案》的需要

《太湖流域水环境综合治理总体方案》,提出以“一河三湖”为重点,大力推进岸线综合整治,打造生态绿色新空间。

本工程开展淀山湖岸线生态化改造及水生态试验段建设,为水生植物生长营造有利条件,为后续淀山湖湖滨生态缓冲带修复积累宝贵经验。

1.2.3 打造生态景观效果,营造滨水宜居环境,提高人民体验感、获得感

滨水空间之于城市品质、城市未来具有特殊的意义。墙前水生植物可以柔化护岸,增强生态化效果,是岸后景观绿化向湖侧的延伸,能够营造更丰富的滨水空间,在增加空间层次的同时,也增强了人与水的互动,提高了人民的体验感与获得感。

1.2.4 提高生物多样性,是落实上海生态保护红线的需求

淀山湖核心区位于上海市生态保护红线内,对于该区域生物多样性保护的要求较高。开展水生态建设有利于恢复植被群落,营造良好的生境,为淀山湖生物多样性保护奠定了基础。

1.2.5 重构滨岸水生生态系统,打造安全生态韧性岸线

该工程区域风浪较大,对生态系统与岸线安全性影响较大。本次采用削减风浪、固持基底、种植水生植物等一系列生态修复措施,恢复滨岸水生生态

系统,增加滨岸生态系统抵御风浪的能力,提高生态系统韧性,同时验证生态修复措施修复效果,为今后风浪较大区域生态修复提供参考和技术支持。

2 试验段改造方案

2.1 试验段位置比选

淀山湖一期水生态修复试验段共选择了3个点位,1#点位位于美帆基地附近,2#点位位于东兴游艇基地,3#点位位于环湖生态带东侧,具体位置如图4所示。

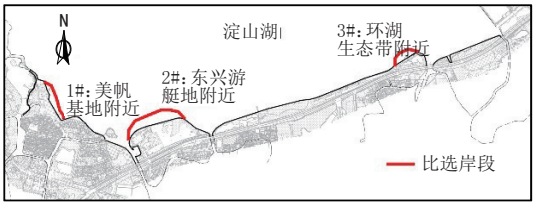


图4 试验段位置比选

由于一期范围仅占淀山湖总体岸线长度约8.7%,因此在整体水质、水文、周边环境等要素基本相同,本次主要考虑3个试验段风浪、水生态情况,对试验段位置进行比选。

2.1.1 风浪

淀山湖区域受季风影响,春夏两季盛行东南风,秋季以东到东北风为主,冬季转为西北风,风速年平均为3.7 m/s,汛期(6~9月)最大风速的平均值为13.2 m/s。本次根据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)^[12]中C.1.2莆田公式计算1#美帆基地、2#东兴游艇基地、3#环湖生态带东侧3个点位附近的平均波高,分别为0.55、0.45、0.45 m,从计算结果可以看出,在水深基本相同的情况下,风区长度较小的东兴游艇基地以及环湖生态带东侧的平均波高也较小。

风浪要素计算公式具体如下:

$$\frac{g\bar{H}}{V^2} = 0.13\text{th}\left[0.7\left(\frac{gd}{V^2}\right)^{0.7}\right]\text{th}\left[\frac{0.0018\left(\frac{gF}{V^2}\right)^{0.45}}{0.13\text{th}\left[0.7\left(\frac{gd}{V^2}\right)^{0.7}\right]}\right]$$
$$\frac{g\bar{T}}{V} = 13.9\left(\frac{g\bar{H}}{V^2}\right)^{0.5} \quad \frac{gt_{\min}}{V} = 168\left(\frac{g\bar{T}}{V}\right)^{3.45}$$

式中: $\bar{H}$ 为平均波高,m; $\bar{T}$ 为平均波周期,s; V 为计算风速,m/s; F 为风区长度,m; D 为水域的平均水深,m; g 为重力加速度,9.81 m/s²; $t_{\min}$ 为风浪达到稳定状态的最小风时,s。

2.1.2 水生态

根据相关研究^[13]淀山湖浮游植物与浮游动物的

表1 各点位波要素计算成果

点位	岸段	湖区水深 d/m	风区长度 F/km	平均波高 $\bar{H}/\text{m}$
1#	美帆基地		9.9	0.55
2#	东兴游艇基地	3.28	3.8	0.45
3#	环湖生态带东侧		4.0	0.45

空间分布主要与水流流速有较大的关系。总体而言,湖湾物种最丰富,近岸带物种丰富度较湖湾低,而风浪较大的敞水区物种丰富度最低。一期工程范围附近浮游植物密度大约为1.813~2.07万个/L,浮游动物密度大约为1 719~1 849 ind/L。

由于1#点位及2#点位位于帆船基地附近,帆船行驶增加了局部的水流流速,而3#点位受到外界干扰较少。如图5所示,1#点位浮游植物密度约为1.85万个/L,2#点位约为1.95万个/L,3#点位约为2.0万个/L。如图6所示,3个点位的浮游生物密度差别不大,但从等值线来看,1#~3#点位的浮游生物密度呈逐步增加的趋势。因此,从浮游植物与浮游动物的平均密度来看,3#环湖生态带东侧均优于1#美帆基地与2#东兴游艇基地。

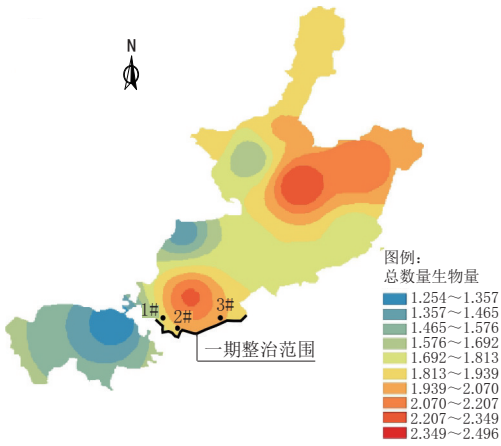


图5 淀山湖浮游植物平均密度空间变化(单位:万个/L)

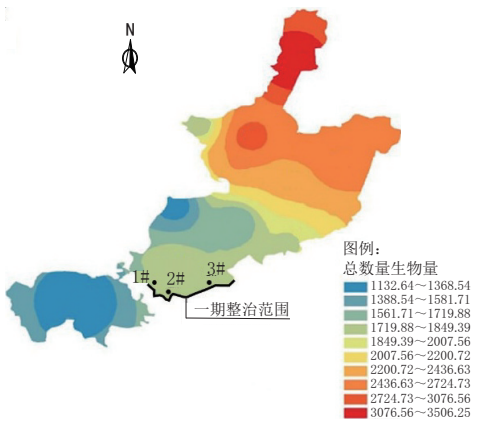


图6 淀山湖浮游动物平均密度(单位:ind/L)

综合分析淀山湖风浪、浮游植物与浮游动物情况,选择环湖生态带东侧作为本次的试验段。

2.2 护岸生态化改造方案

目前,上海地区较为成熟且较适合该工程的护岸结构型式主要有浆砌块石挡墙结构、钢筋挡墙、生态石笼挡墙、仿木桩等。如表2所示,本次从结构的生态性、景观效果、整体安全性、施工工艺及投资造

价等5个方面综合考虑,主要采用了浆砌石+黄石垒砌挡墙。相较于一般的钢筋混凝土挡墙、浆砌块石挡墙,浆砌石+黄石垒砌挡墙结构在景观效果上有了较大的提升,但是同样无法解决墙前波浪大、水深大,水生植物无法生长,滨水生态性差的问题。

表2 护岸结构方案比选表

比较项目	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
主体结构	钢筋混凝土挡墙	浆砌块石挡墙	浆砌块石+黄石垒砌挡墙	仿木桩挡墙	生态石笼挡墙
生态性	较差	一般	黄石块体有间隙,生态效果较好	有利于水体交换,且生态背景搭配较好	较好
景观效果	景观效果一般	景观效果一般	黄石块体错落有致,景观效果较好	仿木桩结构,景观效果较好	喷浆植草确保成活,否则影响外观效果
整体安全性	混凝土结构,安全性高	砌石结构,安全性高	砌石结构,安全性高	混凝土结构,安全性较高。对墙后反滤结构要求高	安全性较好。对墙体块石及墙后反滤结构要求高
施工工艺	工艺成熟,施工方便,质量易保证	工艺成熟,施工方便,对施工质量及材料有一定要求	工艺成熟,施工方便	工序较为复杂	较成熟,对面石级配要求高,易沉降变形
经济性/(元·m ⁻¹)	4 042	3 820	4 010	3 880	3 995

2.2.1 消浪潜坝构建

在海塘工程中,经常在主海塘外侧设置一道消浪潜坝^[14],这样可以削减潜坝后的波浪,减小波浪对主海塘的直接作用,增加主海塘的安全性,降低主海塘的堤顶高程。在淀山湖岸段,设置潜坝,同样可以达到以上效果。而且削减波浪后,更有利于水生植物的生长,降低的护岸顶高程也增加了护岸的亲水效果。

根据《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2015)^[15]E.0.10条公式计算波高 H_1 。

当 $\frac{d_a}{H} \leq 0$ 时,

$$\frac{H_1}{H} = \text{th} \left[0.8 \left(\left| \frac{d_a}{H} \right| + 0.038 \frac{L}{H} K_B \right) \right]$$

当 $\frac{d_a}{H} > 0$ 时, $\frac{H_1}{H} = \text{th} \left(0.03 \frac{L}{H} K_B \right) - \text{th} \left(\frac{d_a}{2H} \right)$

$$K_B = 1.5e^{-0.4 \frac{B}{H}}$$

式中: d_a 为静水位到潜堤堤顶的垂直高度,当潜堤出水时取正值,淹没时取负值,m; B 为潜堤堤顶宽度,m; H_1 为越堤后的波高,m; H 为越堤前的波高,m; L 为越堤前的波长,m。

由公式可知,影响潜坝消浪效果的主要是坝顶高程及坝顶宽度。而这两个参数又决定了潜坝的工程造价,因此,本次对不同坝顶高程及坝顶宽度条件下的波浪折减率(H_1/H)及其对应的工程造价进行计算分析,确定适合的潜坝结构尺寸。

2.2.1.1 坝顶高程比选

本次计算了在坝顶宽度为1.5 m,坝顶高程从1.0 m逐渐变化至2.5 m高程时,消浪效果即波浪折减率的情况,同时也计算了在相应情况下潜坝的每延米造价,具体详见图7。

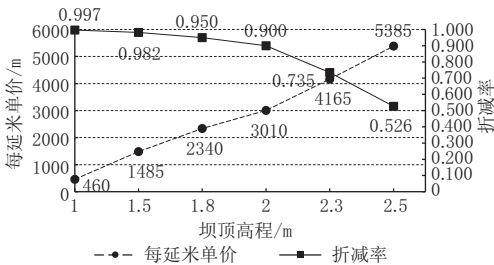


图7 坝顶高程与折减率及造价关系图

由图7可知,当坝顶高逐渐升高时,波浪折减率由0.997逐渐降低至0.526,但每延米的工程造价也由460元增加至5385元。而坝顶高程为2.3 m时折减率曲线与造价曲线相交,可以认为在坝顶高程为2.3 m时潜坝消浪效果及工程造价为最优解。因此,消浪潜坝顶高程拟定为2.3 m。

2.2.1.2 坝顶宽度比选

同理,本次还计算了在坝顶高程为2.3 m,坝顶宽度从0.5 m逐渐加宽至3 m时的消浪效果及造价的变化情况。具体详见图8。

由图8可知,当坝顶宽度逐渐加大时,波浪折减率由0.913逐渐降低至0.556,但每延米的工程造价也由3315元增加至约5440元。此时,折减率曲线与造价曲线相交于坝顶宽度为1.5 m附近,消浪潜坝顶宽拟定为1.5 m。

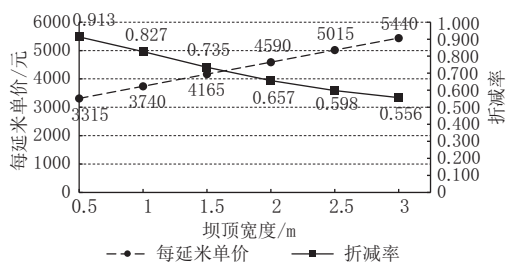


图 8 坝顶宽度与折减率及造价关系图

综上所述,本次潜坝坝顶高程为 2.3 m,坝顶宽度为 1.5 m。

2.2.2 墙前地形重塑

在抛石潜坝与护岸之间利用开挖土方回填至 2.0 m 高程左右,进行水下地形重塑,形成墙前 0.3~1.0 m 左右水深,为不同水生植物提供生境条件。具体详图如 9 所示。

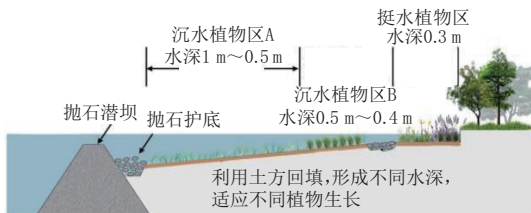


图 9 墙前地形重塑典型断面

虽然外侧的潜坝削减了波浪的能量,但波浪仍然会对浅水区的水生植物带来一定的不利影响。因此,本次考虑采用抛石护底、生态石笼网、土工格室等多种护底型式(见图 10),进一步固持基底,保证植物生长。

2.2.2.1 抛石护底

在潜坝后侧再抛填不同级配的块石,使得波浪经过潜坝后能够在不同角度充分破碎。

2.2.2.2 石笼网

在湖区纵横布置 0.5 m 宽石笼做成的底泥防侵蚀保护带。石笼网采用高强度镀锌钢丝编织成不同规格的矩形笼子,并在笼子内充填石头形成整体结构^[16]。这种结构可实现防止底泥侵蚀的目的,对基质固持具有重要的作用。

2.2.2.3 土工格室

土工格室是以高密度聚乙烯为主要原材料经磨具制造而成的绿化护理材料,是一种可循环利用的环保材料。在土工格室内填充种植土形成植草格后,可种植植物。植草格因其受力结构合理,将其平铺在种植基底,能够减缓水流速度,减弱风浪对基底的侵蚀作用,能够防止水土流失。此外,土工格室能够提供超过 95% 的植草面积,且极其轻便,伸缩自如,运输体积小,连接方便,施工速度快。

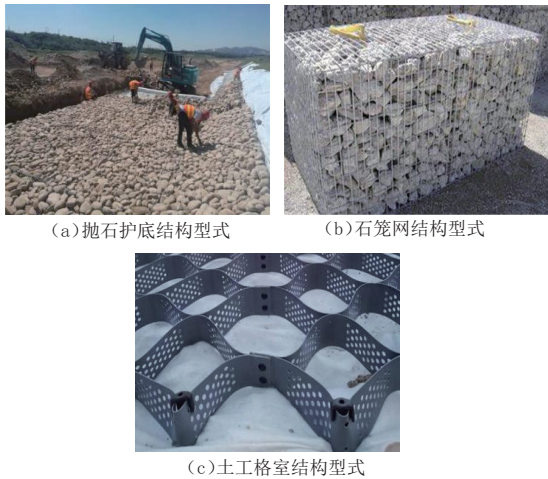


图 10 基底修复措施

2.2.3 挡墙结构改造

考虑到墙前水下地形整治平衡了部分墙后土压力及水压力,有利于挡墙整体稳定,同时在常水位下,可以削减一定的波浪,故本次保留利用部分现有挡墙。具体为:将原挡墙拆除至 2.5 m 高程,在原挡墙上方砌筑景观黄石至 3.5 m 高程。墙后设 2 m 宽临湖漫步道,步道临湖侧设置景观栏杆及一排联排灌木。在漫步道内侧设一景墙,至高程 4.20 m。在墙前 50 m 布置一抛石潜坝,坝顶高程 2.3 m,顶宽 1.5 m,两侧边坡坡比 1:2 至现状滩面,坝底铺设一层 250 g/m² 土工布。在抛石潜坝与挡墙之间采用土方进行地形重塑,形成不同水深。同时,为增加消浪效果及固土作用,在抛石潜坝后侧设置 1 m 宽抛石护底,在回填土表面设置一层土工格室,同时采用石笼网形成底泥防侵蚀保护带。断面结构具体详见图 11。

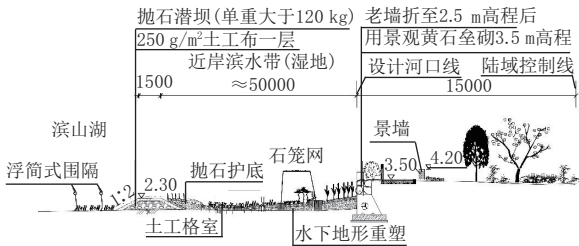


图 11 水生态修复段典型断面图(单位:mm)

改造后,墙顶高程由 4.0~4.2 m 下降至 3.5 m,且常水位以上均采用了景观效果较好的黄石垒砌,护岸的亲水性和景观性得到了提升。另外,由于充分保留利用了原有挡墙的结构,此改造方案较一般的黄石垒砌+浆砌石挡墙结构降低工程费用约 70%。

3 结 语

(1)通过构建消浪潜坝、开展水下地形重塑及墙

前水生生态修复,减少了波浪对护岸的直接作用,提高了护岸的安全性。削减后的波浪、减小的墙前水深更有利于水生植物的生长,增强了护岸的生态性和景观性。同时,长势茂盛的水生植物进一步削减了波浪对护岸的作用,两者之间相互促进,形成了良性循环。在河道湖泊护岸改造方案中具有一定的创新性。

(2)本次提出的护岸生态改造方案是基于水安全与生境营造相融合的综合方案,同时,在工程造价上也有较大优势,因此在风浪较大的河湖滨水空间整治工程中有着较大的应用前景。

(3)目前相关工程已完工,防洪能力已达标,水生态效果提升明显。但大面积的水生植物为后期的管理养护也带来较大的压力。建议后续聚焦生态调控机理、智能监测技术及资源循环利用3大方向,通过多学科交叉研究淀山湖水生植物智慧管养体系。

参考文献:

- [1] 上海市水利工程设计研究院有限公司.淀山湖堤防达标及岸线生态修复工程(一期)项目建议书[R].上海:上海市水利工程设计研究院有限公司,2021.
- [2] 中共中央 国务院.长江三角洲区域一体化发展规划纲要[Z].北京:中共中央 国务院,2019.

- [3] 国家发展改革委.长三角生态绿色一体化发展示范区总体方案[Z].北京:国家发展改革委,2019.
- [4] 季永兴,韩非非,施震余,等.长三角一体化示范区水生态环境治理思考[J].水资源保护,2021,37(1):103-109.
- [5] 谢先坤,施震余.基于自然解决方案的元荡湖湖滨带生态修复[J].湿地科学与管理,2022,18(4):57-59.
- [6] 钱纯纯,毕佳蕾,陈文召.长三角生态绿色一体化战略下太浦河岸线保护与利用研究[J].水利规划与设计,2021(12):23-26.
- [7] 毕佳蕾,钱纯纯,李琛,等.长三角生态绿色一体化发展示范区洪涝治理对策研究[J].水利规划与设计,2021(11):20-24.
- [8] 吴延胜.淀山湖护岸结构及生态护岸方案设计与分析[J].水利科学与寒区工程,2023,6(4):143-146.
- [9] 张茜,费晓磊,高坤,等.城市景观湖泊生态修复设计研究[J].水利规划与设计,2023(12):92-95.
- [10] 韩海潮.淀山湖防汛岸线(上海段)方案总体设计总结[J].城市防洪与道桥,2013(12):86-89.
- [11] 孙哲.上海市河道生态护岸建设影响因素分析及建议[J].水利规划与设计,2023(3):21-24.
- [12] GB 50286—2013,堤防工程设计规范[S].
- [13] 上海市水利工程设计研究院有限公司,华东师范大学.淀山湖近岸水域植被调查与生态缓冲带构建方案专项研究[R].上海:上海市水利工程设计研究院有限公司,2021.
- [14] 濮勋,张丽芬.潮汐河口土石堤除险加固达标方案研究[J].水利规划与设计,2020(3):49-155.
- [15] GB/T 51015—2015,海堤工程设计规范[S].
- [16] 李辉,汤珏.北方工业厂区景观设计方法初探——以内蒙古神华煤制油厂区景观设计为例[J].华中建筑,2008(1):168-170.

(上接第174页)

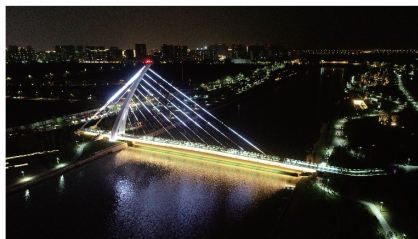


图10 桥梁夜间实景图

参考文献:

- [1] 万田保.张家界大峡谷异型玻璃悬索桥设计关键技术[J].桥梁建设,2017,47(1):6-11.
- [2] 刘丰洲,许伟龙,吴强强.越龙山人行玻璃悬索桥总体设计[J].桥

梁建设,2023,53(3):114-119.

- [3] 韩大章,戴捷,李正,等.南京青奥标志——“南京眼”青奥公园步行桥设计[C]//南京:江苏省公路学会2014年学术年会论文集,2014.
- [4] 何奇钦,王碧波.柳州白沙大桥主桥设计[J].桥梁建设,2018,48(4):96-101.
- [5] Jerry Cutter, John W. Flanagan, Philip Brown, et al. Samuel Beckett Bridge, Dublin, Ireland[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Bridge Engineering, 2011, 164(3): 133-144.
- [6] 邵旭东,陈玉宝,何广,等.基于PBL-栓钉组合剪力键的钢-UHPC组合桁式拱桥节点拉拔性能研究[J].桥梁建设,2022,52(1):33-40.
- [7] 侯满,张志强,范振伟.三亚海棠湾人行景观斜拉桥总体设计[J].世界桥梁,2021,49(3):1-6.