

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.019

引用格式:邱俊峰.沿海浪溅区桥涵工程创新设计分析[J].公路与汽运,2024,40(5):108-122.

Citation: QIU Junfeng. Analysis of innovative design of bridge and culvert engineering in Coastal Wave-affected Area[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(5): 108-122.

沿海浪溅区桥涵工程创新设计分析*

邱俊峰^{1,2}(1.福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004; 2.近海公路建设与养护新材料技术应用
交通运输行业研发中心, 福建 福州 350004)

摘要:为保障沿海浪溅区桥涵结构在海浪冲击下的安全性、耐久性及使用功能,开发新型RC(Reinforce Concrete Construction, 钢筋混凝土)-UHPC(Ultra-High Performance Concrete, 超高性能混凝土)组合框架桥涵,并依托福建省滨海国道项目开展工程创新设计及应用分析。为保证设计的准确性,针对海浪问题开展整体波浪物理模型试验研究,确定浪高、波浪顶托力等参数,并分别从滨海风景道景观功能、结构安全及耐久性等角度进行桥涵方案设计分析,最终得出由桩基接框架承台、镂空侧墙及RC-UHPC顶板组成的新型框架桥涵结构,解决沿海浪溅区公路建设难题。

关键词:桥涵;框架桥涵;装配式RC-UHPC组合空心板;预制管桩基础;波浪物理模型试验;滨海浪溅区

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0108-05

中国海岸线绵长,沿海地区滩涂众多,沿海岸、岛屿道路桥涵建设与维护受到不同程度影响^[1-3]。沿海浪溅区桥涵常遭受台风、海浪、海啸等复杂海洋动力的冲击,过大的海浪冲击力甚至远超过车辆活载作用,造成混凝土结构开裂甚至损毁,开裂结构在海盐环境下进一步诱发钢筋腐蚀,加速破坏,影响滨海道路桥涵的耐久性与安全性。如何保障沿海浪溅区桥涵在海浪冲击下的安全性、耐久性和使用功能已成为当前工程界的巨大挑战,有必要开发高效、耐久、适用性强、经济性好的沿海浪溅区桥涵新技术。本文以福建省滨海国道连江段滩涂桥涵工程为背景,提出一种顶板为装配式RC(Reinforce Concrete Construction, 钢筋混凝土)-UHPC(Ultra-High Performance Concrete, 超高性能混凝土)组合空心板的新型框架桥涵结构,通过结构整体波浪物理模型试验确定海浪影响高度及作用力,并结合滨海风景道景观需求、结构安全及耐久性等进行了技术设计。

1 工程概况

国道G228是福建省滨海风景道重点建设项

目,项目总长约1 250 km,起于宁德福鼎,终于漳州诏安,由北往南依次经过宁德、福州、莆田、泉州、厦门、漳州6座滨海城市,辐射50个美丽乡村、176个3A级以上旅游景区(点)、1 500多座岛屿。由于沿海城镇密集、用地紧张,新建公路为避开城镇需跨越外海浅滩。以国道G228福州连江段为例,经过滨海小镇晓澳镇时,考虑到城镇居民房屋沿海岸线分布,将路线布设于外侧浅滩海域区(见图1)。



图1 福建省滨海滩涂场区典型实景

1.1 主要技术标准

(1) 公路等级:双向四车道一级公路,设计速度60 km/h。

(2) 结构设计基准期:100年。

* 基金项目:福建省科技计划项目(2021H0033);交通运输行业重点科技项目(2021-MS1-059);福建省住建行业科技项目(2022-K-208)

(3) 路面宽度:总宽 24 m,车行道宽度为 2×7 m,慢行道宽度为 4 m。

(4) 设计水位:重现期 100 年高水位为 +5.09 m,对应最大波高为 +3.04 m,波峰高程为 $+(5.09+3.04 \times 0.7)$ m,约 +7.22 m。

(5) 汽车荷载等级:公路-I 级。

(6) 环境类别:Ⅲ类(近海或海洋氯化物环境)。

1.2 建设条件

(1) 地形地貌。场区主要为滨海滩涂地貌,地形较平缓,标高为 1~4 m,多为渔业养殖。养殖区堤岸多为人工块石堆填,位于冲海积地貌中,长期受潮汐影响。右侧紧邻地方老路,老路迎海侧采用直立护岸挡墙,内侧密集分布居民房屋。

(2) 工程地质。地表冲海积地层为流塑状淤泥、淤泥质土等软土层,厚度为 3.5~15.0 m,埋深为 3.0~34.4 m,软土地质性质差,呈流塑、饱和状态;下部基岩为花岗岩,岩石风化差异较大,风化均匀性差。

(3) 水文地质。场区地表水发育,以海水为主,受潮汐影响,水位变化大,冲刷力较强。根据调查结果及区域水文资料,当地海湾呈现半日潮特征,桥址区附近高潮水位为 3.82 m,平均高潮水位 1.41 m,平均低潮水位为 -3.02 m,最大潮差 6.72 m,最小潮差 1.72 m。

2 工程设计思路

2.1 主要控制因素

G228 连江浦口官岭至琯头东边段途经晓澳镇的路段位于外海浅滩区,段落起点接桥梁,终点接老国道,左侧为外海浅滩,长度为 1.1 km,右侧紧邻海岸线及村镇。工程设计主要控制因素如下:

(1) 该项目为福建省滨海风景道重点工程的组成部分,景观要求高。

(2) 海岸线外侧为用海受限区域,不允许进行土石方填筑施工。内侧村镇强烈要求公路路面标高不得超过村镇地面标高 1 m。

(3) 直接承受波浪作用,暴露于海洋高盐、高温、高湿等强腐蚀环境中。

(4) 表层为 3~5 m 厚细砂,下卧软土层厚度为 6~20 m、最大埋深为 37 m,基岩埋深大于 50 m。

2.2 技术设计思路

由于路线内侧紧邻晓澳镇居民区,路面标高(为 +5.5 m)不得高于既有道路 1 m,即路面设计标高

约 +6.5 m。若采用桥梁方案,考虑梁高及横坡等,梁底标高约 +4 m,而波浪影响高程为 +7.22 m,无法满足常规桥梁布设要求^[4]。同时,该段落受用海红线控制,无法布设常规实体路基^[5],要求采用通透构筑物。因此,采用连续箱涵布设方案。充分考虑波浪影响,结合场区控制因素、滨海风景道景观需求、结构安全及耐久性等进行箱涵工程技术设计。

(1) 波浪物理模型试验。由于场区位于外海,受海浪影响高程为 +7.22 m,而箱涵顶路面设计标高仅 +6.5 m 左右,顶板将直接承受波浪的冲击,同时海浪将沿外侧护栏爬升越过护栏涌入路面,威胁车辆及行人安全,海况条件复杂。根据相关规范^[4,6],针对该工程海浪影响段落开展波浪数学模型研究,并对涉水结构物的波浪断面进行物理模型试验,为设计提供科学依据。

(2) 滨海风景道景观提升设计。该项目为福建省滨海风景道重点工程,紧邻村镇,处于滨海景观带,对整体景观要求较高。若采用常规箱涵单孔仅 5 m,跨径小,1.1 km 段落内连续布设 5 m 箱涵,景观效果不佳。景观提升设计思路之一是加大跨径,二是连续侧墙采用镂空景观设计,形成新型框架桥涵结构。

(3) 结构安全性能提升设计。该段落箱涵直接承受海浪竖向顶托力、水平冲击力作用,结构设计时需充分考虑下部基础及整体结构安全。针对这类地层,箱涵地基处理中常采用水泥搅拌桩、管桩等复合地基,这类复合地基仅可提供竖向支承,而箱涵需承受海浪的巨大冲击作用,仅靠箱涵自质量不足以抵消波浪浮托力及水平冲击力,无法保证箱涵的整体稳定性。因此,下部基础需与箱涵连成整体共同受力。

(4) 结构耐久性提升设计思路。箱涵采用普通 RC 顶板,在上部动载、海洋波浪冲击及海盐腐蚀的长期作用下,梁板不可避免地发生开裂,且海盐腐蚀环境会加速箱涵顶板破坏,普通 RC 顶板难以满足工程使用要求。结构耐久性提升设计思路之一是采用 UHPC 替代普通混凝土^[7],从源头上解决结构耐久性设计难题。

3 波浪物理模型试验研究

3.1 试验研究内容

针对工程区地形、渔港防波堤、箱涵等构造物分布,联合相关科研机构开展滨海段箱涵波浪整体物理模型试验专题研究,按照几何相似性进行准确试

验模拟,物理模型比尺为 1:40。试验主要研究内容如下:1) 波浪破碎处波高、波浪破碎前后波高变化过程、波浪撞击结构物前波高、波浪撞击结构物后爬高;2) 测量沿线路面越浪量;3) 测量顶板受到的 Y 向和 Z 向波浪力、挡浪墙受到的 Y 向波浪力及墙身 Y 向波浪力。

3.2 试验结果分析

根据波浪物理模型试验结论^[8],该项目重现期 100 年高水位(+5.09m)对应 $H_{1\%}$ 波高(累计频率为 1%的波高)最大值为 3.04 m,箱涵沿线靠海侧的 $R_{1\%}$ 波浪爬高(累计频率为 1%的波浪爬高)最大值为 4.02 m,对应越浪量最大值为 $0.010\ 2\ \text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$,极端高水位(+4.80 m)及 2 年一遇波浪作用下沿线无越浪,箱涵顶板受到的波浪平均顶托力为 733 kN/m、水平力为 29 kN/m,挡浪墙所受水平力为 41 kN/m,顶板承受的局部最大波浪顶托冲击压强为 82 kPa,沿横桥向的作用分布宽度为 3.5 m,合成局部顶托力为 230 kN/m。

由于重现期 100 年高水位下箱涵沿线靠海侧存在越浪,为减少或避免海水直接翻越护栏威胁车辆和行人安全,外侧护栏设计为带挑臂的防浪墙。根据试验结果,箱涵单孔承受的波浪外荷载与车辆荷

载见表 1,波浪竖向顶托力为车辆荷载的 3.5 倍,纵向波推力为车辆制动力的 1.5 倍,波浪冲击将产生 1 033 kN 的横向推力,车辆则无横向力。可见,波浪作用效应远大于车辆荷载等其他外部作用,是该项目的控制性因素,结构设计时需充分考虑波浪顶托力及水平冲击力。

表 1 单孔承受外荷载结果对比 单位:kN

方向	车辆荷载	波浪荷载	两者差值
竖向 Z	1 708	6 011	4 303
纵向 X	171	252	81
横向 Y	0	1 033	1 033

4 景观功能提升设计

4.1 常规箱涵方案分析

该项目箱涵高度为 4~7 m,考虑孔径与高度的协调性,拟采用 10 m 孔径箱涵,根据墩高不同,采用 3~6 孔一联设计,侧墙数量比 5 m 孔径箱涵减少 50%,通透性及景观性得到一定提升。但普通箱涵侧墙为钢筋混凝土连续墙,墙身沿横桥向通长连续布置,与顶、底板构成封闭箱体,通透性较差,整体景观效果不佳(见图 2)。

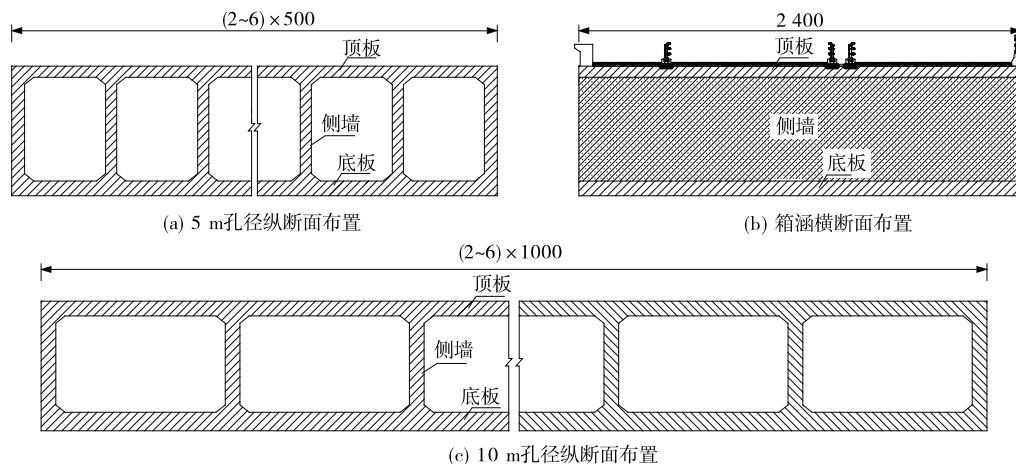


图 2 常规箱涵布置示意图(单位:cm)

4.2 景观提升设计

为提升通透性,将连续侧墙改进设计为间隔镂空布置的侧墙,镂空侧墙的构造形式及尺寸应兼顾景观及受力要求,可设计为挖孔式、门架式侧墙等简洁构造形式(见图 3)。门架式侧墙采用薄壁桥墩盖梁的设计理念,外观更简洁、通透。考虑到该项目为福建省滨海风景道重点工程,位于滨海湿地景观带,景观要求较高,推荐采用门架式镂空侧墙设计方案。

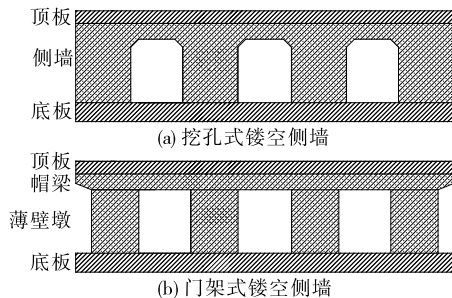


图 3 镂空侧墙示意图

5 结构安全性提升设计

5.1 新型框架桥涵结构方案

为使下部基础与箱涵连成整体共同承担汽车、波浪冲击等活载,借鉴桥梁下部结构设计方法,下部基础采用桩基接承台方案,取消箱涵底板,侧墙与承台刚性连接。不同于桥梁下部独立承台,箱涵承台间设置纵向系梁形成整体框架承台,以提升结构整体承载能力。改进设计后,框架承台配桩基础、门架式镂空侧墙及顶板共同构成新型框架桥涵结构(见

图 4)。为释放框架桥涵由温度、收缩徐变等引起的伸缩变形,一联框架桥涵两端的承台仍采用独立承台,其上设置分离式侧墙,并预留 3 cm 变形缝。

5.2 桩基础优化设计

由于框架桥涵整体刚度大,对基础不均匀沉降较敏感,采用常规灌注桩基础方案时,为保证基础的沉降可控,持力层一般需置于较完整的基岩上。该项目场区基岩埋深为 50~70 m,灌注桩基础最大桩长将超过 70 m,施工难度大,工期长,造价高。因此,需寻求更合理的桩基设计方案。

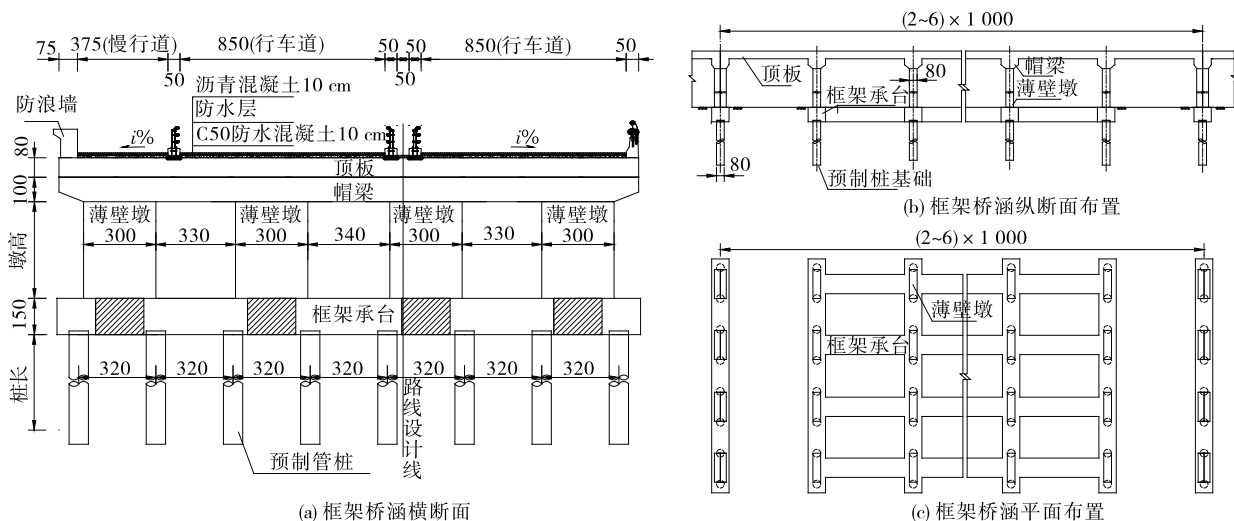


图 4 新型框架桥涵示意图(单位:cm)

考虑到场区地层为渐变式,砂土状强风化岩层埋深为 31~43 m,较适应预制管桩基础施工。根据工程地质勘察报告,管桩基础在强风化岩层中的极限端阻力为 6~9 MPa,远高于灌注桩的 400 kPa。对于这类地层,预制管桩基础可直接锤击或静压施工进入持力层,桩底无沉渣,基础承载能力及稳定性有保证,相同承载力下造价仅为灌注桩基础的 50%。因此,设计采用预制管桩基础方案。

为准确计算波浪荷载作用下桩基础的受力情况,采用桥梁博士 V4.4 建立整体框架梁格模型,将竖向、水平波浪力精确加载至梁板、侧墙等部位,得到桩基需承受的最大拉拔力为 1 104 kN。按 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》进行验算,单桩最小轴向受拉承载力特征值为 1 194 kN>1 104 kN,满足桩基抗拔承载力要求。

6 结构耐久性提升设计

6.1 顶板耐久性提升方案

沿海浪溅区框架桥涵结构采用抗裂性能优异、

耐久性超强的 UHPC 材料,确保框架桥涵的力学性能和耐久性满足结构使用要求。桥涵结构全部采用 UHPC 材料,使用效果最佳。但 UHPC 配制、生产和施工技术复杂且成本较高,不是普遍适用的工程材料,而是现有工程材料的有益补充,用于解决工程难题或工程中对材料性能指标要求高的关键部位^[9-11]。因此,该项目仅将 UHPC 材料用于框架桥涵结构顶板的底层,设计层厚仅占顶板厚度的 1/8 左右,大部分材料仍采用普通混凝土(见图 5),充分利用 UHPC 层优异的韧性及耐久性抵挡海浪的冲击和腐蚀作用,保证顶板的长期使用性能。

6.2 新型 RC-UHPC 组合空心板设计

新型框架桥涵纵向孔径为 10 m,顶板若采用现浇施工,施工周期长,支架模板多,且受涨落潮、风浪影响大,工程质量及安全管控难度大。为保证 RC-UHPC 组合顶板的施工质量,设计采用装配式 RC-UHPC 组合空心板。为方便工厂预制、吊装及运输,单块空心板的长度×宽度×高度设计为 9.0 m×2.5 m×0.8 m。先预制 UHPC 底板,再在

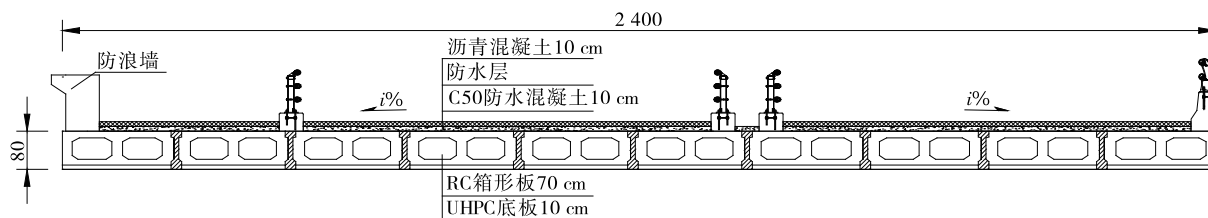


图 5 装配式 RC-UHPC 组合空心板横断面图(单位:cm)

预制场内二次浇筑 C50 混凝土空心板, UHPC 与 RC 界面间主要通过锚筋连接形成组合截面。考虑到空心板将承担较大正向弯拉应力(有限元计算结果表明运营阶段板底最大弯拉应力达 6.5 MPa), 常规钢筋混凝土难以满足抗裂要求, 采用密配筋 UHPC 板理念, 配置间距 50 mm、直径 20 mm 的 HRB400 mm 钢筋。经验算, 在不考虑 UHPC 抗拉强度的情况下, 裂缝宽度最大为 0.06 mm, 小于 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中 0.1 mm 的裂缝限值。且 UHPC 的抗拉强度高, 在工程应用中可有效提升结构的抗裂储备, 进一步提升结构的耐久性。

7 结论

(1) 沿海浪溅区桥涵设计时应充分考虑海浪影响, 结合沿线景观功能、结构安全及耐久性等进行技术设计。

(2) 沿海桥涵工程路面设计高程受限时, 上部结构将受海浪顶托力及水平力影响, 甚至控制设计, 有必要开展波浪专题试验研究。

(3) 考虑沿海公路景观功能需求, 浪溅区框架桥涵单孔孔径设计值建议不小于 10 m, 并采用镂空侧墙设计方案, 提升桥涵结构的通透性。

(4) 当桥涵结构设计受波浪力控制时, 可采用桩基接承台的新型框架桥涵结构设计, 使抗拔桩基础参与承担波浪顶托力及水平冲击力作用。

(5) 当桥涵上部结构长期承受海洋波浪冲击及腐蚀作用时, 可采用装配式 RC-UHPC 组合空心板设计方案, 充分利用 UHPC 层的超高韧性及耐久性, 同时兼顾经济性。

参考文献:

- [1] 孟庆利. 沿海桥梁地震海啸作用机理与对策试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 86-95.
- [2] 谷音, 张晓龙, 郑福鼎, 等. 近海箱型梁桥受海啸波浪力作用试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(13): 300-307.
- [3] 方庆贺, 李素超, 郭安薪, 等. 近海 T 形梁桥上部结构极端波浪作用试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 114-123.
- [4] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [5] 天津师范大学, 国家海洋局海域与海岛管理司, 国家海洋信息中心. 海域使用分类: HY/T 123—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015(2022 版)[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [7] 邵旭东, 邱明红. 基于 UHPC 材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 160-167.
- [8] 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院. 国道 G228 连江浦口松坞至晓澳横仑段滨海段箱涵波浪整体物理模型试验研究报告[R]. 南京: 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 2022.
- [9] 曹君辉, 樊伟, 李立峰, 等. 基于 UHPC 的高性能桥梁结构研究与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 1-32.
- [10] 方明, 赵作富. 无主筋 UHPC 预制简支梁桥荷载试验研究[J]. 公路与汽运, 2022(5): 111-115.
- [11] 江浩伟. 基于 ABAQUS 的整体桥 UHPC 桩基性能分析[J]. 公路与汽运, 2022(3): 118-121.

收稿日期: 2023-07-14

(上接第 107 页)

- [7] 黄大元, 黄平明, 张征文, 等. 钢管混凝土桁式拱桥简化计算模式研究[J]. 桥梁建设, 2002, 32(2): 30-33.
- [8] 李海鸥. 带拱箱底板预制的劲性骨架砼拱桥施工力学行为研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

- [9] 张翔, 张立兴. 中承式钢管砼拱桥设计[J]. 公路与汽运, 2021(5): 114-117.

收稿日期: 2023-11-17