

波浪力作用下桥梁设计以及安全性分析

李建强¹, 方 聪²

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092;2.中国建筑第五工程局有限公司,湖南 长沙 410011]

摘 要:以珠海市横琴岛西南侧峡湾内一座桥面标高仅 5.5 m,长约 2.2 km 的低桥位环岛桥梁为例,重点论述了低桥位桥梁结构的体系选择、上部结构截面设计、下部结构设计等,并对波浪力计算、考虑或不考虑波浪力对低桥位桥梁结构的影响进行了有限元分析。结果表明,考虑或不考虑波浪力情况下,该桥梁结构均满足规范要求。所述案例可为近海环岛低桥位桥梁建设提供参考。

关键词:低桥位环岛桥梁;波浪力;结构安全

中图分类号:U442.59

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)10-0095-04

1 工程概况

某工程位于珠海市横琴岛西南侧的峡湾内,为外海环境。因处于风景旅游区,景观要求较高,需采用低桥位设计方案。结合周围地块景观等需求,桥面标高定为 5.5 m,平均墩高约为 5.0 m,海上段桥梁全长 2.2 km;桥梁设计需要结合周边景观,并体现人与自然协调“亲水性”,使桥址处桥梁建设成为集防浪和娱乐观赏为一体的旅游休闲胜地。

2 建设条件

2.1 地貌

桥位处为临海地区,西侧为磨刀门水道,与南海连通,东侧为大横琴山,区域水网较发育,主要由鱼塘、河流、滩涂、少量的蕉林组成。

2.2 气象

项目场地位于北回归线以南,属亚热带海洋性季风气候。冬夏季风交替明显,终年气温较高,偶有阵寒,年、日温差小;由于受季风变化和地形的影响,易遭受台风袭击,强台风登陆最大风力达 12 级以上。

2.3 水文

项目场地为海滩地貌,地表水主要为海水,拟建场地水深 0.60~5.00 m,水位受潮汐影响较大,涨落潮水位变化在 1.50~2.50 m。地下水位较高,常年雨量充沛。

2.4 地质

工程沿线原始地貌为浅海地貌单元,局部为人工回填形成的陆域,覆盖层以软弱土为主,第四纪地层厚度较大。从地质钻孔揭露,地层自上而下的顺序为:人工填积层(Q4ml)、第四系湖塘相淤积层(Q4l)、第四系海相沉积层(Q4m)、第四系海陆交互相沉积层(Q4mc)、残积层(Q4el)和燕山期侵入花岗岩层($\gamma 52(3)$)。

项目场址地貌见图 1。



图 1 项目场址地貌

3 结构体系选择和技术标准

结合该地区的地理位置和建设条件,本工程设计重难点为外海环境下,低桥位条件下需解决波浪对主梁浮托力以及波浪对立柱的水平力问题。为解决浮托力以及支座耐久性问题,最终本工程海上段采用了共计 27 联预应力墩梁固结体系。矮墩预应力连续刚构桥型布置图见图 2。

主要技术标准如下:

桥梁设计荷载:城-A 级。

设计时速:80 km/h。

桥面宽度:双幅总宽 50 m,单幅 23.75 m。

收稿日期:2022-12-07

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5632)

作者简介:李建强(1991—),男,硕士,高级工程师,从事市政桥梁设计工作。

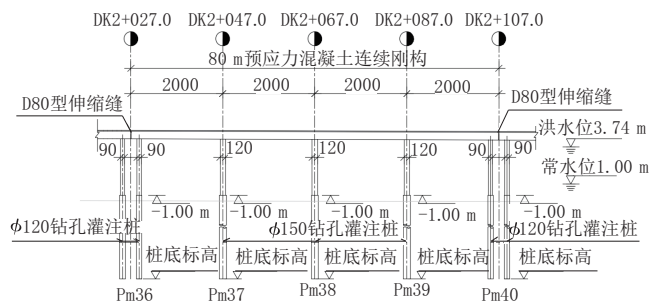


图2 矮墩预应力连续刚构桥型布置图(单位:cm)

最高潮水位:3.74 m($F=1/100$)。

地震基本烈度:地震动峰值加速度 $0.1g$,Ⅶ度区,按照地震烈度Ⅷ构造设防。

浪高:6.0 m($F=1/300$)。

单幅桥上下部结构采用墩梁固结体系,上部结构采用锅底型箱型断面,下部采用桩接柱,桥墩边墩采用 $\phi 90$,中墩采用 $\phi 120$,桩基采用钻孔灌注桩。矮墩预应力连续刚构桥梁横断面布置图见图3。

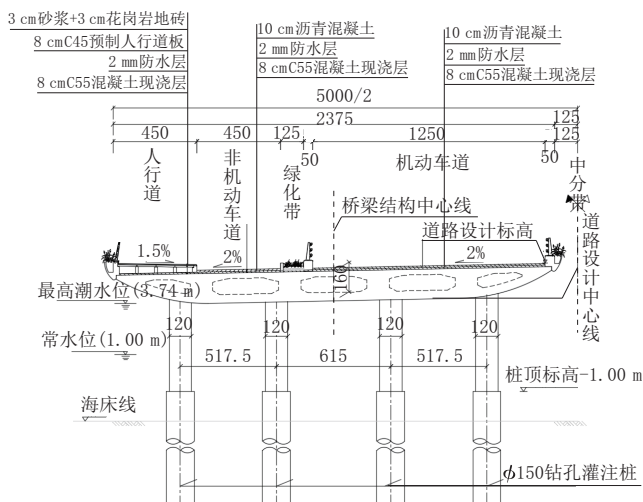


图3 矮墩预应力连续刚构桥梁横断面布置图(单位:cm)

4 桥梁结构设计

对于跨径20 m的连续刚构体系桥梁,一般可采用钢结构或者混凝土结构。对于近海且受波浪力影响的低桥位环岛桥梁设计而言,若桥梁主梁采用钢结构,将产生下列问题:(1)在海水环境下易腐蚀,防腐措施费用较高,若采用耐候钢则造价显著增高;(2)桥梁结构在波浪力作用下疲劳效应明显且因受到波浪上浮力,桥墩和桩基出现了受拉;(3)对于桥梁长度约2.2 km的环岛桥梁来说,采用钢结构的造价相对较高;(4)钢结构后期养护成本高。由此可见,钢结构在此工程中不宜采用。

相比之下,混凝土结构因自重较大,可减小主梁因受到波浪浮托力致使的桥墩受拉作用,因此适用于本结构,但应考虑混凝土结构腐蚀性问题。耐久性问

题可以通过相关措施解决,本文不作论述。

4.1 上部结构设计

对于运营阶段受到波浪力作用的桥梁,其截面设计至关重要,常见的形式有T梁、小箱梁、有挑臂大箱梁、无挑臂大箱梁等形式。其中的T字型截面为开口型,T肋对迎击而来的波浪有一定的阻碍,结构形式不利于对波浪卸力。为此选择有、无挑臂的大箱梁截面形式进行对比,见图4。由于桥梁方案梁底标高低于最高潮水位,主梁需要承受较大的波浪浮托力,而斜腹板断面主梁挑臂较大,在波浪力作用下不满足受力要求。经过多次对比论证,主梁断面应采用流线型断面,以减小波浪浮托力影响。

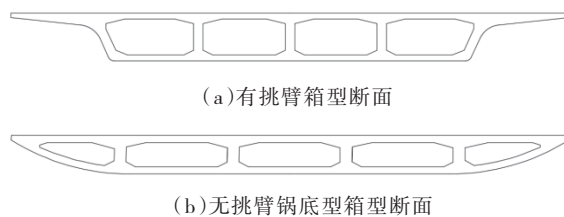


图4 预应力混凝土大箱梁截面

4.2 下部结构设计

对于混凝土现浇梁,下部结构可以采用群桩基础桥墩、排架墩等形式。

分析认为,群桩基础桥墩的刚度较大,在受力方面不能满足长联、边墩固结的桥梁方案;同时群桩基础施工需要进行大范围的围堰,而桥址位置处于水中,致使围堰施工费用较高。另外,对于墩梁固结刚构体系,结构1联长度和跨径大小、混凝土收缩和徐变、温度、预应力次内力、桥桩沉降等变化对桥墩影响均较大^[1]。

由于本项目中桥梁方案采用边墩固结形式,从受力方面考虑,桥梁下部结构选择纵桥向柔度较大的排架墩结构更为合适。

5 波浪力计算

工程位于磨刀门左侧的凹沓内,受横琴岛的保护。在极端条件下,大万山站常浪向SE(东南向波浪)、强浪向S(南向波浪)、SW(西南向波浪)等对工程区水域有影响。

工程上一般对实测水文资料进行处理,采用波浪最大波高 H_{max} 、超越概率为4%的波高 $H_{4\%}$ 、超越概率为13%的波高 $H_{13\%}$ 来描述波浪。非工作状态、灾难状态分别按照50 a、100 a、300 a重现期确定^[2]。

主要计算SE、S、SW这3个方向的波浪。其桥位处设计波要素见表1(表中 $H_{1\%}$ 表示概率超越1%的

波高、 H 表示波浪高度、 T 表示平均周期、 L 表示平均波长)。

表 1 桥位处设计波要素表

主波向	重现期 /a	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$	H/m	T/s	L/m
SE	50	8.4	7.2	5.8	3.0	9.8	133
	100	9.3	8.0	6.5	4.2	10.3	143
	300	10.9	9.4	7.5	5.4	11.1	159
S	50	9.2	8.0	6.5	4.2	10.3	143
	100	10.3	8.9	7.2	4.8	10.9	155
	300	12.5	10.7	8.8	6.0	11.9	175
SW	50	7.7	6.6	5.3	3.5	9.4	127
	100	8.6	7.4	6.0	3.9	9.9	135
	300	10.2	8.8	7.0	4.7	10.7	151

依据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),明确设计需考虑波浪力的作用。波浪对桥梁结构的作用分为 2 类:(1)对上部结构产生的浮托力;(2)对下部桥墩的水平力。

5.1 浮托力计算

本文通过对斜坡上尾部封闭的水平面板波浪力产生的类型、条件和机理进行综合分析,最终选择按《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)来计算梁底的波浪浮托力。计算式为:

$$\frac{F_{1\%}}{\gamma x_{1\%} H_{1\%}} = K_1 \left(1 - \frac{\Delta h}{1.1 \eta_{1\%}}\right) 0.3 e^{-0.9 \left(\frac{\Delta h}{1.1 \eta_{1\%}} - 0.75\right)^2} \quad (1)$$

$$K_1 = 0.85 + 0.35 \tan h \left(\frac{L_s}{2B} - 2\right) \quad (2)$$

$$\eta_{1\%} = \frac{H_{1\%}}{2} + \frac{\pi H_{1\%}^2}{2L} \frac{(\cot h \frac{2\pi d}{L_s})(\cot h \frac{4\pi d}{L_s} + 2)}{4(\sin h \frac{2\pi d}{L})^3} \quad (3)$$

$$x_{1\%} = \frac{L_s}{\pi} \cos^{-1} \frac{\Delta h}{1.1 \eta_{1\%}} \quad (4)$$

$$L_s = \frac{g T_s^2}{2\pi} \tan h \frac{2\pi d}{L} \quad (5)$$

$$F_F = K_F F_{1\%} \quad (6)$$

式中: $F_{1\%}$ 为累积频率为 1%的波高作用下梁底纵向长度的最大浮托力; γ 为水的重度; $x_{1\%}$ 为梁底波浪作用宽度; $\eta_{1\%}$ 为 $H_{1\%}$ 波高对应的波峰在静水面以上的高度; L_s 为有效波长; h 为静水面高度; Δh 为梁底在静水面以上的高度; B 为沿波浪传播方向的梁底宽度; g 为重力加速度; T_s 为平均周期; F_F 为累计频率为 F 的波高作用下梁底纵向单位长度的最大浮托力; K_F 为梁底不同累积频率 F 的波浪总浮托力换算系数; $H_{1\%}$ 为入射波波高; d 为前沿水深; K_1 为梁底宽度影响系数。

5.2 桥墩水平力计算

波浪对桥墩的作用力采用莫里森公式计算。该公式认为作用在小直径桩上的波浪荷载由 2 项组成:由水平加速度引起的惯性力、由水平速度引起的阻力。其表达式为:

$$P = P_i + P_d = C_m \rho \cdot \pi r^2 + \frac{1}{2} C_d \rho \cdot 2r |u| u \quad (7)$$

式中: P 为柱在某一深度处长度上的波浪力,由惯性力 P_i 和阻力 P_d 组成; C_m 为惯性力系数; C_d 为阻力系数; r 为柱截面半径; u 为波浪运动水平速度。本工程 $C_m=1.2$ 、 $C_d=2.0$ 。

将相关数值代入式(1)~(7),可得在极端高水位 3.74 m 情况下,桥墩截面在 3 个方向的波向参数、浮托力和水平力,见表 2。

表 2 各波向参数以及浮托力和水平力

属性	波向	$H_{1\%}/m$	$F_{1\%}/(kN \cdot m^{-1})$	$P/(kN \cdot m^{-1})$
涌浪	S	0.85	66.2	117.4
	SE	1.02	68.1	125.7
	SW	0.82	69.8	126.9
风浪	W	1.31	77.2	130.5

由表 2 可知:(1)主梁浮托力以 SW 向最大,达 69.8 kN/m;在 W 向风浪时,主梁受到的浮托力最大达 77.2 kN/m。(2)桥墩水平力以 SW 向最大,达 126.9 kN/m;在 W 向风浪时,桥墩受到的水平力最大达 130.5 kN/m。

6 桥梁结构安全性验算

本桥采用国内常用的有限元软件建立空间桥梁结构模型进行分析,主梁、桥墩、桩基均采用空间梁单元模拟。模型建立需要考虑的因素为:

(1)有限元模拟上部结构箱梁时,需考虑预应力次内力对下部桥墩的影响。

(2)桩土效应模拟时,将桩周土的作用看成线弹性土弹簧,采用《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)中“m 法”来解决桩基的模拟。

6.1 上部结构安全性验算

波浪对桥梁上部结构产生的上浮力与常规现浇梁所受的荷载不同,不仅要保证无波浪力情况下的结构安全,而且要保证有波浪力情况下的结构安全。为了抵抗波浪上浮力作用,主梁配束除常规的腹板束以外,还在上下缘配通长钢束。抵抗上浮力的通长钢束结构见图 5。

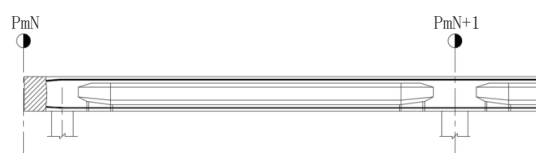


图5 抵抗上浮力的通航钢束结构

施工阶段,主梁在未考虑波浪力与考虑波浪力情况下的应力云图见图6。由图6可知,在施工阶段,考虑波浪力以后,主梁上下缘应力变化约0.6 MPa,施工阶段应力满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中对于压应力 σ_{cc}^I 的要求:

$$\sigma_{cc}^I \leq 0.70 f_{ck}^I = 22.68 \text{ MPa}。$$

式中: f_{ck}^I 为混凝土立方体轴心抗压强度; σ_{cc}^I 为截面预压区边缘混凝土的压应力。

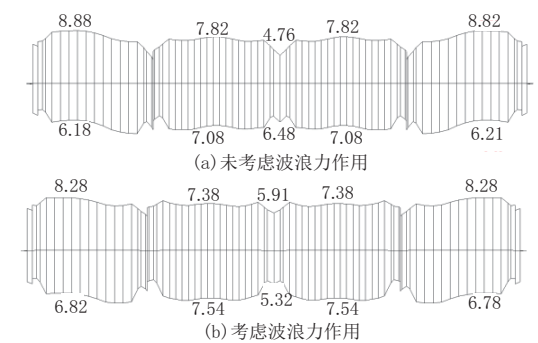


图6 主梁施工阶段正应力云图(单位:MPa)

运营阶段,主梁在未考虑波浪力与考虑波浪力情况下的应力云图见图7。由图7可知,在运营阶段,

考虑波浪力以后,主梁上下缘应力变化约1.5 MPa,频遇组合下满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中对于应力 σ_{st} 的要求:

$$\sigma_{st} - \sigma_{pc} \leq 0.70 f_{tk} = 1.855 \text{ MPa}。$$

式中: σ_{pc} 为混凝土截面边缘预压应力; σ_{st} 为混凝土截面边缘法向拉应力; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值。

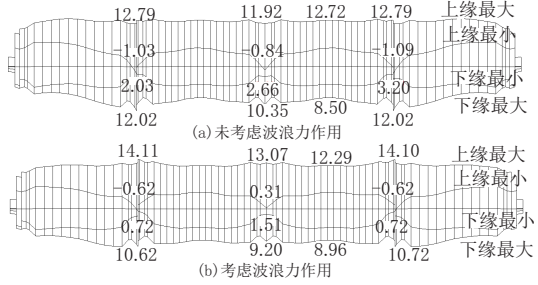


图7 主梁运营阶段正应力云图(单位:MPa)

6.2 下部结构安全性验算

波浪对桥梁下部结构的影响主要是波浪水平力以及波浪产生的上浮力是否导致桥墩受拉。对于桥墩受力来说,考虑波浪力工况是最不安全工况,因此本文仅验算波浪力工况下的下部结构安全性。

建立有限元模型,提取出频遇组合下桥墩立柱与桩基最不利截面位置的内力,见表3。

依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》,计算桥墩立柱和桩基最不利截面裂缝宽度和承载力,结果见表4。

表3 频遇组合下桥墩立柱和桩基最不利截面位置内力汇总

考虑波浪力和浮力情况		边柱(90 cm)	次柱(120 cm)	中柱(120 cm)	边桩(120 cm)	次桩(150 cm)	中桩(150 cm)
频遇组合	弯矩/(kN·m)	-1 950	-2 246	-351	1 463	1 454	69
	轴力/kN	-1 758	-3 476	-3 535	-909	-2 282	-2 405

表4 桥墩立柱和桩基最不利截面裂缝宽度和承载力计算结果汇总

立柱和桩基	内力弯矩/(kN·m)	抗力弯矩/(kN·m)	内力轴力/kN	抗力轴力/kN	裂缝宽度/mm	配筋率/%	配筋
边柱	-1 950	3 380	-1 758	2 862	0.134	5.06	40φ32(双肢)
次柱	-2 246	6 410	-3 476	9 139	0.074	3.13	44φ32(双肢)
中柱	-351	3 340	-3 535	27 014	全截面受压	3.13	44φ32(双肢)
边桩	1 463	6 369	-909	5 007	0.102	2.18	40φ28(双肢)
次桩	1 454	8 906	-2 282	13 066	0.042	1.22	44φ25(双肢)
中桩	69	1 712	-2 405	42 758	全截面受压	1.22	44φ25(双肢)

考虑波浪力作用下,桥墩结构满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》要求。矮墩预应力连续刚构桥下部结构所呈现出的受力特点有:(1)边柱最不利截面处裂缝宽度达到0.134 mm(限值

0.150 mm);中柱全截面受压,表明在波浪力作用下,桥墩不会出现受拉状态。(2)边桩最不利截面处裂缝宽度达到0.102 mm;中桩全截面受压。(3)边柱(桩)、次柱(桩)、中柱(桩)在频遇组合下,结构裂缝宽度由

(下转第107页)

$$W_{cr} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.36+1.7\rho_{te}} \right) = 0.178 \text{ mm} \leq 0.2 \text{ mm}$$

由此计算可知,裂缝计算结果满足规范要求,说明配筋结果合理,具有可参考性。而根据规范拉压杆模型的配筋更为保守,不宜采用。

由图 15 分析可知,在频遇组合效应下,墩顶中部位置处混凝土的拉应力基本降低为 0,说明此时的钢筋承担了全部的拉力,混凝土的压应力比未配钢筋时应力有所降低。这表明混凝土开裂后,内力发生了重分布,可以认为花瓶墩安全满足要求。

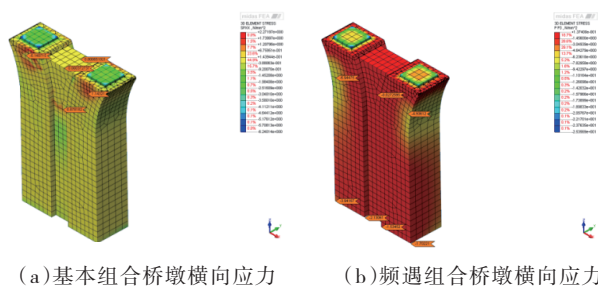


图 15 桥墩非线性模型应力计算结果(单位:MPa)

4 结 论

本文依托某大跨现浇连续桥梁工程,对其下部结构花瓶墩受力进行了分析。通过建立实体有限元模型,对其配筋设计和裂缝分布进行了研究,得到以下结论:

(1)花瓶墩主要受拉部位为墩顶中间部位,受拉范围为墩高的 1/5 范围,且受拉区域拉应力远大于混

凝土抗拉强度,受压区压应力则很小。

(2)基于实体有限元分析结果计算的受拉钢筋数量和规范拉压杆模型计算结果相比,规范更为保守。

(3)非线性分析表明,裂缝分布主要集中在桥墩中间混凝土和两侧混凝土交接面处,该部位需要增设构造钢筋,防止裂缝过大和混凝土崩裂。

(4)混凝土开裂后,横向拉力由混凝土转嫁给钢筋承受,混凝土内力发生重分布,有利于桥墩的受力。

综上所述,采用实体有限元线性和非线性分析相结合,可以有效分析花瓶墩的受力规律。相比于规范,实体有限元计算结果更为精确,建议采用实体模型进行优化计算。

参考文献:

- [1] 梁艳,何畏,唐茂林.桥梁美学 2019 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):8.
- [2] 卢钢.花瓶形钢筋混凝土薄壁墩设计讨论[J].市政技术,2013,31(2):4.
- [3] 周正富,史光军.预应力系杆在花瓶形桥墩中的应用[J].公路,2017,62(6):3.
- [4] 邵卓民.钢筋砼结构统一理论(下)[J].建筑结构,1992(3):5.
- [5] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [6] 李新平,周晶,张勇.薄壁花瓶墩的拉力计算实用方法[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2011,36(2):6.
- [7] 葛占钊,胡国海,张耀元,等.桥梁柱式盖梁内力分析的有限元方法[J].公路,2008(1):5.
- [8] 龙渝川,张楚汉,周元德.基于弥散与分离裂缝模型的混凝土开裂比较研究[J].工程力学,2008,25(3):5.

(上接第 98 页)

大变小,但均满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》限值(0.150 mm)要求。

7 结 语

(1)对于桥面标高受限且受波浪力影响的环岛桥梁设计,须保证桥梁结构在设计年限内满足使用功能。

(2)主梁采用锅底型断面、立柱采用圆柱形排架墩,可以有效地解决波浪力对桥梁结构的影响,为环岛低桥位海上桥梁的设计提供了参考。

(3)采用墩梁固结体系,避免了后期养护成本。

(4)对于受波浪力桥梁设计,上部结构应尽量采取加大梁体自重、缩小跨径、增加受力钢筋等措施。

(5)进行低桥位环岛跨海桥梁设计时,需合理设计联长,边墩建议采用柔度较大的排架墩。

参考文献:

- [1] 李建强.矮墩连续刚构桥设计要点分析[J].广东土木与建筑,2020,27(1):68-70.
- [2] 徐峰俊.横琴新区环岛西路二期及环岛西路至长隆绕行大横琴山道项目波浪专题报告[R].广州:珠江水利委员会珠江水利科学研究院,2019.