

大跨单肢矮墩连续刚构桥设计

刘岩

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:连续刚构桥外形尺寸小、桥下净空大,福州市新建金山大桥主桥采用主跨110 m变高度预应力混凝土连续刚构桥,主桥根部梁高5.2 m,桥墩采用墩高9.57 m的单肢实心墩,介绍了大桥的设计参数、施工方案、计算方法等,对主墩和主墩基础设计进行深度分析。结果表明,该桥设计合理,可为类似桥梁的设计提供一定的参考。

关键词:桥梁设计;大跨连续刚构桥;单肢矮墩;桩土效应

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)02-0082-03

1 工程概况

金山大桥跨越福州闽江,为福州市区连接仓山区与台江区的重要通道。与连续梁相比,连续刚构可以节省支座费用,后期维护也方便。梁高在同等跨度下可以比连续梁低,具有外形尺寸小、桥下净空大的特点。从通航、美观性、两岸接线和交通组织便利等因素考虑,新建金山大桥主梁采用(60+110+60)m变高度混凝土连续刚构箱梁。

该桥为城市主干路,桥址处闽江通航标准Ⅳ级,场地环境类别为Ⅱ类,动峰值加速度0.10g,地震基本烈度7度。地质层为第四系冲洪冲淤积层,覆盖层厚度较大。

2 总体布置

新建金山大桥跨江主桥采用孔跨布置为(60+110+60)m预应力混凝土连续刚构桥,边中跨比0.55,如图1所示。梁底下缘采用半径为499.23 m圆曲线变化。主桥中支点梁高5.2 m,根部梁高为主跨径的1/21;跨中梁高2.4 m,跨中梁高为主跨径的1/46。主墩采用板式单肢墩,墩高9.45 m,基础采用钻孔灌注桩。

3 主要结构设计

3.1 主梁设计

新建金山大桥主梁采用C60混凝土。主桥中支点梁高5.2 m,中支点梁高为主跨径的1/21;跨中梁高2.4 m,跨中梁高为主跨径的1/46,因主梁梁高较

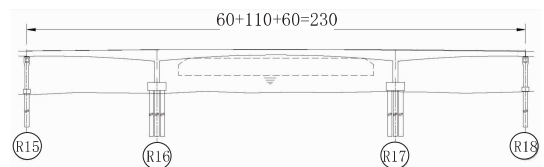


图1 新建金山大桥连续刚构立面布置(单位:m)

小。为满足抗剪截面需求,主梁采用单箱双室斜腹板箱形截面(见图2),顶板宽19.5 m,底板变宽11.175~9.0 m,两侧挑臂各长3.5 m,顶面设1.5%单向横坡。顶板标准厚度0.26 m,倒角根部和翼缘根部厚0.6 m,底板中跨和边跨标准厚0.28 m,过渡至根部厚度为1.3 m。中、边腹板厚度0.45~1.0 m。主梁0#节段长13 m,边跨现浇段长5.9 m,中跨合龙段长2.0 m。主梁采用纵、横、竖三向预应力体系。

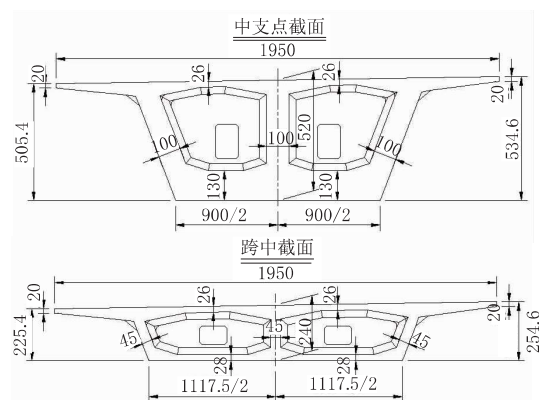


图2 箱梁截面(单位:cm)

主梁计算时考虑桩-土相互作用、中跨合龙施加顶推力、挂篮悬臂施工龄期、基础沉降等工况对结构的影响,进行包络计算。正截面强度安全系数最小值1.22。斜截面抗剪承载能力安全系数最小值1.32。正截面抗裂应力计算,截面上下缘不出现拉应力。斜截面混凝土的主拉应力最小值-0.47。主梁上缘最大压应力18.2 MPa,下缘最大压应力14.3 MPa。混凝土最

收稿日期: 2021-04-27

作者简介: 刘岩(1977—),男,本科,高级工程师,从事桥梁结构设计工作。

大主压应力 12.3 MPa。考虑荷载长期效应增长系数 1.4 后,主梁跨中活载最大挠度为 49.7 mm,小于 $L/600$,主梁各项计算结果均满足规范要求。

3.2 下部结构设计

连续刚构桥线刚度大部分由主墩提供。为满足强度和温度变形要求,矮墩大跨连续刚构桥的主墩一般采用双肢薄壁墩。本项目设计时为满足两岸接线要求,桥面设计高程受限。同时,桥下需满足通航净高要求,扣除主梁高度后主墩高度不能超过 10 m。为满足桥下通航净宽和美观要求,主墩需采用单肢实体墩。墩身设计既要能降低桥墩抗推刚度,又要能满足桥墩承载力要求。因此,主墩是该桥设计的重点与难点。设计时需注意四点:(1)纵向抗推刚度应能够适应混凝土收缩徐变、温度引起的纵桥向变形;(2)结合地质条件选择合理基础方案,降低基础刚度;(3)墩身刚度的选择需考虑稳定性、材料强度、截面布筋的要求;(4)明确墩身内力组成对应采取措施,改善墩身受力性能。

3.2.1 墩身内力分析

设计时首先对桩土效应和墩身内力影响因素两方面进行分析。

设计时将桩周土作用看成线弹性土弹簧,用“m 法”模拟桩土共同作用。从表 1 可看出,桩土中共作用工况与墩底固结工况相比,墩身内力、位移、应力差别很大。因此,设计时需考虑桩土共同作用效应,同时需对桩基布置方案对比,与减小基础刚度。

表 1 主墩墩身内力结果对比		
项目	墩底固结	桩土模拟
墩底弯矩/(kN·m)	251 678	45 946
墩顶位移/mm	7.07	14.97
墩身应力/MPa	+34.06 / -23.12	+10.68 / -0.66

注:应力“+”为受压,“-”为受拉。

考虑桩土效应后,从表 2 可以看出,混凝土收缩徐变对主墩内力影响最大,其次是整体升(降)温和上部结构预应力产生的次内力。设计时要考虑上部结构预应力对下部结构受力影响,同时考虑中跨合龙施加顶推力等措施,改善混凝土收缩徐变影响,改善墩身受力性能。

3.2.2 桩基方案比

因连续刚构桥墩矮,结构对混凝土收缩徐变、温度变化、预应力次内力等非常敏感。基础刚度直接影响桥梁整体计算结果,结构计算时需考虑桩土共同作用。同时,基础又需要具有一定的抗弯刚度,以满

表 2 主墩内力分项统计

项目	弯矩/(kN·m)
活载	6 103.8
混凝土收缩徐变	26 022.2
整体升(降)温	9 919.9
梯度温差	3 908.3
沉降	2 305.2
船撞力	3 315.4
制动力	1 748.4
纵向风力	485.4
预应力次内力	8 212.9

足悬臂施工时的安全。设计研究了 3 种桩基布置形式:(1)6 根 $\phi 2.0$ m 钻孔桩,桩长约 95 m;(2)6 根 $\phi 2.2$ m 钻孔桩,桩长约 90 m;(3)13 根 $\phi 1.5$ m 钻孔桩,桩长约 65 m。各方案平面布置如图 3 所示。

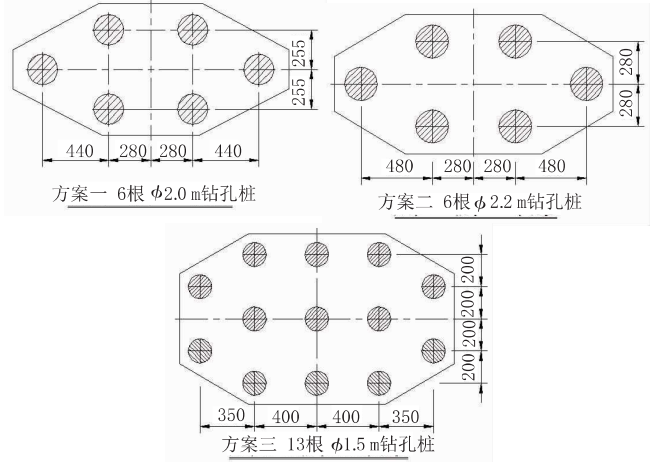


图 3 主墩基础方案平面布置图(单位:cm)

桩基方案对比见表 3。从基础刚度、结构受力条件和基础工程量等方面比较,方案一主墩基础采用 6 根 $\phi 2.0$ m 钻孔灌注桩,基础刚度最小、桩基工程量较小,是最为合理的。

表 3 桩基方案对比

项目	方案一	方案二	方案三
桩径/m	2.0	2.2	1.5
桩基根数	6	6	13
桩长/m	95	90	75
承台底高程/m	0.5	0.5	0.5
河床高程/m	-4	-4	-4
水平刚度/(kN·m ⁻¹)	174 115	231 578	176 414
转角刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	60 975 610	83 008 218	163 792 115

3.2.3 桥墩尺寸确定

桥墩采用单肢实心墩,墩身刚度减小对上、下部受力均有利,单墩矩形截面尺寸确定是关键,减小墩身尺寸可降低桥墩抗推刚度,可改善桥墩和基础受力,但会使墩身抗弯刚度减少,桥墩承载力不足。同时,为改善小截面尺寸桥墩的受力,提高施工阶段稳

定性和结构抗震性能,墩身设竖向预应力,并在中跨合龙施工时施加顶推力。

计算时考虑桩土相互作用,采用推荐基础刚度,对墩方案,选取 2.2 m、2.4 m、2.6 m 三种墩宽进行计算对比分析。中跨合龙顶推力为 3 000 kN 时,运营阶段墩身应力见表 4。

表 4 运营阶段墩身应力统计					
项目		墩身主跨侧应力 /MPa		墩身边跨侧应力 /MPa	
		最小应力	最大应力	最小应力	最大应力
墩宽 2.2 m	墩顶	-1.35	+7.52	+3.53	+12.24
	墩底	+7.6	+12.33	-1.82	+3.83
墩宽 2.4 m	墩顶	-0.75	+7.05	+3.13	+11.33
	墩底	+6.91	+11.26	-0.63	+3.67
墩宽 2.6 m	墩顶	-1.20	+6.62	+2.80	+10.49
	墩底	+6.29	+10.33	-0.55	+3.55

由表 4 可以看出,通过施加墩身预应力、中跨合龙顶推力,2.4 m 宽墩身结构满足预应力混凝土结构 A 类构件的设计要求,墩宽减小或增大需提高合龙顶推力或配筋率,增加设计困难和施工难度。

3.2.4 主梁中跨合龙施工与墩身应力调整

中跨合龙通过施加顶推力,可有效改善墩身和墩顶处主梁受力^[1]。改善成桥后混凝土收缩徐变引起的主梁下挠见表 5。不施加合龙顶推力或合龙顶推力施加过大,会造成墩顶水平位移过大,跨中下挠或上拱位移过大,对桥梁受力不利。本桥合龙顶推力确定为 3 000 kN,运营阶段桥墩基本保持垂直状态,主梁跨中基本无下挠,并改善了主梁和主墩的受力性能。

表 5 不同顶推力墩身应力、位移及跨中挠度对比								
项目			合龙顶推力 /kN					
			0	2 000	3 000	4 000	6 000	
顶推前后墩顶位移差 /mm			+8	-15	-22	-29	-44	
运营阶段墩顶位移 /mm			+24	+11	+4	-3	-16	
运营阶段跨中挠度 /mm			-13	-3	+2	+8	+18	
墩身主跨 侧应力 /MPa	墩顶	最小	-3.6	-2.2	-1.2	-1.1	-0.6	
		最大	+4.8	6.3	+7.5	8.3	10.9	
	墩底	最小	7.8	7.1	+6.9	6.5	5.9	
		最大	12.8	12.0	+11.3	11.4	10.6	
	墩身边跨 侧应力 /MPa	墩顶	最小	3.3	3.2	+3.1	3.1	2.9
			最大	11.7	11.5	+11.3	11.3	11.1
		墩底	最小	-3.9	-1.8	-0.6	0.4	2.5
			最大	2.5	3.1	+3.7	3.7	4.4

注:位移向跨中为“+”,挠度向上为“+”。

经过对比分析,主墩墩身采用预应力混凝土板式桥墩,墩身横桥向宽度 9.0 m,顺桥向宽度 2.4 m,主墩墩高 9.45 m,采用 C50 混凝土。墩身顺桥向两侧共设置 100 根 JL32 高强度精轧螺纹预应力钢筋,

JL32 预应力精轧螺纹钢筋 $f_{pk}=930$ MPa。基础采用 6 根直径 $\phi 2.0$ m 钻孔灌注桩,呈梅花型布置,采用水下 C30 混凝土。承台采用多边形承台,轮廓尺寸为 18.4 m $\times$ 8.5 m $\times$ 3.5 m,采用 C40 混凝土,如图 4 所示。

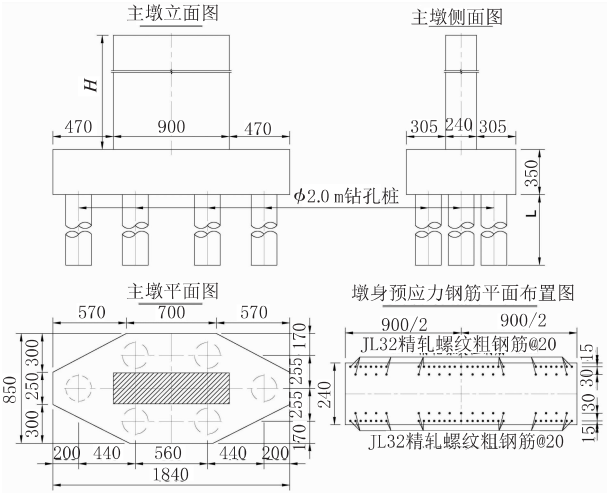


图 4 主墩结构图及墩身预应力平面布置图(单位:cm)

4 结构动力特性与抗震性能分析

成桥状态振型特点见表 6,各振型的自振周期均未超过 1 s,结构动力性能良好^[2]。

表 6 成桥状态结构动力特性			
模态	振型主要特性	自振频率 f /Hz	自振周期 T /s
1	主梁竖弯	1.122 1	0.891 2
2	主梁横弯	1.228 3	0.814 1
3	主梁横弯	1.247 0	0.801 9
4	主梁纵向一致振动	1.268 1	0.788 6
5	主梁横弯	1.523 4	0.656 4
6	边墩纵向振动	1.700 9	0.587 9

E2 地震作用下,主墩和桩基纵、横桥向最不利截面弯矩小于截面等效屈服弯矩见表 7。主桥结构满足抗震性能要求。

表 7 E2 地震作用下最不利轴力下主桥主墩和桩基屈服弯矩验算					
E2 地震作用					
组合工况	位置	最小轴力 P /kN	弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}$)	等效屈服弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}$)	安全系数
恒载 $\pm$ (纵向 + 竖向地震作用)	墩底	56 363	104 602	114 600	1.1
	桩顶	-8 823	8 484	17 370	2.05
恒载 $\pm$ (横向 + 竖向地震作用)	墩底	57 156	362 632	414 400	1.14
	桩顶	-16 743	11 226	12 520	1.12

注:轴力正值表示压力,负值表示拉力。

5 稳定性分析

本桥对施工阶段与使用阶段稳定分析得出,悬臂施工阶段为稳定最不利阶段^[3]。验算考虑主墩两侧混

(下转第 87 页)

地震荷载组合采用 SRSS 法,纵向和横向地震作用计算时分别考虑 65%的竖向作用。

根据公路桥梁抗震设计规范,E1 地震作用下,桥梁结构处于弹性状态,计算采用轴力-弯矩-曲率曲线中的首次屈服弯矩进行控制。若 E1 地震作用下塑性铰区的弯矩小于首次屈服弯矩,就认为桥梁结构处于弹性状态。

E1 地震作用下,桥墩纵向弯矩见表 3。

表 3 地震作用下桥墩最大弯矩 单位:kN·m		
桥墩号	E1 地震最大弯矩	E2 地震最大弯矩
1 号桥墩	175.7	324.2
2 号桥墩	175.7	324.2

为了得到桥墩截面的首次屈服弯矩,需要绘制弯矩曲率曲线,混凝土材料采用 mander 模型,钢筋采用双折线模型。以 2 号桥墩为例,得到截面弯矩曲率曲线,如图 7 所示。

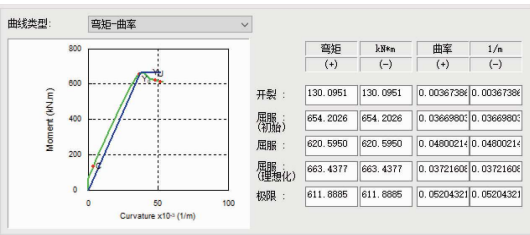


图 7 桥墩截面弯矩曲率曲线

由此可见,在 E1、E2 地震作用下,桥墩均处于弹性状态。弹性抗震设计,用构件的强度作为衡量结

构性能的指标,只需校核构件的强度是否满足要求。经验算,桥墩单元强度验算满足规范要求。

6 结 语

本文以三跨钢箱景观圆弧拱桥为例,介绍了桥梁总体布置、上下部结构设计、建筑景观设计。为验证结构设计的合理性,利用大型有限元软件对桥梁结构进行了静力、稳定、特征值计算分析和两阶段抗震设计分析。

(1)主桥结构的刚度、强度、稳定性均满足规范要求。

(2)在 E1、E2 地震作用下,采用弯矩曲率曲线进行验算,结构均处于弹性状态,截面抗弯强度满足要求。

(3)通过该桥的设计、静力、动力计算的介绍,可为同类景观圆弧拱桥的设计提供借鉴和参考。

参考文献:

[1] 徐君兰,孙淑红.钢桥[M].北京:人民交通出版社,2010.
[2] JTG D64—2015.公路钢结构桥梁设计规范[S].
[3] 郑力,唐春艳,张哲.双层连续梁桥抗震分析[J].中外公路,2015(12): 113-116.
[4] 王克海.桥梁抗震研究[M].北京:中国铁道出版社,2007.
[5] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006.
[6] 范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.

(上接第 84 页)

凝土节段浇筑相差 1/2 节段、挂篮移动不同步、施工临时荷载不同步和机具动力系数、挂篮模板坠落、梁体自重不均匀、两侧风荷载相差 50%等工况。施工阶段一阶纵向失稳,稳定特征值为 24.2,该桥一类稳定安全系数大于 4,且安全度较高。

6 结 语

通过对比分析与结构验算可知,大跨度矮墩连续刚构桥设计,考虑“桩-土-结构”的相互作用^[4];考虑中跨合龙时施加顶推力等施工措施;墩身选择合理的截面尺寸,桥墩可选择单壁墩结构。新建金山

大桥综合考虑受力与自身承载力要求,选择了合适的基础形式和桥墩尺寸。该桥设计合理、各项指标满足规范要求,可为类似桥梁的设计提供一定的参考。

参考文献:

[1] 李正凯,刘殿元.矮墩连续刚构桥合龙顶推计算分析及施工控制研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(3):176-179.
[2] 曾金明.大跨连续刚构桥系梁地震响应分析[J].交通科技,2018(4): 93-96.
[3] 周建波.沱江 130 m 主跨连续刚构桥设计[J].城市道桥与防洪,2020 (3):62-66.
[4] 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 (1):68-70.