

[文章编号] 1003—4684(2020)02-0084-04

连续刚构拱桥拱梁墩结合处力学特性研究

刘耀东, 李子昂

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 拱梁墩结合处是连续刚构拱桥的薄弱部位,以某(90+180+90) m 连续刚构拱桥为背景,通过有限元软件采用先整体后局部的分析方法计算拱梁墩结合处在恒载和恒载+活载两种工况下的受力和变形情况。研究表明:在成桥阶段活载对结合处应力增加影响较小,该桥拱座与拱肋接触部位较为薄弱,可参考在拱肋底端加装应力扩散板。

[关键词] 连续刚构拱桥; 拱梁墩结合处; 有限元; 应力分布

[中图分类号] U448.23 [文献标识码] A

大跨度连续刚构拱桥是一种新型的组体系桥梁,主要由拱肋、横撑、吊杆、主梁构成。拱肋、主梁和墩结合处承受各构件的轴力、剪力和弯矩的共同作用,此部位不仅存在轴力、剪力、弯矩耦合的问题,还存在钢结构向混凝土结构过渡的问题,受力十分复杂。为确保桥梁结构安全,对这一部位进行精细化有限元受力分析十分必要。

某连续刚构拱桥,左边为小里程方向,刚构部分孔跨布置为(90+180+90) m,桥宽 13.3 m。主梁采用单箱单室变高度箱形截面。拱桥采用钢管混凝土拱,计算跨度 $L=180.0$ m,设计矢高 $f=36.0$ m,拱轴线采用二次抛物线,采用等高度哑铃形截面,弦管直径 $\Phi=1.1$ m,弦管之间用钢缀板连接,拱肋弦管及缀板内填充微膨胀混凝土。连续刚构与钢管混凝土拱通过剪力钉在拱脚处连为一体。连续刚构拱桥总体布置见图 1。采用先整体后局部的分析方法对拱梁墩结合处进行分析。在对拱梁墩结合处分析之前,首先对全桥进行静力分析,得到 14#号墩上部的拱梁墩结合处各截面内力,然后以结合处为隔离体进行精细化分析。

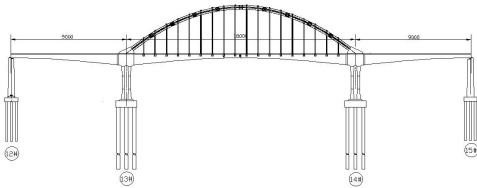


图 1 连续刚构拱桥总体布置图 cm

1 全桥静力分析

采用 MIDAS/Civil 建立空间杆系模型,计算全桥在恒载和恒载+活载两种工况下各截面弯矩、轴力见图 2、图 3。



图 2 桥梁各截面弯矩图 kN·m

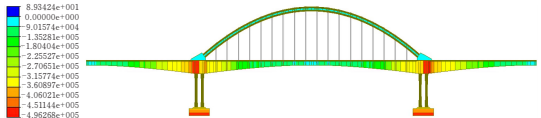


图 3 桥梁各截面轴力图 kN

根据圣维南原理(Saint-Venant's Principle),为消除边界效应,按以下原则选取有限元模型范围。主梁截断处距离拱梁墩结合处的距离大于 1.5 倍拱梁墩结合处高度和长度,截断的拱肋伸出结合段的长度大于 1.5 倍拱肋圆截面直径^[1]。选取 14#墩上部主梁距桥墩中心线左右 20 m 及钢管混凝土拱伸出拱座 2.5 m 为模型范围。图 2 和图 3 中拱梁墩结合处边界主梁截面和拱肋截面的内力见表 1。表 1 中以 14#桥墩中心线向右 20 m 处的横桥向截面为主梁大里程方向截面,向左 20 m 处的横桥向截面为主梁小里程方向截面,以拱肋伸出拱座 2.5 m 处拱肋横截面为拱肋截面,以小里程往大里程方向左为左侧拱肋,右为右侧拱肋。在进行结合处模型局部分析时,表 1 中所列的不同内力作为外荷载加载

在拱梁墩结合处相应的截面。

表 1 拱梁墩结合处边界内力

		荷载工况	
		恒载	恒载+活载
主梁小里程方向截面	弯矩/(kN·m)	−719810	−739411
	剪力/kN	31991	33319
	轴力/kN	−272194	−271133
主梁大里程方向截面	弯矩/(kN·m)	−419384	−435801
	剪力/kN	43366	44766
	轴力/kN	−343178	−340038
左侧拱肋截面	弯矩/(kN·m)	−1652	−1740
	剪力/kN	−1532	−1581
	轴力/kN	−54244	−54975
右侧拱肋截面	弯矩/(kN·m)	−1657	−1745
	剪力/kN	−1531	−1583
	轴力/kN	−54226	−54967

2 拱梁墩结合处有限元计算

2.1 结合处有限元模型

采用 MIDAS/FEA 进行拱梁墩结合处细部分析,基本假定如下:

- 1)构件的应力应变符合胡克定律。
- 2)结合处所采用的钢筋和混凝土均为各向同性材料。
- 3)对于普通钢筋不予考虑。
- 4)对于钢材与混凝土之间的滑移不进行考虑。
- 5)对于由于制造加工引起的偏心、缺陷和残余应力等不予考虑^[1]。

建模材料参数^[2]见表 2。

表 2 有限元模型材料参数

材料	弹性模量/ (kN·m ⁻²)	泊松比	抗拉强度设 计值/MPa	抗压强度设 计值/MPa
C60 混凝土	36000000	0.2	2.04	26.5
C65 混凝土	36500000	0.2	2.09	28.5
C70 混凝土	37000000	0.2	2.14	30.5
Q345 钢材	206000000	0.3	295	295
Φ32 mm 高精 轧螺纹钢	200000000	0.3	770	770
Φ15.24 mm 低松驰钢绞线	195000000	0.3	1260	1260

该模型混凝土和钢拱肋采用实体单元模拟,预应力筋采用杆单元模拟。拱座处是受力复杂区域,对该处网格划分予以加密。对于钢管混凝土拱肋和混凝土接触部分,剪力钉为钢管混凝土拱肋与混凝土间的弹性连接件。计算模型中未采用剪力钉单元,利用拱肋钢块体单元与混凝土块体单元共节点的方式进行模型单元划分^[3]。共划分节点 143 054 个,单元 256 548 个。将双薄壁墩底面假定为固结,将主梁小里程方向截面、主梁大里程方向截面、钢管

混凝土拱肋截断处截面设为边界。将边界截面单元节点与截面形心节点通过刚性连接连为一体形成刚性面,施加边界内力于形心节点,以此来模拟截面荷载的作用方式。拱梁墩结合处有限元模型见图 4。计算工况为成桥阶段恒载作用下的工况和恒载+活载作用下的工况。

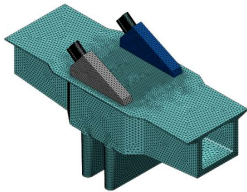


图 4 拱梁墩结合处有限元模型

2.2 计算结果分析

两个工况的计算结果都表明拱梁墩结合处受力复杂,大部分处于受压状态,且压应力在合理范围内。选取恒载+活载工况作为最不利工况,从变形和受力两方面对拱梁墩结合处进行分析^[4-5]。

2.2.1 拱梁墩结合处位移变形分析 两工况下的计算结果表明位移符合规范要求。由图 5 可知最大位移 9 mm 出现在小里程端处,其原因是拱肋对拱座处斜向压力及小里程端处的轴向压力共同作用。该位移变形对结构影响较小,符合规范要求。

2.2.2 拱梁墩结合处应力分析 恒载+活载工况下计算结果表明拱梁墩结合处大部分均处于受压状态。由图 6、图 7 可知主梁压应力分布沿顺桥向中心线对称,主梁的腹板为主要受压构件。混凝土部分承受最大压应力值 27.89 MPa 出现在右半边薄壁墩与主梁固结处,超出混凝土抗压强度设计值 26.5 MPa。由于此压力仅出现在局部很小的区域,且计算中未考虑应力重分布现象,因此该部位应力超限不会对结构产生安全影响。最大拉应力 1.23 MPa 出现在左半边薄壁墩处,此拉力满足规范设计要求。

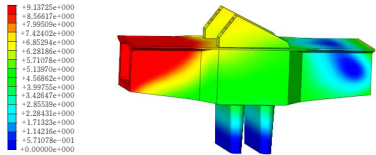


图 5 恒载+活载工况下位移云图 mm

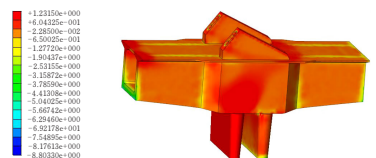


图 6 恒载+活载工况下主拉应力云图 MPa

在整个结合处中,拱座部位应力分布最复杂。除拱座处转角和底部应力分布均匀,其余部位应力

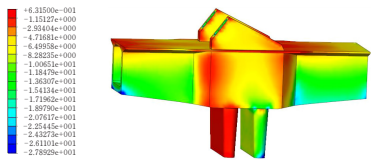


图 7 恒载+活载工况下主压应力云图 MPa

分布复杂。由图 8 可知,钢管混凝土拱和拱座混凝土接触部分产生明显的应力集中,缀板内混凝土与拱座混凝土接触部位应力相对过渡平缓。这表明两种刚度相差较大的材料接触承压时会产生接触面变形不协调,从而引起局部应力过大,而两种刚度近似或相同的材料接触承压时会缓解应力集中现象。同时,缀板内灌注混凝土导致混凝土相互接触面积较大,也在一定程度上缓解拱座处的应力集中现象。由于在拱座处随着远离钢管拱和混凝土接触部位应力迅速变小,因此在拱座设计时应主要考虑钢管混凝土拱和拱座接触部位。

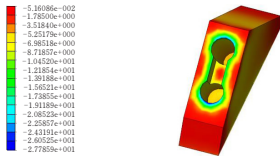


图 8 恒载+活载作用下拱座应力云图 MPa

对于钢管拱肋分析,由图 9 可知,拱肋处应力随着深入拱座混凝土而减小。这是由于拱肋与拱座混凝土通过剪力钉连接,使得浇筑在拱座中较浅的拱肋承担更大的应力。因此剪力钉在设计时可以采用上密下疏的方式来优化。拱肋中的应力最大值 126.89 MPa 出现在拱肋截断面处。由于外力作用在此处未完成应力扩散所以造成此处应力集中。这一值满足规范要求。

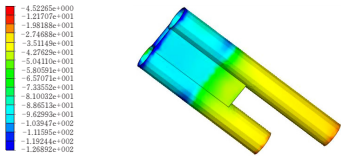


图 9 恒载+活载作用下拱肋应力云图 MPa

表 3 拱梁墩结合处大应力出现位置

部位	结构所处位置
部位 1	双薄壁左墩
部位 2	双薄壁墩与主梁固结右端
部位 3	拱肋与拱座接触面
部位 4	拱肋截断面处
部位 5	缀板内砼与拱座砼接触处

经过计算对比,在恒载工况下,拱梁墩结合处应力分布区域和恒载+活载工况下的应力分布区域相似。恒载+活载工况下结合处出现大应力的部位见表 3,通过柱状图比较两种工况下大应力的区别。

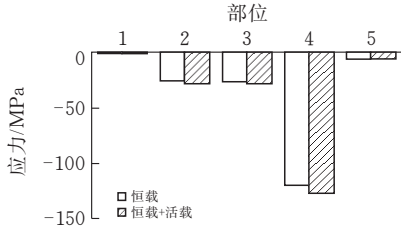


图 10 不同工况关键位置大应力柱状图

由图 10 可知,在恒载+活载工况下不同位置的大应力和恒载工况下大应力基本一致。差值范围在 1.5%~7.4%之间。

3 拱梁墩结合处改良

图 8 中,钢管混凝土拱和拱座混凝土接触部分产生明显的应力超过混凝土抗压强度设计值,针对这一现象,为改善拱座处受力,采用提高混凝土强度等级为 C65 和 C70 和加焊拱肋端头应力扩散板这两种方式进行试验,研究这两种方式是否对拱座受力有改善作用。

3.1 对钢拱肋底端加焊应力扩散板

对已加焊应力扩散板的钢拱肋进行重新建模见图 11。

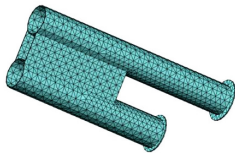


图 11 拱肋改善有限元模型

仅计算模型在恒载+活载工况下的拱座应力分布见图 12。

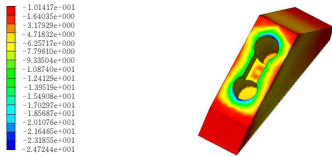


图 12 改善拱肋拱座应力图 MPa

比较图 12 和图 8 可知,加装应力扩散板拱座的应力云图与未加装应力扩散板拱座的应力云图相似。对比数值发现,拱肋与拱座接触部位的最大压应力由 27.79 MPa 降至 24.72 MPa,小于混凝土抗压强度设计值 26.5 MPa,应力降幅达 10.5%。

3.2 提高混凝土等级

依次计算模型在恒载+活载工况下采用 C60、C65、C70 三种混凝土等级情况下的模型应力分布,将关键位置的应力情况列出见表 4。

由表 4 可知,提高混凝土等级对模型应力的分布影响不大,应力差值范围在 0~3.9%。模型采用 C65 或 C70 混凝土计算所得混凝土最大压应力均小

于相应混凝土抗压强度设计值。但与加装应力扩散板相比,后者更为经济方便。

表 4 不同混凝土等级下模型应力 MPa

部位	C60	C65	C70
部位 1	0.56	0.57	0.56
部位 2	−21.39	−21.45	−21.44
部位 3	−27.79	−27.82	−28.90
部位 4	−122.33	−121.58	−120.86
部位 5	−4.52	−4.55	−4.61

4 结论

通过对连续刚构拱桥拱梁墩结合处的分析计算,得到以下结论与建议:

- 1)该连续刚构拱桥的拱梁墩结合处大部分处于受压状态,安全性基本满足规范要求。
- 2)钢管拱肋拱脚处应力大小随着深入拱座混凝土而减小,建议剪力钉可以采用上密下疏的方式布置。

3)在拱肋底端加焊应力扩散板对拱座处受力改善较为明显。

[参 考 文 献]

[1] 刘斌. V 构钢管混凝土拱桥钢—混结合段受力性能研究[D].长沙:中南大学,2013.

[2] 中交公路规划设计院有限公司.JTG3362—2018.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社,2018.

[3] 马坤全,李国胜,吴定俊.V 形刚构组合拱桥拱脚空间应力分析[J].世界桥梁,2003(1):48 -51.

[4] 刘忠平,朱俊樸.铁路单箱单室梁-拱组合桥梁拱结合处受力研究[J].高速铁路技术,2016,7(4):60-65.

[5] 郑振飞,徐艳,陈宝春.深圳北站大桥拱墩固结点局部应力分析[J].中国公路学报,2000(2):71-74.

[6] 姜军.大跨度连续刚构拱组合桥结合部受力行为与锚固区局部应力研究[D].成都:西南交通大学,2013.

Research on Mechanical Characteristics of Arch Beam Pier Joint of Continuous Rigid Frame Arch Bridge

LIU Yaodong, LI Ziang

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: The joint of arch-beam-pier is the weak part of continuous rigid frame arch bridge. Taking a (90+180+90) m continuous rigid frame arch bridge as the background and using the finite element software, the stress and deformation of the joint of arch-beam-pier under dead load and dead load + live load were calculated by the method of global analysis and then local analysis. The results show that live load exerts little effect on the stress increase of the joint of arch-beam-pier, and the stress between the arch seat and the arch rib of the bridge exceeds the limit. A stress diffuser plate may be considered at the bottom of the arch rib to reduce the stress.

Keywords: continuous rigid frame arch bridge; joint of arch-beam-pier; finite element; stress distribution

[责任编辑:裴 琴]