

空腹式箱形拱桥承载力检测评定

宋泽冈¹, 杨敏²

(1. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051; 2. 西南交通建设集团股份有限公司, 云南 昆明 650032)

摘要:为了确保桥梁结构及其运营安全,对现役桥梁进行承载力检测评定具有重要意义。该文以某90 m跨径空腹式箱形拱桥为依托,对其缺损状况、材质状况与状态参数进行检测评定,确定分项检算系数;然后分别采用原设计与现行规范,对主拱圈持久状况承载力极限状态和正常使用极限状态进行检算评定。结果表明:采用现行规范检算时,较原设计规范,主拱圈正截面抗压承载力安全系数明显降低,汽车荷载作用下挠度显著增大,反映主拱圈承载力安全储备不足,应引起足够重视。

关键词:箱形拱桥;承载力;检测评定;主拱圈;结构检算

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

随着使用年限的增长和交通流量的增大,大量现役桥梁已经出现不同程度的损伤^[1-2],如老化、破损、开裂、下挠等,危桥逐年增多,部分桥梁承载力明显下降。为了确保桥梁结构及其运营安全,对现役桥梁进行承载力检测评定具有重要意义^[3-5]。目前,针对各种结构形式拱桥的承载力已有较多研究,主要包括拱桥极限承载力计算方法^[6],结构损伤识别与极限承载力分析^[7-8],材料与几何非线性、荷载条件、加载方式等因素对极限承载力的影响^[9]等方面。在实桥专项检测评定方面,有学者提出了基于外观调查的拱桥检算系数计算方法^[10],而考虑原设计与现行规范下拱桥承载力对比的研究相对较少。

本文以1×90 m跨径空腹式箱形拱桥为依托,通过对其缺损状况、材质状况与状态参数进行检测评定,确定分项检算系数,并分别采用原设计与现行规范,对主拱圈承载力进行检算评定,以掌握桥梁结构安全状况,为桥梁养护管理决策提供基础数据。

1 桥梁概况及有限元建模

1.1 桥梁概况

某1×90 m跨径空腹式箱形拱桥,主拱圈计

算跨径 $L=90.93$ m,矢高 $f=15.85$ m,净矢跨比 $f_0/L_0=15.1$ m/90 m $\approx 1/6$;主拱圈为等截面悬链线箱形无铰拱,拱轴系数 $m=2.365$;拱圈高1.5 m,宽7.5 m,由5箱组成。拱上腹孔共设有10孔,采用净矢跨比 $f_0/L_0=1$ m/5 m $=1/5$ 预制钢筋混凝土板拱。设计荷载:汽车-20级,挂车-100;桥面布置:1.25 m(人行道)+7.0 m(行车道)+1.25 m(人行道)。桥梁跨中横断面布置如图1所示。

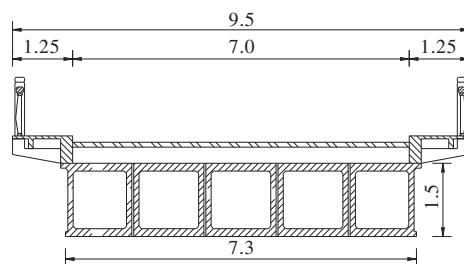


图1 跨中横断面布置图(单位:m)

1.2 有限元建模

采用桥梁通用有限元软件建立桥梁模型,桥梁结构共划分为252个单元、272个节点;采用实测的主拱圈拱轴线线形,立墙与主拱圈采用刚臂连接,腹拱圈与桥面板间拱上建筑作为恒载计入。桥梁有限元模型如图2所示。注:自拱脚往拱顶方向,腹孔横墙编号依次为1[#]、2[#]、3[#]、4[#]。

收稿日期:2022-12-22(修改稿)

基金项目:云南省交通运输厅科技创新及示范项目(编号:云交科教便[2021]86号一(二));云南省交通运输厅科技项目(编号:云交科2016(A)02)

作者简介:宋泽冈,男,硕士,正高级工程师.E-mail:94181915@qq.com

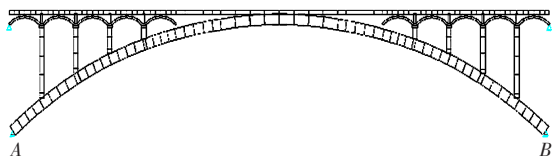


图2 桥梁有限元模型

2 检算参数及工况

2.1 分项检算系数

对依托桥梁进行缺损状况检查评估、材质状况与状态参数检测评定,确定分项检算系数。经检测,该桥存在“主拱圈混凝土局部不密实、渗水,腹孔拱圈横向开裂或断裂、渗水,立墙竖向开裂,侧墙局部开裂”等病害,取桥梁结构缺损状况评定标度为4;桥梁结构混凝土强度、钢筋锈蚀电位、混凝土电阻率、混凝土碳化、氯离子含量处于良好状态,评定标度均为1;钢筋保护层厚度偏小,评定标度为2;主拱圈竖向振动基频为理论值的99%,自振频率评定标度为3。根据该桥检测结果,依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)确定分项检算系数如表1所示。

表1 分项检算系数

承载能力检算 系数 Z_1	承载能力恶化 系数 ξ_c	截面折减系数 ξ_c	钢筋截面折减 系数 ξ_s
1.03	0.022	0.99	1.00

2.2 材料参数

主拱圈采用C40混凝土,Ⅱ级钢筋。采用原设计规范检算时,构件工作条件系数取0.95,混凝土及钢筋安全系数取1.25;按现行规范检算时,按C40混凝土相关参数取值。

2.3 荷载或作用

2.3.1 永久作用

自重:按照结构实际尺寸考虑,结构钢筋混凝土

重度取 26 kN/m^3 ,桥面系重度取 24 kN/m^3 ,拱上填料重度取 22 kN/m^3 。混凝土收缩和徐变:取混凝土名义收缩系数 $\epsilon_{cs0}=0.310 \times 10^{-3}$,混凝土名义徐变系数 Φ_0 按规范取值,取相对湿度为70%。

2.3.2 可变作用

汽车荷载:按原设计规范检算时,采用汽车-20级,挂车-100;按现行规范检算时,采用公路-Ⅱ级。人群荷载:取标准值 3.0 kN/m^2 。温度荷载:均匀温度,取整体升温 $+15^\circ\text{C}$ 、整体降温 -15°C ;竖向温度梯度,正温差温度基数 $T_1=+14^\circ\text{C}$ 、 $T_2=+5.5^\circ\text{C}$,反温差温度基数 $T_1=-7^\circ\text{C}$ 、 $T_2=-2.75^\circ\text{C}$ 。

2.4 检算工况及荷载组合

分别采用原设计规范包括《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)、《公路砖石及混凝土设计规范》(JTJ 022—85)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)、现行规范包括《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)、《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)对拱桥结构的承载能力极限状态、正常使用极限状态进行检算。工况1、2分别设为原设计规范和现行规范工况。

承载能力极限状态:工况1下,按《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)规定的荷载组合Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ进行验算;工况2下,按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定的基本组合进行验算。

正常使用极限状态:工况1下,按《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)规定的短期静荷载进行验算;工况2下,按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定的频遇组合进行验算。

检算工况及荷载组合如表2所示。

表2 检算工况及荷载组合

工况编号	检算规范	汽车荷载	设计状况	荷载组合
1	原设计 规范	汽车-20级、 挂车-100	承载能力极限状态	组合Ⅰ $1.2S_G + 1.4S'_{Q_1}$
			正常使用极限状态	组合Ⅱ $1.2S_G + 1.1S''_{Q_1}$
			短期静荷载	组合Ⅲ $1.1S_G + 1.3S'_{Q_1} + 1.3S_{Q_2}$
			正常使用极限状态	$1.0S_G + \text{汽车荷载(不计冲击力)}$
2	现行规范	公路-Ⅱ级	承载能力极限状态	基本组合 $\gamma_0[1.2G_{1k} + 1.0G_{2k} + 1.4Q_{1k}(\text{含冲击力}) + 0.75 \times 1.4 \times Q_{2k}]$
			正常使用极限状态	频遇组合 $1.0G_{1k} + 1.0G_{2k} + 0.7 \times Q_{1k}(\text{不计冲击力}) + 0.8 \times Q_{2k}$

注:表中工况1, S_G 为结构重力产生的效应; S'_{Q_1} 为汽车(含冲击力)、人群产生的效应; S''_{Q_1} 为挂车产生的效应; S_{Q_2} 为混凝土收缩、徐变或温度作用产生的效应;工况2, γ_0 为结构重要性系数(取1.1); G_{1k} 为结构重力产生的效应; G_{2k} 为混凝土收缩、徐变作用产生的效应; Q_{1k} 为汽车车道荷载产生的效应; Q_{2k} 为温度作用产生的效应。

3 检算结果

3.1 承载力极限状态

主拱圈属于偏心受压构件,进行正截面抗压承

载力验算。工况1、2下主拱圈荷载效应与抗力对比分别如图3~6所示,各工况荷载组合下控制截面承载力安全系数对比如表3所示。

由表3及图3~6可知:

(1) 工况1:按《公路桥涵设计通用规范》(JTJ

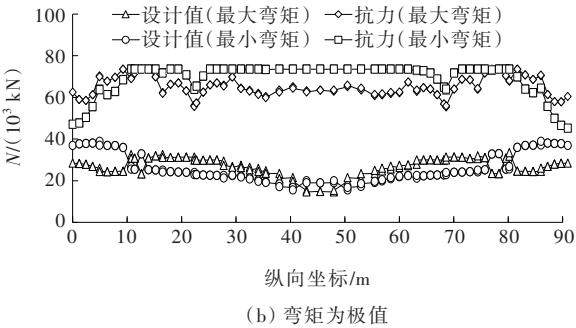
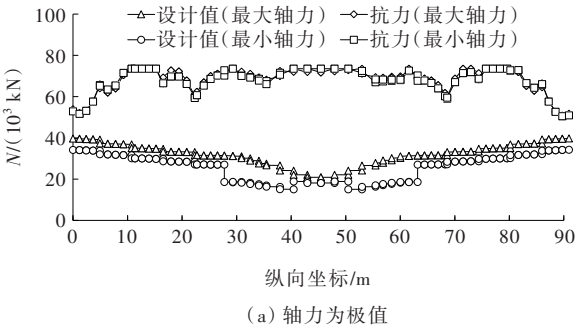


图3 工况1(组合I)主拱圈荷载效应与抗力对比

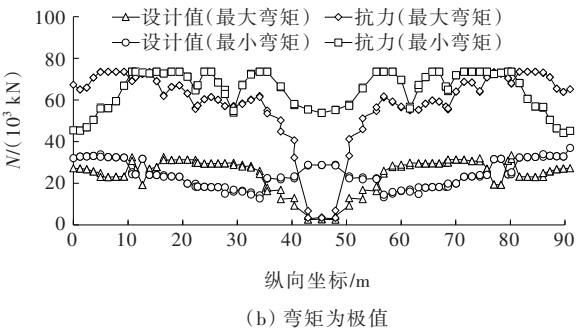
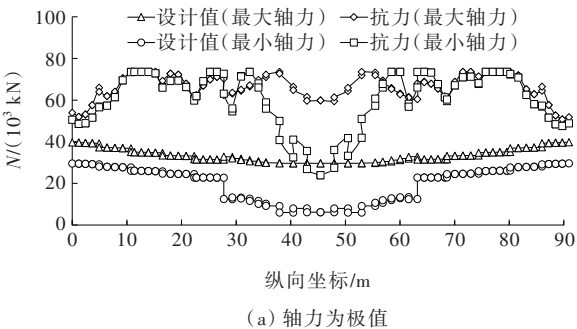


图4 工况1(组合II)主拱圈荷载效应与抗力对比

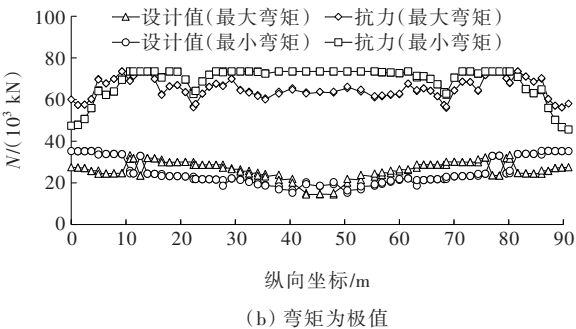
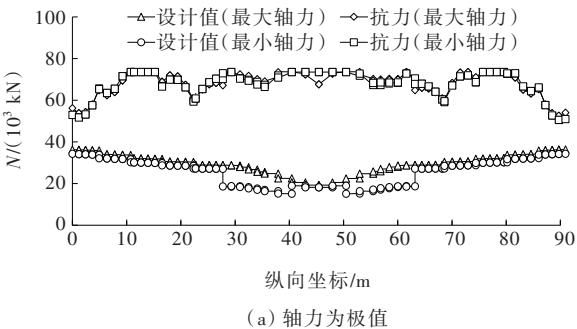


图5 工况1(组合III)主拱圈荷载效应与抗力对比

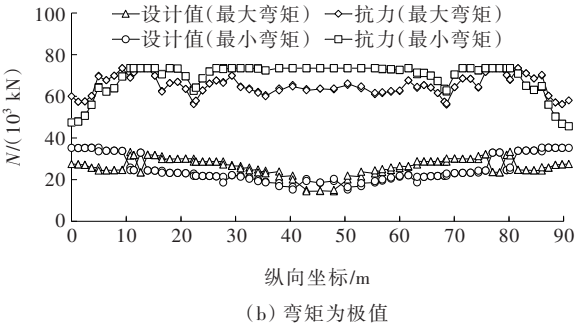
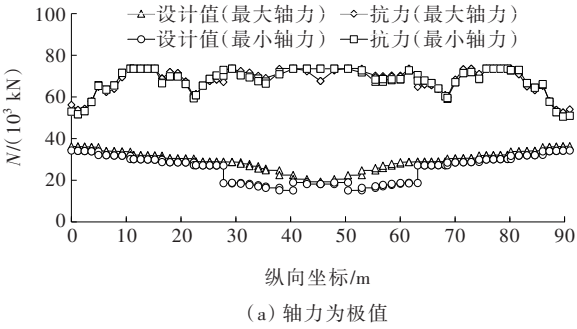


图6 工况2主拱圈荷载效应与抗力对比

表 3 主拱圈各工况荷载组合下控制截面承载力安全系数对比

截面	工况 1								工况 2		工况 2 较工况 1(最小值)偏差率/%	
	组合 I		组合 II		组合 III		最小值		基本组合		轴力	弯矩
	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩		
A 岸拱脚	1.36	1.28	1.36	1.42	1.55	1.35	1.36	1.28	1.20	1.02	-11.76	-20.31
L/4	1.97	1.92	1.97	1.92	2.12	2.02	1.97	1.92	1.49	1.42	-24.37	-26.04
拱顶	3.43	3.88	2.02	1.87	3.51	3.96	2.02	1.87	1.84	1.56	-8.91	-16.58
3L/4	1.95	1.90	1.95	1.90	2.10	2.00	1.95	1.90	1.47	1.40	-24.62	-26.32
B 岸拱脚	1.30	1.22	1.30	1.22	1.49	1.29	1.30	1.22	1.16	0.97	-10.77	-20.49
平均值	2.02		1.69		2.14		1.68		1.35		-19.02	

021—89)规定的荷载组合 I、II、III,依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)偏心受压构件相关规定进行验算。主拱圈控制截面正截面抗压承载力安全系数:荷载组合 I 为 1.22~3.88,荷载组合 II 为 1.22~2.02,荷载组合 III 为 1.29~3.96;两岸拱脚安全系数相对较小;其中,荷载组合 II(最大弯矩受力状态)下承载力于拱顶 5 m 区域显著降低,与荷载效应十分接近。

(2) 工况 2:按《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)规定的基本组合,依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362—2018)偏心受压构件相关规定进行验算。主拱圈控制截面正截面抗压承载力安全系数:除 B 岸拱脚(弯矩)为 $0.97 < 1$ 外,其余为 1.02~1.84;两岸拱脚安全系数相对较小;基本组合(最大弯矩受力状态)下承载力于拱顶 10 m 区域明显降低,与荷载效应差值较小。

3.2 正常使用极限状态

3.2.1 裂缝宽度验算

工况 1、2 下,主拱圈处于全截面受压状态,计算裂缝宽度为 0 mm,满足规范限值 $Z_1\delta_L=0.206$ mm ($Z_1=1.03$,裂缝宽度限值 $\delta_L=0.20$ mm)要求。表明正常使用极限状态下,主拱圈抗裂性满足原设计规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023—85)及现行规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362—2018)要求。

3.2.2 挠度验算

主拱圈挠度验算结果如表 4 所示。

表 4 主拱圈挠度验算结果

工况编号	正负挠度绝对值之和的最大值/mm	规范限值/mm	是否满足
1	$2.8 + -39.3 = 42.1$	$Z_1 f_L = Z_1 \times$	是
2	$0 + -62.7 = 62.7$	$L/1\,000 = 93.7$	是

由表 4 可知:工况 1、2 下,主拱圈正负挠度绝对值之和的最大值分别为 42.1 mm、62.7 mm,均小于规范限值 $Z_1 f_L = Z_1 \times L/1\,000 = 93.7$ mm (f_L 为挠度限值);表明正常使用极限状态下,主拱圈刚度满足原设计规范《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 022—85)及现行规范《公路圬工桥涵设计规范》(JTJ D61—2005)要求。

3.3 两工况检算结果对比

3.3.1 正截面抗压承载力

工况 1、2 下,主拱圈控制截面正截面抗压承载力最小安全系数对比如图 7 所示。

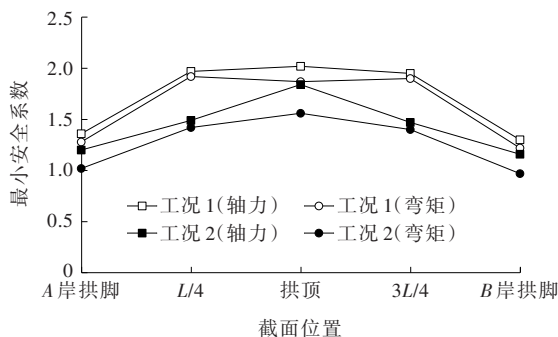


图 7 主拱圈控制截面正截面抗压承载力最小安全系数对比

分析表 3、图 7 可知:较原设计规范(工况 1),采用现行规范(工况 2)检算时,主拱圈 5 个控制截面在轴力、弯矩极值受力状态,其安全系数分别降低 8.91%~24.62%、16.58%~26.32%,平均降低 19.02%。

3.3.2 挠度

分析表 4 可知:汽车荷载作用下,工况 2 较工况 1 验算挠度增加 20.6 mm,增大 48.9%。

4 处治对策

鉴于该桥采用现行规范验算时,其主拱圈承载

力安全储备不足(尤其是两岸拱脚区域),同时,为了提高桥梁承载力,适应当前交通载荷和环境的不利作用,延长桥梁使用寿命,确保桥梁结构与行车安全,提出如下加固处治对策。主拱圈属于偏心受压构件,通常可以采用增大截面、调整拱上建筑恒载、粘贴钢板等方法加固。经综合分析比选,拟采用增大截面、粘贴钢板组合加固方法进行加固,具体措施如下:

(1) 拱背面:在拱脚区段(拱脚至1#横墙)从拱背面加大拱圈截面,采用C50钢筋混凝土,厚度由拱脚处的40 cm线性渐变至1#横墙处的15 cm;新增截面采用双层钢筋网,采用HRB400级直径为20 mm的纵向主筋、直径为12 mm的封闭箍筋,间距均为15 cm。工艺要求:原拱背混凝土表面凿毛至露出粗骨料;植入梅花形布置的剪力筋(直径为16 mm,横、纵向间距50 cm)加强新老混凝土连接,剪力筋与新增截面上层钢筋网形成整体。

(2) 拱腹面:5个箱肋,每个箱肋底面粘贴3块8 mm厚钢板(Q355D级钢),单块钢板宽度为20 cm,横向净间距30 cm。工艺要求:粘贴钢板位置原拱腹混凝土表面凿毛至露出粗骨料;钢板采用压力(不小于0.1 MPa)注胶黏结;钢板两边植入横向错开布置的锚固钢筋(直径为16 mm,纵向间距50 cm)加强连接;钢板纵向焊接接头应错开布置。

5 结论

本文以一座90 m跨径空腹式箱形拱桥为对象,基于依托桥梁缺损状况、材质状况与状态参数的检测评定情况,分别采用原设计与现行规范,对主拱圈承载力进行验算分析,得到如下结论:

(1) 该桥主拱圈强度满足原设计规范要求,基本满足现行规范要求,承载力安全储备不足(尤其是两岸拱脚区域);主拱圈抗裂性、刚度均满足原设计及现行规范要求。

(2) 较原设计规范,采用现行规范检算时,该桥

主拱圈正截面抗压承载力安全系数明显降低(平均降低19.02%),汽车荷载作用下挠度显著增大(增大48.9%);表明随着现行规范汽车荷载在原设计基础上的提高,主拱圈承载力安全储备愈显不足,影响桥梁结构安全,应引起足够重视。

(3) 鉴于中国公路交通流量与通行荷载逐年提升以及结构损伤的累积逐渐影响结构抗力的实际情况,针对服役年限较长的桥梁,不仅需按照原设计规范对其承载力进行检算评定,还应关注桥梁在现行规范下其承载力安全储备情况,以便全面掌握桥梁结构受力性能和安全状况,进而为桥梁养护管理提供技术与决策依据。

(4) 本文提出的“在拱脚区段从拱背面加大拱圈截面”与“拱腹面粘贴钢板”的组合加固方法,便于实施,可作为箱形拱圈加固的一种比选方案。

参考文献:

- [1] 苏成,廖威,秦帆,等.大跨度钢拱桥构件评级体系研究[J].桥梁建设,2017,47(4):84-89.
- [2] 李万恒,申林,王少鹏,等.基于多阶段分区动力测试的桥梁结构损伤评估[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(3):773-780.
- [3] 郑旭.基于影响系数的中小跨径桥梁刚度和承载力评估方法研究[D].大连:大连理工大学,2022.
- [4] 舒国明,曹胜语,方正.桥梁检测管理应用平台研究及应用[J].公路,2019,64(3):138-141.
- [5] 张劲泉.公路旧桥检测评定与加固技术研究及推广应用项目概况[J].公路交通科技,2006,23(4):1-5,25.
- [6] 杨绿峰,郑健,张伟,等.钢管混凝土拱桥极限承载力分析的自适应方法[J].中国公路学报,2017,30(3):191-199.
- [7] 钟正强,刘剑.考虑结构损伤的CFST拱桥极限承载力分析[J].中国公路学报,2012,25(1):95-100.
- [8] 彭卫兵,潘若丹,谢波,等.桥梁结构薄弱部位识别理论及极限承载力计算方法[J].中国公路学报,2014,27(9):66-73.
- [9] 程进,江见鲸,肖汝诚,等.大跨度拱桥极限承载力的参数研究[J].中国公路学报,2003,16(2):45-47.
- [10] 潘聪,廖碧海.基于外观调查的实腹式拱桥检算系数计算方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(S1):779-783.