

空腹式石拱桥主拱圈的3种增大截面法加固效果分析

单成林, 马兴键

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 圬工拱桥常采用增大截面加固, 文中采用3种增大截面方式加固主拱圈, 通过数值计算, 考虑分阶段受力, 分析对比每种方式加固前后主拱圈跨中截面挠度、应力和主拱圈拱脚截面的应力变化, 评估加固效果, 并结合每种加固方式在工程量、施工难易程度、对交通影响及工期等方面进行比较。结果表明: 3种加固方案在加固受力效果方面有明显差异, 但在其他技术经济指标上各有千秋。实际加固工程中可根据加固效果, 优先选择一个方案, 再根据实际情况及现场条件择优选用。

关键词: 圬工拱桥; 主拱圈增大截面加固; 受力计算分析; 技术经济比较

1 引言

石拱桥是中国历史最悠久的桥梁, 具有造型优美、造价低廉、承载潜力高的优点, 得到广泛应用, 数量也众多。是现今许多山区公路、风景区、公园等中、小桥常采用的桥型。但是, 随着使用年限的增加, 作用荷载的增加和增大, 拱桥病害也不断增多, 使得拱桥的结构承载力不足, 因而不能继续满足交通需求。如果采取新建桥梁则不但增加成本, 而且费时, 甚至对交通造成严重影响, 因此针对还有利用价值的石拱桥仍可采用加固维修。

目前, 增大截面法为石拱桥的主要加固方法, 由于其加固效果好、施工较简便、造价较低、对承载力提高显著, 被广泛应用于石拱桥的加固。这种方法主要是通过原拱圈的拱腹或拱背上浇筑或锚喷混凝土, 从而增加主拱圈横截面面积, 提高承载力。

文中针对石拱桥, 分别采用主拱圈拱腹新增框架拱法、拱腹新增套拱法、拱背新增套拱法对其进行加固, 浇筑混凝土及养护阶段中断交通施工, 考虑分阶段受力, 通过有限元分析软件 Ansys 进行数值计算分析, 多方面比较3种加固方案的技术经济指标, 为实际工程应用时选择加固方案提供参考意见。

2 工程背景

某等截面悬链空腹式石拱桥净跨径为50 m, 拱轴

系数 $m=2.814$, 矢跨比 $1/4$, 主拱圈厚度1 m, 宽度8.5 m。主拱圈采用 MU50 块石, 砂浆强度为 M10; 腹拱圈材料为 MU30 的粗料石, 同样为 M10 砂浆。加固前桥型布置如图1所示。

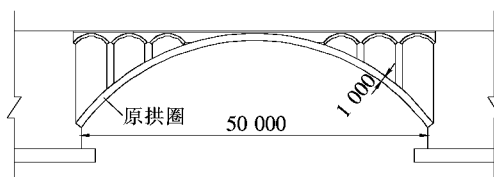


图1 加固前桥型布置图(单位:cm)

3 有限元模型的建立

3.1 几何模型

在实际工程中, 加固层和原拱圈是通过钻孔植筋及喷涂界面剂连接的, 试验研究表明: 复合拱圈破坏时, 原桥拱圈和加固层仍然有效黏结, 并未发生滑移破坏, 表明加固层和原拱圈变形协调。同时考虑新旧层结合面受力复杂, 所以此处为方便模型模拟, 假定新增加固层与原拱圈不发生滑移, 结合面有共同单元节点并固结, 使新旧层材料共同受力。

3.2 单元及材料属性

为避免因为模型简化和单元的不协调产生的误差, 更加真实、准确地反映结构的力学性能, 同时文献通过静载试验和有限元分析结果对比, 证明实体单元模拟基本能反映加固后拱桥的实际受力情况。所以该

文均采用三维实体单元 Solid65 建立石拱桥计算模型。

进行有限元分析之前需要输入结构的材料属性,新增加固层的材料采用 C40 混凝土,混凝土抗压强度设计值 $f_{cd}=15.64$ MPa,弹性模量 $E_c=32\ 500$ MPa,重力密度 $\rho=2\ 600$ kg/m³。原主拱圈采用 MU50 的块石,砂浆强度为 M10,轴心抗压强度设计值 $f_{cd}=3.85$ MPa,弹性模量 $E_m=7\ 300$ MPa;腹拱圈材料为 MU30 的粗料石,同样为 M10 砂浆,轴心抗压强度设计值 $f_{cd}=2.98$ MPa,弹性模量 $E_m=7\ 300$ MPa。砌体重力密度 $\rho=2\ 500$ kg/m³。

加固后的拱桥仍按圬工拱桥考虑,计算时不考虑新增混凝土加固层中钢筋的作用,这对结构设计是偏安全的。

3.3 网格划分

网格划分对计算精度和计算效率具有直接影响,文中的有限元模型单元大部分网格尺寸为 50 cm×50 cm,但在主拱圈厚度方向适当加密,以便提取的节点应力有较好的计算精度。加固前全桥共划分为 29 240 个单元,节点总数 38 360 个。该模型顺桥向为 x 方向,竖向为 y 方向,横桥向为 z 方向。

3.4 边界条件

由于该计算示例为单跨无铰拱桥,设桥台无位移,将两拱脚单元节点完全固结,边腹拱圈的拱脚单元节点则只释放纵桥向自由度,其余自由度全约束。

3.5 荷载工况

恒载主要考虑结构自重,通过设置相应材料的密度和施加重力加速度($9\ 800$ mm/s²)计算。

活载主要考虑车辆移动荷载,按照 JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》的车辆荷载施加,每个轮重按作用在桥面车轮范围内的局部均布荷载取值。由于设计圬工拱桥时要尽量减少截面的正拉应力,中小跨径拱圈正应力一般由拱顶及拱脚截面最大弯矩及相应轴力控制,因此加载位置按等截面悬链线圬工拱桥主拱圈跨中和拱脚的弯矩影响线最不利位置布载。横桥向按两车道偏载布置。

车辆移动荷载加载如图 2 所示。

3.6 加固方案

采用 3 种增大截面加固方案分别对石拱桥进行加固,相应尺寸参考实际加固工程经验取得。

方案 1:拱腹新增框架拱法,通过在主拱圈拱腹新增框架拱结构进行加固,在原拱圈下新增 5 条钢筋混凝土拱肋,边肋宽 50 cm,中肋宽 40 cm;同时在拱顶、

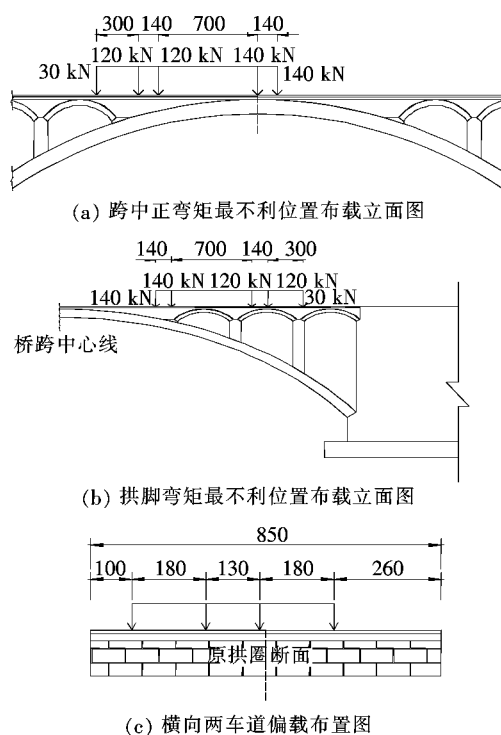


图 2 移动荷载加载图示(长度单位:cm)

拱脚及腹孔墩处新增 30 cm 宽的钢筋混凝土横梁,将各拱肋联结成整体,全桥共 9 道横梁。纵肋及横梁高度均为 50 cm,采用 C40 混凝土,通过钻孔植筋技术跟原拱圈连接。

方案 2:拱腹新增套拱法,通过在主拱圈拱腹挂钢筋网后浇筑一层 20 cm 厚的 C40 混凝土套拱,拱圈新旧层之间通过植筋和喷涂界面剂联结成整体。

方案 3:拱背新增套拱法,拆除拱顶实腹段填料,在其上及空腹段拱背布置钢筋网浇筑一层 20 cm 厚的 C40 混凝土套拱,再恢复实腹段拱上填料及桥面。

4 加固前后主拱圈拱顶截面受力比较分析

对中小跨径拱桥,其拱顶截面和拱脚截面为控制截面,通过分析 3 种加固方案对主拱圈跨中挠度、拱顶截面和拱脚截面顺桥向应力的影响,比较受力效果。

4.1 主拱圈跨中挠度比较分析

在方案 1 跨中最不利布载时将产生拱顶最大挠度,加固前及各种加固方案的拱顶挠度和工程量如表 1 所示。

从表 1 可以看出:

(1) 加固后石拱桥在两阶段受力情况下,虽然原截面自重作用下挠度有所增加,但车辆作用下挠度减

表 1 加固前后跨中挠度

方案	不同荷载产生的挠度/mm			加固混凝土 用量/m ³
	自重	车辆	自重+车辆	
加固前	-12.32	-3.32	-15.64	
方案 1	-13.70	-1.79	-15.49	71.75
方案 2	-14.21	-1.73	-15.94	98.19
方案 3	-14.03	-2.29	-16.32	88.95

小,拱顶总挠度加固前后变化不大,方案 1 稍好,方案 3 稍差,方案 2 次之。表明拱圈刚度得到提高。

(2) 从加固工程的混凝土数量来看,方案 1 最少,方案 2、3 都是板形套拱加固,但是方案 3 加固时由于腹孔墩的占位,工程量比方案 2 少。

4.2 主拱圈跨中截面应力比较分析

应力取值点位于横桥向偏载一侧边缘,各方案中,1 号点为原拱圈拱腹底面,3 号点为原拱圈拱背顶面。方案 1 的 2 号点为拱腹新增拱肋底面,如图 3(a)。方案 2 的 2 号点为拱腹新增套拱底面,如图 3(b)。方案 3 的 2 号点为拱背套拱顶面,如图 3(c)。

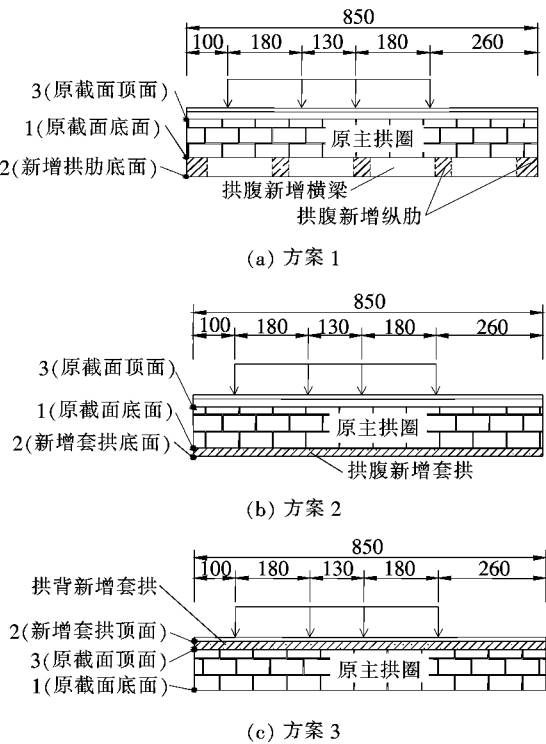


图 3 主拱圈跨中截面应力取值点布置(单位:cm)

加固前后跨中截面各取值点应力值如表 2 所示。从表 2 可以看出:

(1) 加固前后自重作用下,拱顶原拱圈顶面 3 号点及底面 1 号点的压应力变化不大,均承受正弯矩。

表 2 加固前后跨中截面应力值

方案	应力取值点	跨中截面应力/MPa		
		自重	车辆	自重+车辆
加固前	1	-0.251	0.425	0.174
	3	-1.365	-0.344	-1.709
方案 1	1	-0.197	0.023	-0.174
	2		0.967	0.967
	3	-1.508	-0.265	-1.773
方案 2	1	-0.177	0.053	-0.124
	2		0.588	0.588
方案 3	3	-1.561	-0.256	-1.817
	1	-0.184	0.340	0.156
	2		-1.083	-1.083
	3	-1.542	-0.147	-1.689

(2) 车辆作用下,加固后原拱圈顶面 3 号点的压应力及底面 1 号点的拉应力均比加固前减小。

(3) 在自重和车辆的共同作用下,加固前拱顶原拱圈底面 1 号点为拉应力,采用方案 1 或方案 2 加固后变成压应力,这对抗压强度远高于抗拉强度的拱圈材料来说,在强度和抗裂性方面都是很有利的。方案 3 加固后,该点仍维持拉应力,只是稍有减小。但新增套拱顶面 2 号点的压应力小于原拱圈顶面 3 号点的压应力,说明两阶段受力时新旧材料有应力滞后现象。

由上可知:方案 1、2 将抗拉性能相对好的钢筋混凝土加固层置于拱腹,对拱顶正弯矩受力改善来说,优于方案 3 的将加固层置于拱背。

5 加固前后主拱圈拱脚截面受力比较分析

主拱圈偏载一侧边缘拱脚截面应力取值点如图 4 所示。经试算,自重作用下,拱脚原截面底面 1 号点压应力小于顶面 3 号点压应力,说明拱脚承受正弯矩,再从文献[6]可知:拱脚正弯矩影响线面积及影响范围均大于拱脚负弯矩,因此图 4(b)中车辆荷载按拱脚正弯矩影响线最不利布载。

加固前后主拱圈拱脚截面各取值点的应力值如表 3 所示。

从表 3 可以看出:

(1) 加固前后自重作用下及自重与车辆作用下,拱脚截面全截面受压,压应力有所增加,却变化不大。

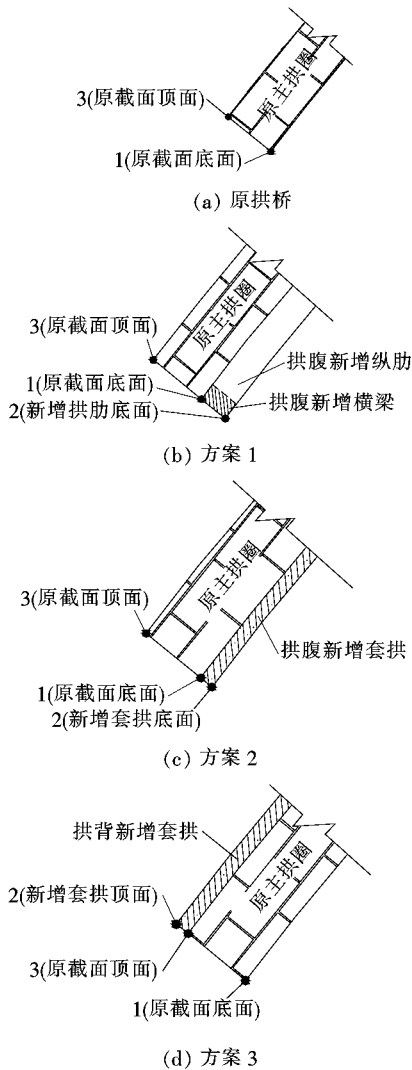


图 4 主拱圈偏载侧边缘拱脚截面应力取值点位置

表 3 加固前后拱脚截面应力值

方案	应力取值点	拱脚截面应力/MPa		
		自重	车辆	自重+车辆
加固前	1	-1.643	0.232	-1.411
	3	-2.544	-0.338	-2.882
方案 1	1	-1.720	-0.003	-1.723
	2		0.572	0.572
方案 2	3	-2.766	-0.270	-3.036
	1	-1.749	0.043	-1.706
	2		0.373	0.373
方案 3	3	-2.848	-0.260	-3.108
	1	-1.739	0.218	-1.521
	2		-0.494	-0.494
	3	-2.820	-0.079	-2.899

方案 1、2 的压应力增加比方案 3 稍多,但都远小于砌体抗压强度设计值。

(2) 单从车辆作用下的情况看,加固后新旧截面共同受力,原拱圈截面上下缘的应力绝对值比加固前减小。其中对于截面下缘,方案 1 的 1 号点应力由拉变压,方案 2 的 1 号点拉应力减小多于方案 3。说明方案 1 较好,方案 3 较差,方案 2 次之。

(3) 在自重和车辆共同作用下,从方案 3 拱脚截面均受压应力的新旧材料应力取值点 2 号点及 3 号点的应力大小可看出,有明显的应力滞后现象。

6 技术和经济性比较分析

主拱圈是拱桥的主要承重结构,增大截面法就是通过增大主拱圈的横截面积,增加拱圈受压区混凝土面积和受拉区钢筋,从而提高结构的强度和刚度。以下再结合其他方面对 3 种加固方案进行综合对比。

6.1 受力方面

从加固前后的挠度、跨中截面应力、拱脚截面应力分析可知:方案 1 较好,方案 2 次之,方案 3 较差。

6.2 工程量方面

从混凝土用量来看方案 1 最少,方案 3 最多,方案 2 次之。方案 1 及方案 2 都需要搭设支架和模板,竣工后还需拆除。方案 3 不需要支架,只需简单模板,但需拆除实腹段桥面、填料及侧墙,拱圈加固完成后还要恢复。

6.3 施工难易程度方面

方案 1 的支架及模板比方案 2 麻烦,但浇筑混凝土时方案 1 比方案 2 方便。方案 3 浇筑混凝土最方便。方案 1、2 增大截面加固后需考虑拱座及桥台相应位置增大,工程量也有所增加,方案 3 无此问题。

6.4 工期及交通影响方面

方案 1 和方案 2 工期相对较长,但浇筑混凝土前不影响通车。方案 3 拆除实腹段桥面、填料及侧墙,拱圈加固完成后再恢复,工期与方案 1、2 不好比较,对交通影响最大。

7 结论

以上比较虽然是在一定加固尺寸下进行的,改变加固层尺寸会使有些计算结果发生变化,此外,还有其他因素影响,如桥下空间高度、是否有水、水深如何、是否通航、桥面是否需要拆除重做、中断交通时间等,都

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.05.035

施工中断多年后箱梁腹板裂缝对结构的影响分析

李建文¹, 唐庚², 唐咸远^{3*}(1.中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 431400; 2.广西交通设计集团有限公司;
3.桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院)

摘要:为了研究施工中断并放置了多年的特殊连续刚构桥箱梁裂缝对桥梁的影响,根据复工前检测的腹板斜向裂缝情况,建立3种不同模型进行数值计算对比分析。研究表明:梁体自重作用下损伤模型和基准模型挠度无明显差异;车道荷载作用于2号跨时,损伤模型Ⅱ、Ⅲ主梁最大竖向挠度、纵桥向最大拉应力均未有明显变化,但纵桥向最大压应力、主压应力增大明显;车道荷载作用于1、3号跨时,两种损伤模型的最大竖向挠度未见有明显变化,但两种损伤模型主压应力、主拉应力增大明显;随着损伤程度的加大,自振频率呈下降趋势,但3种模型在同一阶次的自振频率及振型均无明显变化;综合对比分析可知:现有腹板裂缝对结构整体刚度未见明显影响,但裂缝处应力明显增大,若裂缝继续发展将导致桥梁整体刚度下降、承载能力降低。

关键词:连续刚构桥;箱梁;裂缝;数值模拟;应力

1 引言

连续刚构桥因墩梁固结,受力较合理,施工便利且具有较好的技术经济性,近20年来在中国发展极为快速,但在运营及施工中发现许多桥梁在箱梁腹板、底板产生裂缝。韦锋等通过对34座华南地区服役期混凝土刚构桥进行病害调查,经统计分析得到裂缝在混凝土刚构桥典型病害中占比高达67.9%,竖向、斜向、纵

向裂缝数量较为接近;邓志恒等利用有限元方法分析了预应力损失对箱梁腹板斜裂缝的影响,指出应充分考虑竖向预应力损失对箱梁腹板应力的影响;项贻强等对悬臂施工预应力混凝土箱梁合龙过程中底板崩裂进行分析,认为在径向力作用下孔肋的斜裂缝和撕裂裂缝是导致箱梁破坏的主因;王卫锋等对施工过程中箱梁腹板斜裂缝成因进行分析,认为不张拉竖向预应力筋而继续悬臂挂篮施工是其主因;刘芳平等采用有限元方法分析了悬臂施工过程中箱梁腹板斜裂缝成

会对工程量及施工难易程度有影响,但总的来说,方案1(拱腹新增框架拱加固)在受力、工程量、施工难易等综合指标上偏优,而且可方便灵活地调整纵肋尺寸及间距,容易控制拱圈受力和加固工程量。建议圬工拱桥增大截面加固时,优先考虑拱腹新增框架拱加固。

参考文献:

- [1] 吴毅翔.圬工拱桥主拱圈病害机理及加固方法[J].交通科技,2012(2).
- [2] 祝小龙,赵春花.加固减载法在石拱桥加固处治中的应用

[J].中外公路,2010(3).

- [3] 吴跃梓,章劲松.增大截面法加固石拱桥的技术应用[J].合肥学院学报(自然科学版),2012(3).
- [4] JTGD61-2005 公路圬工桥涵设计规范[S].
- [5] JTGD60-2004 公路桥涵设计通用规范[S].
- [6] 顾懋清,石绍甫.公路桥涵设计手册—拱桥[M].上册.北京:人民交通出版社,1994.
- [7] 王新敏.ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [8] 黄春亮,骆俊杰,李蓉.填芯加固法在双曲拱桥加固中的应用[J].中外公路,2018(1).

收稿日期:2018-12-12

基金项目:广西交通科技项目(编号:2012-13)

作者简介:李建文,男,教授级高工,E-mail:499130543@qq.com

*通信作者:唐咸远,男,副教授,E-mail:thy1188@126.com