

钢筋混凝土拱桥主拱圈加固方式及效果研究

徐略勤^{1,2}, 潘锐华¹, 周水兴¹, 岳克锋¹, 沈正璇¹

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074)

摘要 目的 寻求钢筋混凝土拱桥主拱圈最佳加固方式, 以改善加固效果, 给同类危旧拱桥加固提供参考。方法 基于某实际加固桥例提出3种不同卸载方式的加固改造方案, 采用 Midas civil 软件建立有限元模型, 分析不同加固方式的影响规律; 对原拱圈初始应力水平、施工阶段内力、成桥状态下应力、内力及挠度进行分析; 利用加固层最大应力比、荷载置换率和挠度变化率对加固效果进行评价。结果 方案三的加固层最大应力比分别比方案一、二大 45.12% 与 52.74%, 荷载置换效果最显著, 最大值达 3.82, 挠度变化率最大。结论 选择拱上建筑拆除得越多的方式进行加固, 加固效果越好; 对钢筋混凝土拱桥进行加固时, 应基于加固方式制定加固施工方案, 同时需考虑施工工期与加固成本。

关键词 钢筋混凝土拱桥; 增大截面法; 加固方式; 加固效果; 加固指标; 卸载

中图分类号 TU375.5; U445

文献标志码 A

引用格式: 徐略勤, 潘锐华, 周水兴, 等. 钢筋混凝土拱桥主拱圈加固方式及效果研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 250-258. (XU Lueqin, PAN Ruihua, ZHOU Shuixing, et al. Study on strengthening method and its effects on main arch ring in reinforced concrete arch bridge[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2): 250-258.)

Study on Strengthening Method and its Effects on Main Arch Ring in Reinforced Concrete Arch Bridge

XU Lueqin^{1,2}, PAN Ruihua¹, ZHOU Shuixing¹, YUE Kefeng¹, SHEN Zhengxuan¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China, 400074; 2. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China, 400074)

Abstract: In order to find the best strengthening method for the main arch ring of reinforced concrete arch bridge to improve the strengthening effect, and to provide a reference for the strengthening of similar dilapidated arch bridges. Based on an actual strengthening example, the construction scheme corresponding to three strengthening methods is proposed, the finite element

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978113)

作者简介: 徐略勤(1983—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事桥梁结构分析等方面研究。

model was established by Midas civil, the influence of different strengthening methods is analyzed theoretically, and the initial stress level, internal force in the construction stage, stress in the bridge state, internal force and deflection of the original arch ring were analyzed. The maximum stress ratio, load displacement rate and deflection change rate of the strengthening layer were used to evaluate the strengthening effect. The results show: The maximum stress ratio of the scheme 3 is 45.12% and 52.74% larger than those of schemes 1 and 2 respectively. The load replacement rate of scheme 3 is the largest among the three schemes with the largest value being 3.82. Also, the deflection change rate of scheme 3 is the largest. Choose the way to strength the arch building with more spandrel structures, the better the strengthening effect. When the reinforced concrete arch bridge is strengthening, the construction strengthening scheme should be formulated based on the strengthening mode; At the same time, the construction plan should consider the construction period and strengthening cost.

Key words: reinforced concrete arch bridge; section enlargement method; strengthening method; strengthening effects; strengthening index; offloading

钢筋混凝土因取材方便、材料抗压能力强等优势,在20世纪六七十年代曾被大量用于修建拱桥。我国经济高速发展,对交通提出更高的要求,既有拱桥设计的承载能力已经不能满足现在的需求,裂缝、渗水等病害问题也日益突出^[1]。拆除重建不仅耗时费力、成本高,也影响交通运输,对危旧拱桥进行快速加固改造,无疑是经济性好且符合可持续发展理念的有效方法^[2]。现存拱桥加固的方法主要有增大截面法、粘贴材料加固法和改变结构体系加固法等^[3]。其中增大截面法因施工流程清晰、施工技术成熟而成为工程中最为常见的加固方法^[4]。乔文靖等^[5]指出原拱圈属于二次受力结构,新增加固层的应变滞后于原拱圈。刘小燕等^[6]对新旧混凝土连接界面的应力进行了分析,建立了新旧界面的混凝土收缩徐变模型。陈书生等^[7]针对原拱圈和加固层形成的组合截面推导了组合材料的受压本构关系。陈磊等^[8]探讨了4种受力状态下加固结构组合截面的极限状态和应变分布规律。F. A. Kariou 等^[9]研究了织物增强砂浆加固的有效性,对比分析了多种加固方式对强度和截面变形能力的影响。P. Zampieri 等^[10]通过试验研究发现用于拱桥加固的材料类型可能会对拱圈的延性性能产生影响。可见,拱桥

加固过程中的加固方式对组合截面的受力影响是显著的。危旧拱桥在加固之前已运营多年,大多处于平衡受力状态,加固过程中组合截面将不可避免地受到加固方式的影响,而国内外对此还鲜有研究。

统上,笔者提出了3种基于不同卸载方式的增大截面法加固方案,比较了3种方案下加固前原拱圈初始应力水平大小、加固过程中拱圈内力变化和加固后全桥内力、变形的变化规律;同时,提出了用加固层最大应力比、挠度变化率来评定加固效果,并利用荷载置换率来比较不同加固方式下的荷载转换比率;最后得到采用增大截面法时,合理加固方式对拱桥整体加固效果的一般影响规律,可为同类危旧拱桥加固改造提供技术参考。

1 分析模型构建

研究对象为某钢筋混凝土拱桥,始建于1973年,主孔净跨径为100m的等截面悬链线箱型拱,矢跨比为1/6,拱轴系数 $m=3.5$ 。全截面共分为6个拱箱,每个拱箱高1.6m。边孔净跨为55m的等截面悬链线双曲拱,矢跨比为1/5,拱轴系数 $m=3.5$,主拱圈由6肋5波组成。

采用增大截面法加固,即在拱腹及拱背(除实腹段)采用200mm厚的钢筋混凝土层

对主拱圈进行加固,对垫梁进行扩大加固,最后将桥面板更换为钢格子梁,以减轻自重。钢筋混凝土拱桥加固后拱圈会出现“二次受力”现象,受力会重新分布。受力变化分两个阶段。第一阶段,在加固之前,拱上建筑不同,拱圈内的初始应力不同;第二阶段,加固完成之后,由原拱圈和加固层组成的组合截面共同承受新增的恒载与活载。由此,结合工程实际,设计3种典型的加固方式,方案一:未拆除拱上建筑,直接进行加固;方案二:拆除部分拱上建筑后进行加固;方案三:拆除全部拱上建筑后进行加固。

采用Midas civil软件建立有限元分析模型。主拱圈、腹拱圈、立柱、横墙、主梁、桥墩均采用梁单元模拟,腹拱拱上填料采用梁单元并释放梁端约束进行模拟。运用Midas civil软件中的“施工阶段联合截面”功能模拟在加固过程中和相应施工荷载作用下拱圈内力的变化。以净跨径 L 为100 m的主孔为研究对象进行分析,在分析模型中把加固过程划分成21个施工阶段。图1为3种加固方案与有限元分析模型。

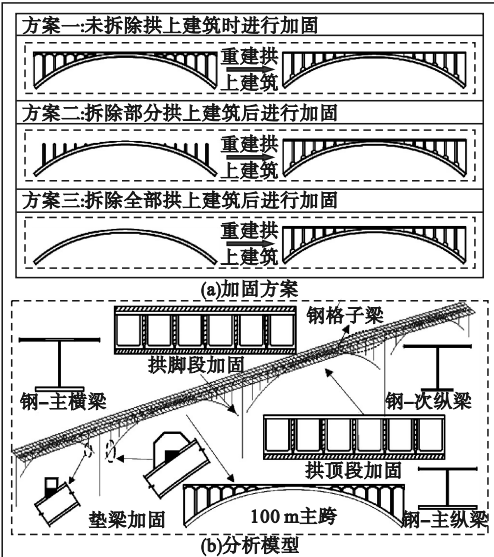


图1 加固方案与分析模型

Fig.1 Strengthening schemes and analytical model

2 加固方式对比

2.1 加固方式的理论分析

图2为加固前后截面内力和应力变化。加固后,原拱圈与加固层形成组合截面,在新增外荷载作用下,两部分共同发生变形,且符合平截面假定。截面内力分配如图2(a)所示。此时组合截面内力为 M_{li} 、 N_{li} ($i=1,2,3$,分别对应3种加固方案)。通过材料特性换算和变形协调条件可分别计算原拱圈和加固层截面所分配的内力为 M_{li}^0 、 N_{li}^0 和 M_{li}^1 、 N_{li}^1 。其中, $E_2=E_1$, $A_2=A_s \times E_s/E_1$, $I_2=I_s \times E_s/E_1$; A 、 I 分别为换算后组合截面的面积和惯性矩; A_1 、 I_1 分别为原拱圈截面的面积和惯性矩; A_2 、 I_2 分别为加固层截面换算过的面积和惯性矩。 A_s 、 I_s 、 E_s 分别为加固层面积、惯性矩和弹性模量。

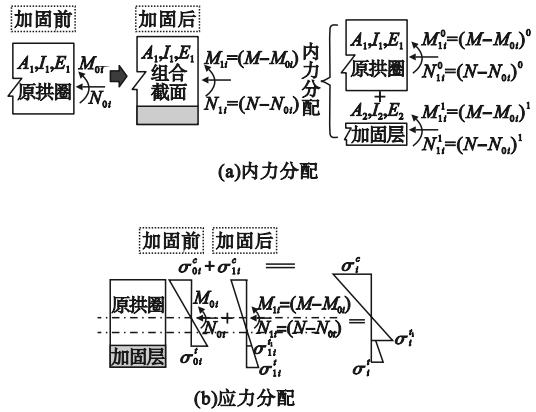


图2 组合截面内力与应力分配示意图
Fig.2 Internal force and stress distribution diagram of composite section

在3种方案中,拱上建筑部分拆除得越多,加固前原拱圈内力 M_{0i} 、 N_{0i} 就越小。由于3个加固方案最终的成桥状态一致,所以拱结构承受的总内力 M 、 N 相同,则加固后组合截面内力 M_{li} 、 N_{li} 就越大。“二阶段”应力叠加计算如图2(b)所示,其中: M_{0i} 、 N_{0i} 为加固前原拱圈承受的弯矩与轴力; M_{li} 、 N_{li} 为加固后组合截面承受的弯矩与轴力; M_{li}^0 、 N_{li}^0 和 M_{li}^1 、 N_{li}^1 分别为原拱圈与加固层所分配到的

弯矩与轴力; σ_{oi}^c 、 σ_{li}^c 分别为其对应弯矩与轴力作用下的压应力; σ_{oi}^t 、 σ_{li}^t 分别为其对应弯矩与轴力作用下的拉应力; σ_i^c 为加固后组合截面上缘最大压应力; σ_i^t 为加固后组合截面下缘最大拉应力。

根据平截面假定,在内力 M_{li} 、 N_{li} 作用下,原拱圈和新增加固层的截面曲率与组合截面曲率相等,即:

$$K = \frac{(M - M_{oi})}{E_1 I} = \frac{(M - M_{oi})^0}{E_1 I_1} = \frac{(M - M_{oi})^1}{E_1 I_2}. \quad (1)$$

因此,组合截面承担的总弯矩 M_{li} 与原拱圈和加固层弯矩之间的关系:

$$\begin{cases} (M - M_{oi})^0 = \frac{I_1}{I} (M - M_{oi}); \\ (M - M_{oi})^1 = \frac{I_2}{I} (M - M_{oi}). \end{cases} \quad (2)$$

由于组合截面符合平截面假定,因此新旧截面中性轴处的应变分别为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{(N - N_{oi})}{E_1 A} + \frac{(M - M_{oi})}{E_1 I} y_1; \\ \varepsilon_2 = \frac{(N - N_{oi})}{E_2 A} - \frac{(M - M_{oi})}{E_2 I} y_2. \end{cases} \quad (3)$$

由此得到原拱圈与加固层之间的轴力分配关系为

$$\begin{cases} (N - N_{oi})^0 = A_1 \left[\frac{(N - N_{oi})}{A} + \frac{(M - M_{oi})}{I} y_1 \right]; \\ (N - N_{oi})^1 = A_2 \left[\frac{(N - N_{oi})}{A} + \frac{(M - M_{oi})}{I} y_2 \right]. \end{cases} \quad (4)$$

原拱圈总内力为加固前内力与拱圈作为组合截面的一部分所分配到的内力之和:

$$\begin{cases} M_{\text{总}} = M_{oi} + \frac{I_1}{I} (M - M_{oi}); \\ N_{\text{总}} = N_{oi} + A_1 \left[\frac{(N - N_{oi})}{A} + \frac{(M - M_{oi})}{I} y_1 \right]. \end{cases} \quad (5)$$

式中: y_1 为组合截面中性轴与原拱圈截面中性轴之间距离; y_2 为组合截面中性轴与加固

层截面中性轴之间距离^[12]。

新增加固层所分配到的内力与总内力比值 φ_M^1 、 φ_N^1 分别为

$$\begin{cases} \varphi_M^1 = \frac{I_2 (M - M_{oi})}{IM}; \\ \varphi_N^1 = \frac{A_2 \left[\frac{(N - N_{oi})}{A} + \frac{(M - M_{oi})}{I} y_2 \right]}{N}. \end{cases} \quad (6)$$

原拱圈最终承受的内力与总内力比值 φ_M^0 、 φ_N^0 分别为

$$\begin{cases} \varphi_M^0 = \frac{M_{oi} + \frac{I_1}{I} (M - M_{oi})}{M}; \\ \varphi_N^0 = \frac{N_{oi} + A_1 \left[\frac{(N - N_{oi})}{A} + \frac{(M - M_{oi})}{I} y_1 \right]}{N}. \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,方案三的拱上建筑比其他两种方案拆除得多,在拱圈加固时的初始应力最小,因此新增加固层承担的内力占比最大,能充分发挥新增加固层的材料强度,加固效果最好。

2.2 拱圈初始应力对比

图3为各方案的原拱圈加固前后沿跨径方向截面上缘与截面下缘应力值对比结果。截面上、下缘应力分别为图示横截面上点1和点4处应力值。3种方案加固结果表明,拱上建筑拆除得越多,无论是原拱圈截面上缘,还是下缘,应力越小,即加固施工时原拱圈的初始应力水平越低。加固后,在加固层重力作用下,原拱圈截面上缘与下缘应力均相应增大,且原拱圈截面上缘应力在拱顶附近增幅较大。加固前与加固后,方案一和方案二原拱圈截面上缘应力大小和分布在拱脚到 $L/4$ 区段内较为接近,而在 $L/4$ 到拱顶区段内相差较大。方案一加固前与加固后应力最大差值高达 2.94 MPa,增加了 15%,其截面下缘应力大小和分布则恰恰相反;方案三原拱圈截面上、下缘应力值均为三种方案中最小,方案二原拱圈截面上缘和下缘应力大

小与分布均包络在另外两种方案之中。此外,由于拱上建筑的存在,方案一与方案二在加固时原拱圈沿跨径方向截面上、下缘应力

大小和分布在横墙位置处发生突变,而方案三应力大小和分布曲线更为平滑。

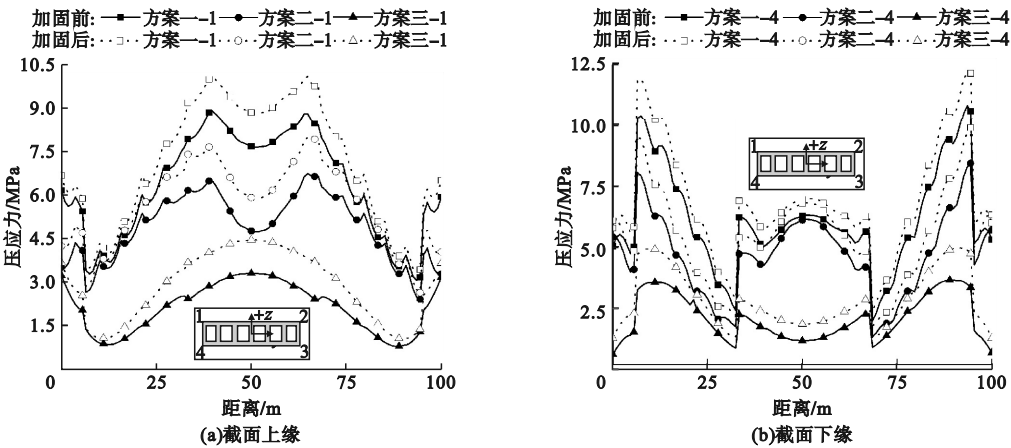


图3 加固前后原拱圈沿跨径方向截面上缘与下缘应力值比较

Fig. 3 Comparison of stress values between the upper and lower edges of the original arch ring along the span direction before and after strengthening

2.3 施工过程内力对比

图4为3种方案的拱脚、四分点、拱顶处截面的轴力值与弯矩值^[13]。图4中, N_j 、 $N_{1/4}$ 、 N_d 和 M_j 、 $M_{1/4}$ 、 M_d 分别表示拱脚、四分点、拱顶处的轴力和弯矩,如“ N_j-2 ”表示方案二拱脚轴力。由图4(a)可知,3种方案均呈现拱脚轴力最大、拱顶轴力最小的分布规律。在前14个施工阶段中,方案三在拱脚、四分点、拱顶处的轴力最小;在后7个施工阶

段中,3种方案的轴力基本相同。其中,在第6个施工阶段,方案三的轴力较方案一小37.31%。由图4(b)可知,方案一和方案二在大部分施工阶段中拱脚处均为负弯矩,四分点处为正弯矩,拱顶处既有正弯矩也有负弯矩,而方案三在部分施工阶段中拱脚处出现正弯矩。在拱脚与四分点处,方案一的弯矩值大于方案二,在拱顶处则恰恰相反。方案三在四分点处弯矩值为三者最小。

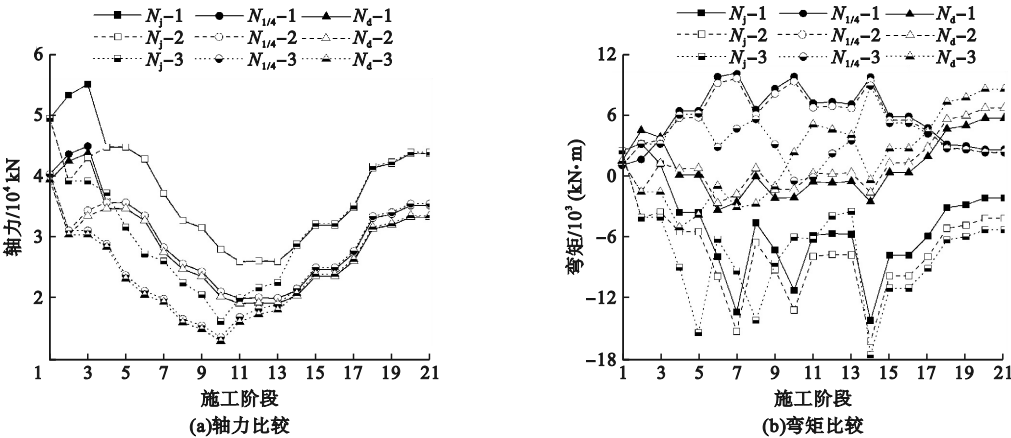


图4 各施工阶段的内力变化

Fig. 4 The change of internal force in each construction stage

表1为21个施工阶段中的内力最大值与最小值。方案三的轴力最大值与最小值均

为3种方案中最小,最大值分别比方案一和方案二小32.3%和32.4%;方案三的正弯矩值也为3种方案中最小,分别比方案一与方案二小12.17%和7.37%,而负弯矩值则为3

表1 各个施工阶段内力最大与最小值比较

加固方案	轴力/kN		弯矩/(kN·m)	
	最大值	最小值	最大值	最小值
方案一	-19 013	-55 034	10 167	-14 131
方案二	-19 064	-49 419	9 640	-16 163
方案三	-12 880	-49 419	8 930	-17 524

2.4 成桥状态对比

加固完成后,分别对3种方案的主拱圈、拱腹加固层应力进行对比分析,结果如图5所示。由图5(a)可知,方案一和方案二的原拱圈截面上缘应力较为接近,且拱顶处的压应力最大,为13.1 MPa。方案三原拱圈截面上缘应力在 $L/8 \sim 3L/8$ 内与另外两种方案相差较大,方案三比方案一和方案二最大值分别低25.21%和23.48%。原拱圈截面下缘应力的最大值出现在 $L/16$ 附近,此时原拱

种方案中最大。因此,通过跟踪各个施工阶段过程的内力变化,可以发现方案二与方案三在施工过程中的受力情况比方案一好。

圈截面下缘最大应力在 $L/16 \sim L/8$ 内;拱顶实腹段相差较大,方案三比方案一和方案二最大值分别低31.50%和34.94%。由图5(b)可知,方案一的拱腹加固层截面上缘应力均为拉应力,方案二和方案三的拱腹加固层截面上缘既有拉应力,也有压应力;方案三拱腹加固层截面上缘应力在拱顶实腹段处有显著突变。在3种方案的拱脚与拱顶附近,无论是截面上缘,还是截面下缘,均为拉应力,且方案一的应力值最大,方案三最小。

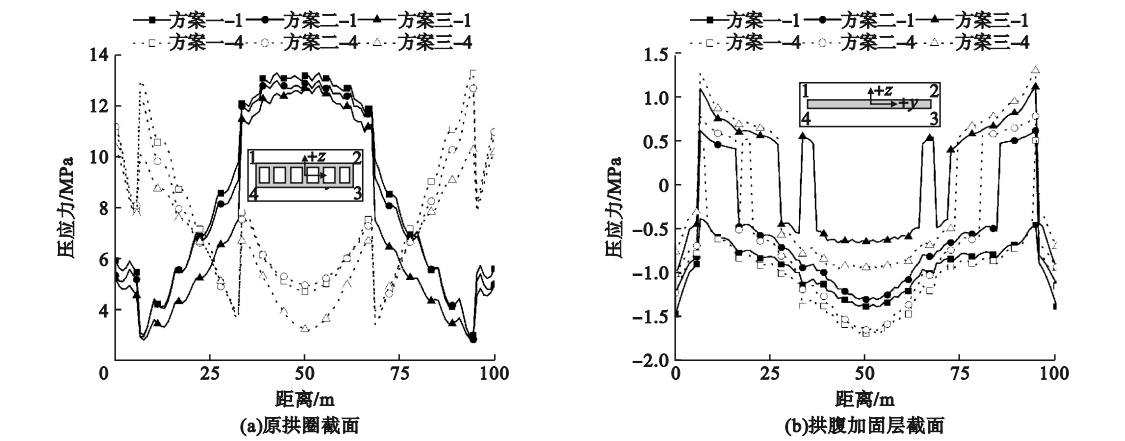


图5 成桥状态下原拱圈与拱腹加固层沿跨径方向截面上缘与下缘最大应力值比较

Fig. 5 Comparison of the maximum stress values of the upper and lower edges of the original arch ring and the soffit strengthening layer along the span direction in completion state

成桥状态下3种方案的轴力、弯矩、挠度如图6所示。由图6(a)可知,3种方案的轴力值相差不大,方案一最大,方案二次之,方案三最小,且各截面轴力均为压力。在拱背

实腹段未加固与加固段的交界处,拱圈的轴力有明显的突变现象。由图6(b)可知,在拱顶实腹段,3种方案的弯矩值依次增大,且均为正弯矩;在拱背实腹段未加固与加固段的

交界处,拱圈的弯矩亦有明显的突变现象;在拱脚附近,3种方案的弯矩均为负值。由图6(c)可知,3种方案在拱顶处的挠度最大,均达80 mm以上,方案一的拱顶挠度最大,高

达90.09 mm;拱脚的挠度最小,均为3 mm左右。总体而言,在加固之前拱上横墙拆除越多,成桥状态下的主拱挠度也相应越小。

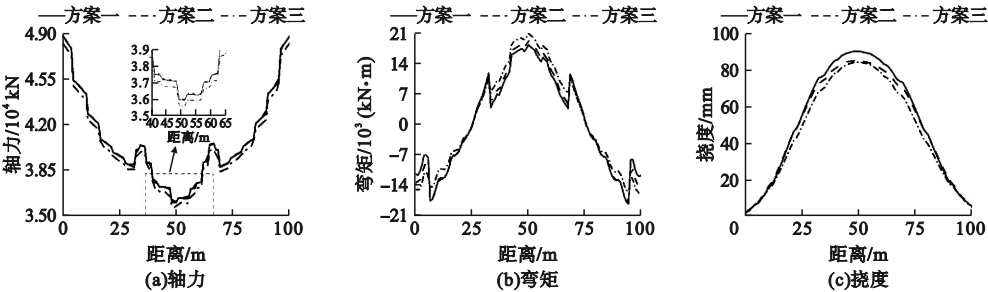


图6 成桥状态下轴力、弯矩和挠度比较

Fig. 6 Comparison of axial forces, bending moments, and deflections in completion state

3 加固效果对比

3.1 加固层最大应力比

为了表征3种方案加固层分担的应力占比情况,结合“二阶段”受力原理,提出了在不同初始应力状态下加固层的加固效率 α :

$$\alpha = \left| \frac{\sigma_n}{\sigma_0} \right| \times 100\% . \tag{8}$$

式中: α 为加固层最大应力比; σ_n 为成桥状态下拱腹加固层在活载作用下各截面最大应力值,MPa; σ_0 为成桥状态下原拱圈各截面最大应力值,MPa。

3种方案的加固层应力对比如图7所示。

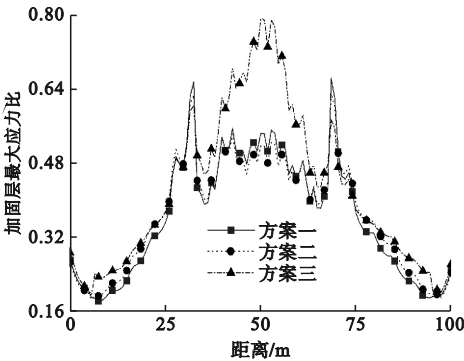


图7 三种方案的加固层最大应力比对比

Fig. 7 Comparison of the maximum stress ratio of the strengthening layer of the three schemes
在拱顶实腹段,方案三的拱腹加固层最

大应力比值最大,为78.96%,充分利用了新增加固层的材料强度。在大多数截面处,方案三的加固层最大应力比都大于方案一和方案二,且最大差值在拱顶处,分别比方案一和方案二大45.12%和52.74%。方案一与方案二的加固层最大应力比沿跨径方向相差不大,整体上,拱顶附近的加固层最大应力比均大于拱脚附近,且所有加固层最大应力比都高于18%。

3.2 荷载置换率

加固之后,原拱圈将承担新增加固层的重量(恒载),新增加固层按分配比例承担车辆荷载和人群荷载(活载)。为了表征加固后原拱圈置换恒载与活载的效率,定义荷载置换率^[14],即加固前后活载作用下原拱圈截面应力差值与新增加固层自重作用下原拱圈截面应力的比值:

$$\alpha_T = \frac{\Delta\sigma_L}{\sigma_{DS}} . \tag{9}$$

式中: α_T 为荷载置换率; $\Delta\sigma_L$ 为加固前后活载作用下原拱圈截面应力差值,MPa; σ_{DS} 为新增加固层自重作用下原拱圈截面应力,MPa。

图8为3种方案的荷载置换率对比。由图8可知,方案三在L/8处截面下缘附近处的荷载置换效果最大,达3.82,且方案三截

面下缘荷载置换率最大值比上缘荷载置换率大 69.5%,可见,原始拱圈截面下缘比上缘的荷载置换效果更好;在 $L/4$ —拱顶— $L/4$ 内,原始拱圈截面下缘荷载置换率大于上缘,且相差较大。方案一与方案二在截面上缘处的荷载置换率较为接近。无论是上缘还是下缘,方案三更有利于改善承载力本就不足的原拱圈的受力状况。

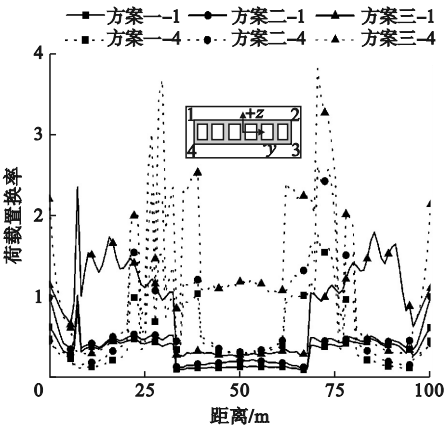


图8 三种方案的荷载置换率对比

Fig.8 Comparison of load displacement rates of the three schemes

3.3 挠度变化率

为了能够充分反映拱桥采用增大截面法加固后截面性质、全桥刚度以及在成桥状态下挠度情况,采用挠度变化率 β_T 来进行度量^[15]:

$$\beta_T = \frac{\delta_2 - \delta_0}{\delta_0} = \frac{\delta_2}{\delta_0} - 1. \tag{10}$$

式中: β_T 为加固后结构的挠度变化率; δ_0 为加固前结构的挠度值,mm; δ_2 为加固后结构在全部荷载作用下的挠度值,mm。

表2给出了3种方案的拱圈挠度变化率。由表2可见,拱脚处的挠度变化率为正值,说明加固之后拱脚的挠度相应增加;而在 $L/8$ 处至拱顶区域内的控制截面上挠度变化率均为负值,说明加固之后主拱挠度有所减小。在拱顶附近的控制截面处,方案一的挠度变化率最小,仅为 5.47%,方案二次之,方案三最大,且其最大绝对值出现在 $L/8$ 截面处,达 -19.27%。由此可知,在加固前拱上建筑拆除得越多,成桥状态下主拱的挠度变化率也越大,与加固前拱圈挠度相比减幅越大,对原拱圈的加固效果就更加显著。

表2 三种方案的主拱圈挠度

Table 2 Deflection of the main arch ring of the three schemes

位置	方案一			方案二			方案三		
	加固前挠度/mm	加固后挠度/mm	变化率/%	加固前挠度/mm	加固后挠度/mm	变化率/%	加固前挠度/mm	加固后挠度/mm	变化率/%
拱脚	-2.84	-3.12	9.86	-2.84	-3.13	10.26	-2.84	-2.97	4.82
$L/8$	-24.53	-21.05	-14.17	-24.53	-22.13	-9.78	-24.53	-19.80	-19.27
$L/4$	-58.91	-55.38	-5.99	-58.91	-54.68	-7.18	-58.91	-49.47	-16.02
$3L/8$	-86.27	-81.55	-5.47	-86.27	-78.15	-9.41	-86.27	-74.65	-13.47
拱顶	-96.10	-90.09	-6.25	-96.10	-85.11	-11.44	-96.10	-84.32	-12.26

4 结 论

- (1) 在施工过程中,方案三的轴力和正弯矩最值均最小,比方案一的分别低 32.25% 与 12.17%。
- (2) 成桥状态下,方案三拱顶正弯矩与拱脚负弯矩均最小,拱顶附近挠度大幅减小,

- 挠度变化率最高可达 -19.27%。
- (3) 在不同加固方式下,拱腹加固层最大应力比都在拱顶附近处最大,而方案三的加固方式荷载置换率最大,高达 3.82。
- (4) 拱上建筑拆除得越多的加固方式其加固效果越好,但建议制定加固方案时应综合考虑施工工期与加固成本等因素。

参考文献

- [1] 单成林,马兴键.空腹式石拱桥主拱圈的3种增大截面法加固效果分析[J].中外公路,2019,39(5):156-160.
(SHAN Chenglin, MA Xingjian. Analysis of reinforcement effect of three kinds of enlarged cross-section methods for main arch ring of open-web stone arch bridge [J]. Journal of China and foreign highway, 2019, 39(5): 156-160.)
- [2] YANG D Y, FRANGOPOL D M, TENG J G. Probabilistic life-cycle optimization of durability-enhancing maintenance actions: application to FRP strengthening planning [J]. Engineering structures, 2019(188):340-349.
- [3] KANG J, WANG X, YANG J, et al. Strengthening double curved arch bridges by using extrados section augmentation method [J]. Construction and building materials, 2013(41):165-174.
- [4] 黄建锋,朱春明,龚治国,等.增大截面法加固震损钢筋混凝土框架的抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2012,45(12):9-17.
(HUANG Jianfeng, ZHU Chunming, GONG Zhiguo, et al. Experimental study on seismic behavior of earthquake-damaged RC frame strengthened by enlarging cross-section [J]. Journal of civil engineering, 2012, 45(12): 9-17.)
- [5] 乔文靖.复合拱圈加固圯工拱桥模型试验及工程应用研究[D].西安:长安大学,2014.
(QIAO Wenjing. Study on model test and engineering application of masonry arch-bridge reinforced with composite arch circle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)
- [6] 刘小燕,余勤聪,唐春燕,等.石拱桥加固时新旧结合面应力计算研究[J].中外公路,2015,35(1):87-90.
(LIU Xiaoyan, SHE Qincong, TANG Chunyan, et al. Study on the stress calculation of the new and old joint surface when the stone arch bridge is strengthened [J]. Journal of China and foreign highway, 2015, 35(1): 87-90.)
- [7] 陈书生.复合主拱圈本构关系等效方法及模型试验研究[D].西安:长安大学,2013.
(CHEN Shusheng. Study on the constitutive relation equivalent method and model test of composite main arch circle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.)
- [8] 陈磊.考虑二次受力的复合拱圈极限承载力计算方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
(CHEN Lei. Study on calculation method of ultimate bearing capacity of composite arch ring considering secondary loading [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.)
- [9] KARIOU F A, TRIANTAFYLLOU S P, BOURNAS D A. TRM strengthening of masonry arches: An experimental investigation on the effect of strengthening layout and textile fibre material [J/OL]. Composites part B: engineering, 2019, 173: 106765 [2019-04-26]. <http://www.sciencedirect.com/doi/pdf/10.1016/j.compositesb.2019.04.026>
- [10] ZAMPIERI P, SIMONCELLO N, TETOUGUENI C D, et al. A review of methods for strengthening of masonry arches with composite materials [J]. Engineering structures, 2018(171):154-169.
- [11] 黄海东,向中富,刘剑锋,等.基于组合截面内力分配的拱桥加固内力计算方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(2):200-203.
(HUANG Haidong, XIANG Zhongfu, LIU Jianfeng, et al. Study on internal force distribution method of co-section for arch bridges strengthening [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2008, 27(2): 200-203.)
- [12] 黄灿,刘思孟,周建庭,等.基于组合截面分析的拱桥加固效果评价[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(3):373-376.
(HUANG Can, LIU Simeng, ZHOU Jianting, et al. Reinforcement effect evaluation of arch bridge based on co-section analysis method [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2012, 31(3): 373-376.)
- [13] 唐登波.增大截面法加固双曲拱桥主拱肋浇筑顺序分析[J].中外公路,2015,35(4):134-138.
(TANG Dengbo. Analysis of pouring sequence of main arch rib of double-curved arch bridge strengthened by enlarging section method [J]. Journal of China and foreign highway, 2015, 35(4): 134-138.)
- [14] 刘思孟,周建庭,李建高,等.桥梁加固增强效果评价体系:强度指标研究[C]//第十七届全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2006.
(LIU Simeng, ZHOU Jianting, LI Jiagao, et al. Study on bridge strengthening effect evaluation system-strength index [C]//Proceedings of the 17th national bridge conference. Beijing: China Communications Press, 2006.)
- [15] 陈悦,周建庭,杨建喜,等.基于动力特性的拱桥加固效果评价[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(6):852-854.
(CHEN Yue, ZHOU Jianting, YANG Jianxi, et al. Reinforcement effect evaluation for arch bridge based on dynamic characteristics [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2010, 29(6): 852-854.)
(责任编辑:王国业 英文审校:刘永军)