

# 复合主拱圈加固石拱桥极限承载力参数研究

乔文靖<sup>1,2</sup>, 宋一凡<sup>1</sup>, 陈书生<sup>1</sup>

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 西安工业大学建筑工程学院, 西安 710032

**摘要** 研究了复合主拱圈加固石拱桥时极限承载力的受力特点。以一座在加固的等截面圆弧拱桥为例, 考虑了加固结构二次受力的特点和新旧结构不同材料的力学性能, 分析了其主要结构参数, 如加固层高度、加固层宽度、加固层纵筋率和加固层箍筋率对加固后主拱圈承载力的影响。经过结构参数计算分析发现, 当加固层高度为原拱圈 0.25~0.50 倍时, 承载力增大值较明显; 当加固层宽度超过原拱圈宽度的 67%, 承载力增大缓慢; 加固层纵筋率超过 1.162%, 承载力增大值较小; 增加加固层箍筋率对加固后拱桥的承载力影响较小。分析结果为复合主拱圈加固石拱桥设计提供了结构参数选取的建议, 可为此类桥梁的设计提供有利的参考。

**关键词** 复合主拱圈; 加固; 石拱桥; 结构参数; 承载力

**中图分类号** U442.53

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.011

## Maximum Bearing Capacity Parameters of Stone Arch Bridge Reinforced by Composite Main Arch

QIAO Wenjing<sup>1,2</sup>, SONG Yifan<sup>1</sup>, CHEN Shusheng<sup>1</sup>

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China

**Abstract** In order to study maximum bearing capacity of stone arch bridge reinforced by composite main arch, a circular arch bridge on reinforced equality section is analyzed. Characteristics of secondary loading on reinforcement structure and the mechanical properties of the two different materials of new and old structures are considered. The impact of the key structural parameters (height of reinforcing layer, width of reinforcing layer, longitudinal reinforcement ratio of reinforcing layer, and stirrup ratio of reinforcing layer) on the bearing capacity of reinforced main arch ring is analyzed. The results show that when the height of reinforcing layer is 0.25~0.50 times higher than original arch ring, the increment value of bearing capacity is quite obvious; when width of reinforcing layer is in excess of 67% over width of original arch ring, bearing capacity gradually increases; while longitudinal reinforcement ratio of reinforcing layer exceeds 1.162%, the increment value of bearing capacity is quite small; The effect of increasing stirrup ratio of reinforcing layer on bearing capacity of reinforcement arch bridge is relative low. In addition, the results recommend some structural parameters for the design of stone arch bridges reinforced by composite main arch circle method of this kind.

**Keywords** composite main arch; reinforcement; stone arch bridge; structural parameter; bearing capacity

### 0 引言

石拱桥在中国的桥梁中占有很大比重, 这些桥梁建设年代较长, 本身设计荷载等级较低, 材料的老化、腐蚀及结构不同程度的破损较为严重, 使得桥梁结构承载力不足<sup>[1-3]</sup>, 若废除旧桥重建新桥不但费时、耗巨资, 而且会中断交通。而采用

旧桥加固技术, 可以节省投资, 减少工期, 不中断交通。因此, 针对石拱桥的加固技术研究显得尤为重要。对于石拱桥的加固方法很多, 钢筋混凝土复合主拱圈加固方法以其施工简便, 造价低, 对承载力提高较显著的优势, 广泛应用于石拱桥加固。因此, 复合主拱圈加固石拱桥的极限承载力是当前急

收稿日期: 2012-09-29; 修回日期: 2013-03-11

基金项目: 国家交通运输部西部交通建设科技项目(2011812318970)

作者简介: 乔文靖, 博士研究生, 研究方向为石拱桥加固, 电子邮箱: qiaowenjing76@163.com; 宋一凡(通信作者), 教授, 研究方向为桥梁加固, 电子邮箱: songyifan@126.com

需解决的问题之一。尽管不少学者对复合主拱圈加固石拱桥的极限承载力进行了实验研究和理论分析,文献[4]和文献[5]提出了加固后拱桥的计算方法,文献[6]提出了加固后拱桥加固层的计算方法,然而,有关影响极限承载力的参数研究尚不够系统和深入。目前,对于复合主拱圈加固石拱桥的加固层设计,一般只凭借经验,按照已有的加固设计进行经验选取,或者进行模型试验研究。若对加固结构进行模型试验研究则费用较高,周期较长,多数工程不具备试验条件,故而对加固结构进行有限元数值模拟分析成为研究的主要方法。本文以主跨 20m 的加固后石拱桥为研究对象,应用结构非线性有限元分析方法对加固后拱圈进行参数研究,探讨不同参数

对结构极限承载力的影响,为进一步建立复合主拱圈加固石拱桥极限承载力的实用算法打下基础<sup>[7]</sup>。

## 1 工程背景

某石拱桥是一座净跨径 20m, 矢跨比为 1/5 的等截面圆弧形空腹式石拱桥,主拱圈厚度 0.8m,宽度 8.5m,拱圈材料为 MU60 的料石,砂浆强度为 M10。桥梁普查发现该桥主拱圈拱腹开裂、下挠比较严重,应用增大截面法加固主拱圈技术,成功加固了该桥。在原主拱圈下增设 5 道钢筋混凝土拱肋,混凝土材料采用 C40,钢筋采用 HRB335。加固后桥型布置如图 1 所示。

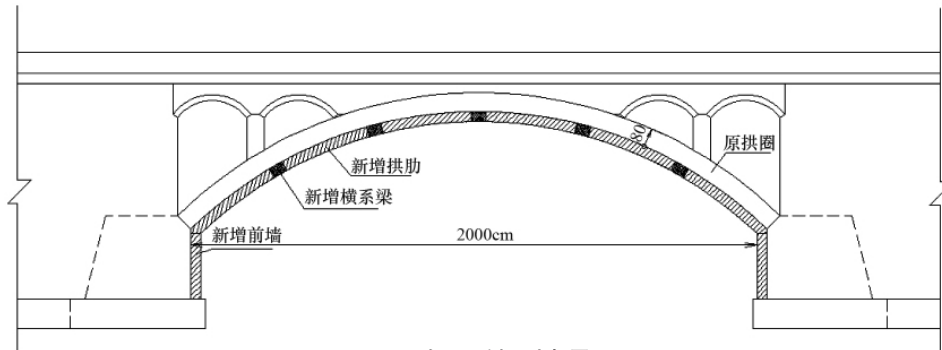


图 1 加固后桥型布置图

Fig. 1 Layout of reinforced bridge

## 2 研究方法

### 2.1 几何非线性

本文在加固结构分析时考虑了结构几何非线性的影响,单元刚度矩阵为<sup>[8]</sup>

$$[K_T] = [K_0] + [K_G] + [K_I] \quad (1)$$

其中,  $[K_T]$  为切线刚度矩阵,  $[K_0]$  为小位移的线性刚度矩阵,  $[K_G]$  为初应力矩阵或几何刚度矩阵,  $[K_I]$  为初始位移矩阵或大应变矩阵。

### 2.2 材料本构关系

由于采用整体式建模,本文在进行加固层拱板变高度和加固层拱肋变宽度的材料非线性承载力分析中,只考虑了主拱圈砌体和加固层混凝土两种材料的非线性<sup>[9]</sup>。

砌体受压时的应力-应变关系为:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_{01} \left[ 2 \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_{01}} - \left( \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_{01}} \right)^2 \right] & \varepsilon_q \leq \varepsilon_{01} \\ \sigma_1 = \sigma_{01} & \varepsilon_{01} \leq \varepsilon_q \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_1$  为砌体受压时的应力,  $\varepsilon_q$  为砌体受压时的应变,  $\sigma_{01}$  为砌体峰值压应力, 本文原拱圈采用 MU60 和 10 号砂浆砌筑, 所以砌体峰值压应力为 4.22MPa;  $\varepsilon_{01}$  为与砌体峰值应力对应的峰值压应变, 取值为 0.002;  $\varepsilon_u$  为砌体极限压应变, 取值为 0.004。

混凝土受压时的应力-应变关系为:

$$\begin{cases} \sigma_2 = \sigma_{02} \left[ 2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{02}} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{02}} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq \varepsilon_{02} \\ \sigma_2 = \sigma_{02} & \varepsilon_{02} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_2$  为混凝土受压时的应力,  $\varepsilon$  为混凝土受压时的应变,  $\sigma_{02}$  为混凝土的峰值压应力, 本文加固层采用的是 C40 号混凝土, 所以混凝土峰值压应力为 13.8MPa;  $\varepsilon_{02}$  为与混凝土峰值应力对应的峰值压应变, 取值为 0.0022;  $\varepsilon_{cu}$  为混凝土的极限压应变, 取值为 0.0035。

## 3 有限元模型建立

### 3.1 有限元模型

有限元分析软件采用大型结构通用软件 ANSYS, 选用实体单元 solid65 建立原拱圈和加固层拱板或拱肋部分, 能模拟混凝土的开裂行为, 并使用多线性弹塑性材料模型。对于加固层拱肋处的钢筋, 计算出顺桥向纵向钢筋的配筋率和箍筋的配筋率, 采用整体式配筋形式计算, 钢筋材料质量密度为  $7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 弹性模量为  $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 泊松比为 0.3, 混凝土应力应变如式(3)所示, 砌体应力应变如式(2)所示。由于加固结构属于二次受力结构, 加固前原主拱圈内存在初应力和初应变, 新拱圈的应变滞后于原主拱圈<sup>[10,11]</sup>, 软件 ANSYS 中的生死单元功能模拟原结构的初应力和初应变。具体建模方法如下: 将原拱圈设为一组结构, 加固层设为一组结构, 在第 1 次计算时杀死加固层结构, 只计算原拱圈在自重作用下应力应变, 获取初应变和初应力, 第 2 次计算时激活加固层, 给整个加固结构施加荷载, 计算加固结构在初应力和初应变作用下的承载力。考虑新旧拱圈结合面受力复杂, 在有限元设计中不考虑新旧拱圈滑移问题, 采用体黏结的方式将旧拱圈和新拱圈连接, 使之共同受力。

### 3.2 边界条件及荷载确定

采用生死单元计算时,第1次计算时,将两边拱脚全自由度约束,同时全自由度约束加固层拱肋。第2次计算时,只将两边拱脚全自由度约束。加载时,第1次只计算原拱圈在自重作用下应力应变,第2次计算时模拟拱桥恒载受力形式,从两边向中间采用逐渐减小的梯度加载方式。图2给出有限元计算时的一个整体计算模型。

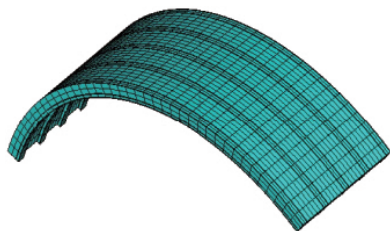


图2 加固后 ANSYS 模型  
Fig. 2 ANSYS modeling after reinforcement

## 4 结构参数分析

复合主拱圈加固石拱桥时,影响加固结构的主要结构参数包括加固层高度,加固层宽度,加固层纵筋率,加固层箍筋率,矢跨比等,先以拱顶和拱脚截面为例,分析各参数对拱顶截面极限承载力的影响。

### 4.1 加固层高度影响分析

在该参数分析中,假设加固层宽度不变,全拱板加固,通过改变加固层高度,分析不同加固层高度对拱顶和拱脚截面承载力的影响。表1列出拱顶截面加固层高度变化对承载力的影响。

表1 加固层高度变化时拱顶和拱脚承载力

Table 1 Bearing capacities of arch crown and arch foot changing with the variable depth of reinforced layer

拱板高度/ cm	拱脚轴 力/kN	拱顶轴 力/kN	拱脚弯矩/ (kN·m)	拱顶弯矩/ (kN·m)
20	-27900	-22600	-1320	1450
30	-35400	-28800	-1520	1910
40	-42800	-34800	-1610	2440
50	-44600	-36300	-1530	2530
60	-45300	-37200	-1570	2620

从表1可以看出,(1)随着加固层高度的增大,轴力值逐渐增大,各截面轴力值均为负值。当加固层高度在20~40cm之间,各截面轴力值增大较为明显,当加固层高度为40cm时,拱脚轴力值为-42800kN,拱顶轴力值为-34800kN,较前分别增加7400和6000kN,增幅达21%。当加固层高度超过40cm时,各截面轴力值增加变缓。(2)随着加固层高度的增大,弯矩值逐渐增大,拱顶截面弯矩值为正值,拱脚截面弯矩值为负值。加固层高度在20~40cm,各截面弯矩值增大较为明显。当加固层高度为40cm时,拱脚弯矩值为-1610kN·m,拱顶弯矩值为2440kN·m,较前分别增加90和530kN·m,增幅分别为6%和28%。当加固层高度超过40cm时,弯矩值变

化不明显。

采用增大加固层高度加固石拱桥时,随着加固层高度的增大,承载力先增大较为多,之后增大少,当加固层高度在20~40cm,即主拱圈0.25~0.5倍,增大幅度较大,之后增大幅度较小。

### 4.2 加固层宽度影响分析

在该参数分析中,取加固层高度40cm,用5条拱肋加固原石拱桥,改变加固层宽度,对拱顶截面承载力进行分析。表2列出拱顶截面加固层宽度变化对承载力的影响。

表2 加固层宽度变化时拱顶和拱脚承载力

Table 2 Bearing capacities of arch crown and arch foot changing with the variable width of reinforced layer

拱肋宽度/ cm	拱脚轴 力/kN	拱顶轴 力/kN	拱脚弯矩/ (kN·m)	拱顶弯矩/ (kN·m)
40	-33200	-26900	-707.877	2240
60	-39100	-31700	-809.244	2640
80	-48100	-39000	-1140	3140
100	-57200	-46500	-1590	3580
120	-57800	-47100	-1650	3680

从表2可以看出,(1)随着加固层宽度的增大,轴力值逐渐增大,各个截面轴力值均为负值。当加固层每条拱肋宽度为100cm时,拱脚轴力值为-57200kN,拱顶轴力值为-46500kN,较前分别增加9100和7500kN,增幅达19%和20%。(2)随着加固层宽度的增大,弯矩值逐渐增大,拱顶截面弯矩值为正,拱脚截面弯矩值为负。当加固层每条拱肋宽度为100cm时,拱脚弯矩值为-1590kN·m,拱顶弯矩值为3580kN·m,较前分别增加450和440kN·m,增幅分别为34%和14%。

采用增大加固层宽度加固石拱桥时,随着加固层宽度的增大,当每条拱肋增大至100cm时,即加固层宽度占主拱圈宽度的67%之后,增大幅度减小。

### 4.3 加固层纵筋配筋率影响分析

在该参数分析中,加固层高度取适合高度40cm,加固层宽度1m,纵筋直径为上排为16mm,下排为25mm,通过改变加固层纵筋根数,分析加固层纵筋率对拱顶截面承载力的影响。表3列出加固层纵筋率变化时对拱顶和拱脚承载力的影响。

表3 加固层纵筋率变化时的拱顶和拱脚承载力

Table 3 Bearing capacities of arch crown and arch foot while reinforcing layer longitudinal reinforcement ratio changing

纵筋 根数	加固层 纵筋 率/%	拱脚 轴 力/kN	拱顶 轴 力/kN	拱脚弯 矩/ (kN·m)	拱顶弯 矩/ (kN·m)
8	0.775	-48700	-44200	-1320	3080
12	1.162	-57200	-46500	-1590	3580
16	1.549	-57100	-51900	-1600	3570
20	2.324	-56400	-51200	-1590	3520

从表 3 可以看出, (1) 随着加固层纵筋率的增大, 轴力值逐渐增大, 但增大至 1.162%, 增加值较为缓慢, 各个截面轴力值均为负值。当加固层纵筋率为 1.162% 时, 拱脚轴力值为 -57200kN, 拱顶轴力值为 -46500kN, 较前分别增加 8500 和 2300kN, 增幅达 17% 和 5%。(2) 随着加固层纵筋率的增大, 弯矩值逐渐增大, 拱顶截面弯矩值为正值, 拱脚截面弯矩值为负值。当加固层纵筋率为 1.162% 时, 拱脚弯矩值为 -1590kN·m, 拱顶弯矩值为 3580kN·m, 较前分别增加 270 和 500kN·m, 增幅分别为 21% 和 16%。

随着加固层纵筋率的增大, 承载力逐渐增大, 当纵筋率 达到 1.162% 后, 承载力增大幅度较小。

#### 4.4 加固层箍筋配筋率影响分析

在该参数分析中, 加固层高度取适合高度 40cm, 加固层宽度 1m, 纵筋直径为上排为 16mm, 下排为 25mm, 设置 12 根 两排纵筋, 箍筋直径取 10mm, 改变加固层箍筋根数, 分析加固层箍筋率对拱顶截面承载力的影响。表 4 列出加固层箍筋率变化时对拱顶和拱脚承载力的影响。

表 4 加固层箍筋率变化时的拱顶和拱脚承载力

Table 4 Bearing capacities of arch crown and arch foot while reinforcing layer stirrup ratio changing

箍筋根数	加固层箍筋率/%	拱脚轴力/kN	拱顶轴力/kN	拱脚弯矩/(kN·m)	拱顶弯矩/(kN·m)
1	0.157	-49100	-39900	-1340	3100
2	0.314	-57200	-46500	-1590	3580
3	0.628	-57100	-46400	-1570	3560
4	1.256	-56600	-46000	-1570	3550

从表 4 可以看出, (1) 随着加固层箍筋率的增大, 轴力值逐渐增大, 但增大至 0.314%, 增加值较为缓慢, 轴力值有减小的趋势。各截面轴力值均为负值。当加固层纵筋率为 0.314% 时, 拱脚轴力值为 -57200kN, 拱顶轴力值为 -46500kN, 较前分别增加 8100 和 6600kN, 增幅达 16% 和 17%。(2) 随着加固层箍筋率的增大, 弯矩值变化不明显, 拱顶截面弯矩值为正值, 拱脚截面弯矩值为负值。当加固层纵筋率为 0.314% 时, 拱脚弯矩值为 -1590kN·m, 拱顶弯矩值为 3580kN·m, 较之前分别增加 250 和 480kN·m, 增幅分别为 19% 和 15%。

随着加固层箍筋率的增大, 承载力先增大后减小, 但相邻数值相差较小, 最大差值为 8100kN, 当纵筋率达到 0.314% 后, 承载力达到最大值。

## 5 结论

通过以上的计算分析, 可以看出复合主拱圈加固石拱桥的主要结构参数的改变对加固后桥梁的承载力影响主要有以下特点。

(1) 改变加固层高度对加固后拱桥的承载力影响较大, 当加固层高度为原拱圈 0.25~0.5 倍时, 各截面承载力增大值较明显。建议当荷载等级较低时, 加固层高度取原拱圈厚度

的 0.25 倍, 当荷载等级较高时, 加固层高度取原拱圈厚度的 0.5 倍。

(2) 改变加固层宽度对加固后拱桥的承载力影响较大, 建议取加固层宽度为原拱圈宽度的 0.67 倍, 之后加固层宽度虽然增大, 但承载力增大缓慢。

(3) 采用拱肋加固石拱桥时, 建议取加固层纵筋率为 1.162%, 之后加固层纵筋率虽然增大, 但承载力增大幅度较小。

(4) 加固层箍筋率对加固后拱桥的承载力影响较小, 建议箍筋率选取时满足规范规定的最小箍筋率即可。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘向华, 周安, 杨庆印. 南陵石拱桥的试验分析与加固研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 33(8): 1208-1211.  
Liu Xianghua, Zhou An, Yang Qingyin. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 33(8): 1208-1211.
- [2] Garmendia L, San-José J T, García D, et al. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(12): 4374-4385.
- [3] Dubey R S. Rebuilding of stone arch bridge by constructing a reinforced cement concrete curved box for south western railway[J]. Indian Concrete Journal, 2011, 85(6): 56-60.
- [4] 张晶, 钱永久. 套箍法加固石拱桥主拱圈的正截面承载力的理论分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(6): 76-80.  
Zhang Jing, Qian Yongjiu. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 76-80.
- [5] 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, 247.  
Huang Haidong, Xiang Zhongfu, Liu Jianfeng, et al. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2008, 27(2): 200-203, 247.
- [6] 刘庆阳, 周建庭, 王玲. 增大截面法加固石拱桥最小加固层厚度[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(1): 20-23.  
Liu Qingyang, Zhou Jianting, Wang Ling, et al. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2008, 27(1): 20-23.
- [7] Tóth A R, Orbán Z, Bagi K, et al. Discrete element analysis of a stone masonry arch [J]. Mechanics Research Communications, 2009, 36 (4): 469-480.
- [8] 夏旻, 肖汝诚, 吴剑波. 钢管混凝土拱桥极限承载力的参数研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(4): 106-109.  
Xia Min, Xiao Rucheng, Wu Jianbo. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2007, 35(4): 106-109.
- [9] 张晶, 钱永久. 围套加固石砌体小偏心受压构件正截面承载力的计算[J]. 实验力学, 2010, 25(1): 106-112.  
Zhang Jing, Qian Yongjiu. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25 (1): 106-112.
- [10] 宋柯, 王兴国, 郝泽静, 等. 现浇框架结构柱端 CFRP 加固强柱弱梁效果分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37(1): 21-28.  
Song Ke, Wang Xingguo, Hao Zejing, et al. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2012, 37(1): 21-28.
- [11] 周水兴, 刘琪, 陈湛荣. 钢管初应力对哑铃型钢管砼拱桥承载力影响分析[J]. 工程力学, 2008, 25(7): 159-178.  
Zhou Shuixing, Liu Qi, Chen Zhanrong. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 159-178.

(责任编辑 岳臣)