

# 基于吊拉协同方法的钢筋混凝土系杆拱 加固效果研究

栾娟<sup>1</sup>, 郝宪武<sup>1</sup>, 段瑞芳<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 针对湖州地区在役钢筋混凝土系杆拱桥, 在长期荷载作用下产生的病害特点, 采用吊拉协同主动加固方法以恢复原结构承载能力. 利用 Midas Civil 软件进行有限元仿真分析, 对结构加固前、后各主要构件的内力及位移状态进行了理论对比分析, 并对加固后结构主要构件的应力及位移状态进行了实桥监测, 通过理论分析与实测数据验证了钢筋混凝土系杆拱吊拉协同补强主动加固方法在工程应用中的实际效果. 理论分析与实测数据表明: 采用吊拉协同主动加固方法, 使新吊杆发挥了良好的协同补强作用, 使原混凝土刚性吊杆处于全截面受压状态, 抑制了已有裂缝的开展, 改善了原结构拱肋及系杆的受力分布状态, 保证了结构的正常使用, 提高了结构的安全性和耐久性, 达到了预期加固效果, 为日后同类型结构的加固方法提供了理论依据及实桥参考.

**关键词:** 钢筋混凝土; 系杆拱桥; 加固方法; 吊拉协同; 力学性能

**中图分类号:** U448.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2018)02-0214-06

## Reinforcement effect of reinforced concrete tied arch based on hanging and pulling cooperative method

LUAN Juan<sup>1</sup>, HAO Xianwu<sup>1</sup>, DUAN Ruifang<sup>2</sup>

(1. College of Highway Engineering, Chang'an Univ., Xi'an 710064, China;

2. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** In view of the disease characteristics of an existing reinforced concrete tied arch bridge in Huzhou, under the long-term load, the active reinforcement method is adopted to restore the bearing capacity of the original structure. In the paper, the finite element simulation analysis using Midas Civil software, the structure before and after strengthening the internal force and displacement state of main components were compared, and the main components of the structure after reinforcement stress and displacement state for bridge monitoring data were put to practical examination, through theoretical analysis and the real test of reinforced concrete tied arch cable-stayed suspension, the cooperative effect active reinforcement method in engineering application of reinforcement was also verified. Theoretical analysis and experimental data show that: as the new boom played a synergistic reinforcement effect, the original concrete rigid suspender in section compression state, has inhibited the development of crack, and the stress distribution state improves the structure of arch rib and tied. In ensuring the normal use of the structure, improving the safety and durability the structure and achieving the desired effect of reinforcement. This method may provide a theoretical basis for reference and bridge reinforcement method of the same type of structure after day.

**Key words:** bridge engineering; loess gully; pile foundation; slope; slope distance; ultimate bearing capacity

钢筋混凝土系杆拱桥作为桥梁结构的一种重要形式, 其建造与服役已有数年, 很大一部分该桥型已进入“中老年时期”, 承载能力日益下降, 严重威胁其生命安全, 需要进行维修加固<sup>[1-2]</sup>. 目前, 常规加固方法相对成熟, 如增加构件截面尺寸、增设辅助构件、改变原结构体系、更换旧构件、喷-锚混凝土、减轻原结构自重、粘贴钢板(复合纤维布)等加固方法<sup>[3-5]</sup>, 这些加固方法有各自的

优缺点和适用性<sup>[6-8]</sup>. 对于钢筋混凝土系杆拱这种独特桥型, 由于各构件的受力特点, 加固方法也各不相同<sup>[9]</sup>.

2007 年盖国晖<sup>[10]</sup>对浙江某钢筋混凝土拱桥采用局部增大主拱圈截面及部分外包碳纤维法进行了加固研究. 2008 年黄卫军<sup>[11]</sup>对湖州市塘口大桥采用了“弦杆综合加强法”加固有斜腹杆系杆拱桥, 对无斜腹杆系杆拱桥采用了“增设斜腹杆改变体系

收稿日期: 2017-11-16

修改稿日期: 2018-03-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51308055); 陕西省 2016 自然科学基金基础研究计划基金项目(2016JM5043)

第一作者: 栾娟(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事混凝土结构的研究. E-mail: luanjuan@chd.edu.cn

法”。2009年黄志林<sup>[12]</sup>采用了更换吊杆法对泽伦河桥进行了加固研究。2009年孙一新<sup>[13]</sup>对梅江大桥进行了加固研究,对拱肋及系梁采用增大截面法,对原结构吊杆采用更换吊杆法进行了加固。2010年邓少伟等<sup>[14]</sup>采用主动预应力加固理念,即增大梅江大桥系梁截面并配以预应力束的加固方法,并分析计算了其加固效果。2013年李小龙<sup>[15]</sup>对104国道长兴港大桥主桥采用更换吊杆法进行了加固研究,并通过数值模拟及实桥静、动载试验进行了加固效果分析。以上实际工程均采用常规加固方法,本文以湖州地区八里店大桥为依托工程,采用吊拉协同主动加固方法,并结合加固前、后的理论分析及实测数据评价其加固效果。

## 1 理论方法

根据系杆拱桥的构造和受力特点,该桥型的整体刚度主要来源于结构原有拱肋、系梁的距离,因两者距离很难调整,所以加固效果主要以桥梁整体刚度和动力性能的恢复为主,通过新增竖直吊杆与系杆形成一体共同受力来修复或提高原结构整体刚度和动力性能,这种加固方法称为“增设竖直吊杆协同加固法”。增加竖直吊杆的同时,吊杆张拉力的大小对结构恒载、活载在拱、系杆的内力分配均产生影响。

对桥梁进行动力特性分析时,结构自由振动的特征方程为

$$([K] - \omega^2[M])\{\varphi\} = \{0\} \quad (1)$$

式中:  $[M]$  为结构质量矩阵;  $[K]$  为结构刚度矩阵;  $\omega$  为结构的自振频率;  $\{\varphi\}$  为结构自由振动的主振型。

下承式钢筋混凝土系杆拱的刚度矩阵及质量矩阵可表示如下:

$$[K] = [K_g] + [K_z] + [K_d] \quad (2)$$

$$[M] = [M_g] + [M_z] + [M_d] \quad (3)$$

吊杆的刚度矩阵是根据图纸上吊杆的长度(名义长度)确定的,吊杆的实际刚度矩阵为

$$[K_d] + [K_{do}] + [K_{dg}] \quad (4)$$

式中:  $[K_{do}]$  为吊杆的弹性刚度矩阵;  $[K_{dg}]$  为吊杆的几何刚度矩阵。

未考虑吊杆长度变化时,单根吊杆的刚度矩阵为

$$[K_d^i] = \frac{EA}{l^i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

考虑吊杆长度发生小变化的吊杆刚度矩阵为

$$[K_d^i] = \frac{EA}{l_0^i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \epsilon \frac{EA}{l_0^i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

比较式(4)与式(6),有

$$[K_{do}] = \frac{EA}{l_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[K_{dg}^i] = \epsilon [K_{do}^i] = \epsilon \frac{EA}{l_0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

所有吊杆的弹性刚度矩阵及几何刚度矩阵为

$$[K_{do}] = \sum [K_{do}^i] \quad (9)$$

$$[K_{dg}] = \sum \epsilon [K_{dg}^i] \quad (10)$$

在吊杆长度发生改变后,钢筋混凝土系杆拱桥的质量矩阵不发生改变,而刚度矩阵由于考虑了吊杆的几何刚度矩阵而发生了变化。有

$$[K] = [K_g] + [K_z] + [K_{do}] + \sum \epsilon_i [K_{dg}^i] \quad (11)$$

此时的钢筋混凝土系杆拱桥自由振动的特征方程为

$$([K_o] + \sum \epsilon_i [K_{dg}^i] - \omega^2[M])\{\varphi\} = 0 \quad (12)$$

式中,  $[K_o] = [K_g] + [K_z] + [K_{do}]$ 。

根据一阶矩阵摄动理论,设:

$$\begin{cases} \omega^2 = \omega_0^2 + \sum \epsilon_i \omega_i^2 \\ \{\varphi\} = \{\varphi_0\} + \sum \epsilon_i \{\varphi_i\} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\omega_0$  为未考虑吊杆长度变化的结构自振频率,  $\omega_i$  为考虑吊杆长度变化引入几何刚度矩阵后每根吊杆的自振频率变化量,  $\{\varphi_0\}$  为未考虑吊杆长度变化的结构主振型,  $\{\varphi_i\}$  为考虑吊杆长度变化引入几何刚度矩阵后每根吊杆贡献的主振型变化量。

将式(13)带入自由振动方程,并合并同类项有:

$$\begin{cases} ([K_o] - \omega_0^2[M])\{\varphi_0\} = 0 \\ ([K_o] - \omega_0^2[M])\{\varphi_i\} + ([K_{dg}^i] - \omega_i^2[M])\{\varphi_0\} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中第一个方程是考虑了吊杆长度变化的特征方程,第二个方程是吊杆长度发生变化后,引入几何刚度矩阵的特征方程.

## 2 依托工程

八里店大桥位于湖州市吴兴区境内 318 国道处,于 2000 年建成通车,见图 1. 主桥采用跨径为 72.8 m 的钢筋混凝土下承式系杆拱. 桥宽 21.8 m,

矢跨比 1/6, 设计荷载为汽车—20 级, 挂车—100 级, 人群荷载为  $2.9\text{ kN/m}^2$ . 拱肋为钢筋混凝土结构, 纵梁为预应力混凝土系梁结构, 两者间的竖杆采用刚性吊杆, 为  $\varphi 32\text{ mm}$  精轧螺纹钢筋, 系梁和横梁均采用  $\varphi 15.2\text{ mm}$  的低松弛钢绞线. 主桥横梁采用高为 1.3 m 的 T 形截面, 端横梁采用刚度较大的箱型截面形式. 新增吊杆采用钢绞线整束挤压成品索, 其编号及张拉力见表 1 所示.

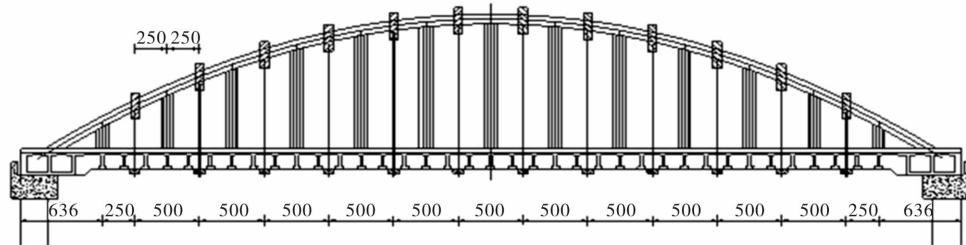


图 1 新增吊杆立面布置图/cm

Fig. 1 Newly added hanger facade layout /cm

表 1 新增吊杆编号及张拉力

Tab. 1 Number and tension of new hanger

编号(拱脚至跨中方向)		张拉力/kN
上游侧 1 #	下游侧 1 #	230
上游侧 2 #	下游侧 2 #	180
上游侧 3 #	下游侧 3 #	200
上游侧 4 #	下游侧 4 #	180
上游侧 5 #	下游侧 5 #	180
上游侧 6 #	下游侧 6 #	180
上游侧 7 #	下游侧 7 #	180
上游侧 8 #	下游侧 8 #	180
上游侧 9 #	下游侧 9 #	180
上游侧 10 #	下游侧 10 #	200
上游侧 11 #	下游侧 11 #	180
上游侧 12 #	下游侧 12 #	230

元为 961 个. 加固前、后的有限元模型见图 2 和图 3.



图 2 加固前空间有限元模型

Fig. 2 Finite element model of pre reinforcement



图 3 加固后空间有限元模型

Fig. 3 Finite element model after reinforcement

## 3 结构性能分析

### 3.1 数值模拟

采用有限元分析软件 Midas Civil 对八里店大桥进行加固前、加固后的仿真分析. 该钢筋混凝土系杆拱中, 加固前拱肋、系梁、横梁及刚性吊杆均采用梁单元模拟, 桥面系采用梁格法模拟. 加固后模型区别仅在于新增的柔性吊杆, 采用桁架单元进行模拟. 空间有限元模型中节点为 918 个, 单

### 3.2 理论分析

#### 3.2.1 结构整体刚度

在设计荷载作用下, 新增柔性吊杆对桥梁结构整体刚度的影响程度, 可通过施加不同吊杆力, 对桥面八分点处截面的位移状态及结构自振频率进行判断, 计算结果分别见图 4—图 5 所示. 从中可以看出: 通过增设柔性吊杆, 并施加不同吊杆张拉力, 结构在设计荷载作用下各控制截面的位移量与原结构比均有明显减小, 并且结构一阶自振频率有明显提高, 说明新增吊杆有效提高了结

构整体刚度。

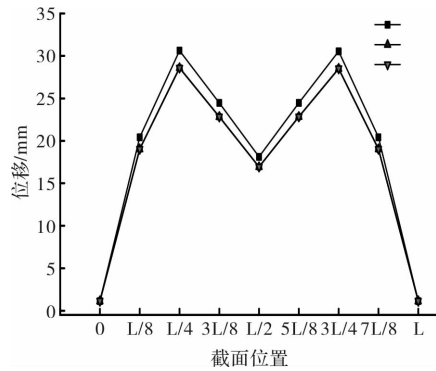


图4 各截面位移状态

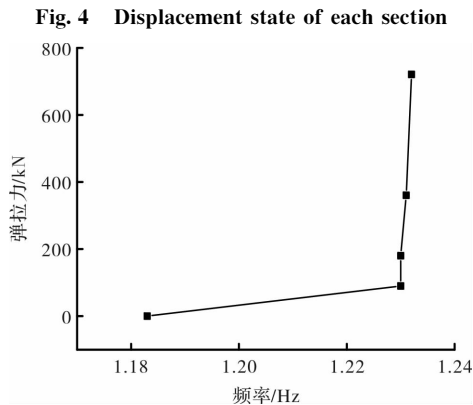


图5 结构一阶自振频率

Fig. 5 First vibration frequency

### 3.2.2 结构构件内力

荷载标准组合下,对加固前、后结构原吊杆、系梁、拱肋分别进行内力计算并对比,结果见图6—图9所示。

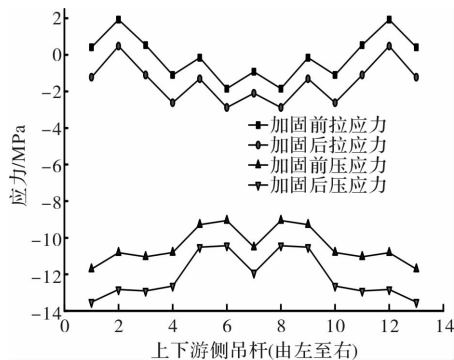


图6 原吊杆应力对比

Fig. 6 Stress comparison of the original hanger

加固前部分原吊杆均出现拉应力,且拉应力超过混凝土抗拉强度设计值,引起吊杆混凝土表面开裂。通过增设柔性吊杆,使原结构刚性吊杆基本处于受压状态,且压应力储备较大,有效提高混凝土刚性吊杆的抗拉性,提高其开裂轴力,并且有效降低系梁四分点截面的内力值及拱肋截面内力值,特别是系梁及拱顶弯矩值。

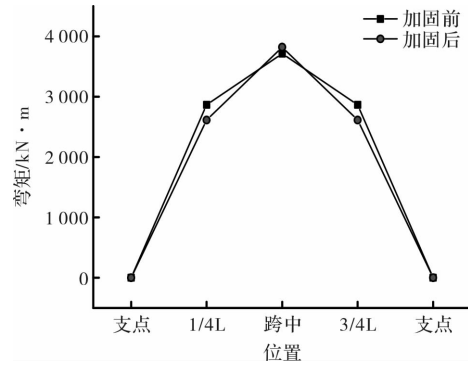


图7 系梁弯矩对比

Fig. 7 Comparison of bending moment of tie beam

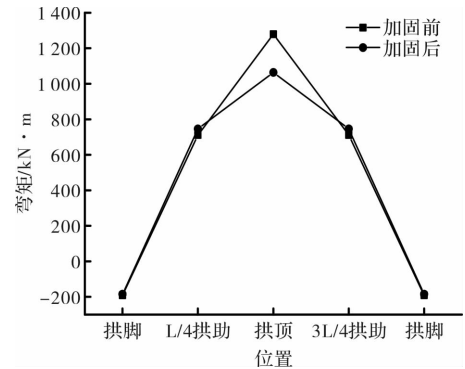


图8 拱肋弯矩对比

Fig. 8 Bending moment comparison of arch ribs

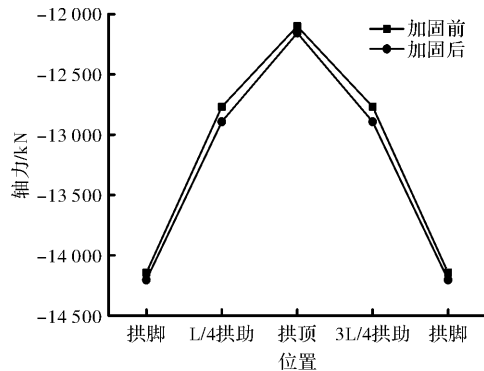


图9 拱肋轴力对比

Fig. 9 Axial force comparison of arch ribs

## 4 依托工程加固效果

对依托工程加固后的静、动力性能进行了实测数据分析,包括拱肋、原吊杆、系梁控制截面的应力监测、桥面关键截面的位移监测及结构自振频率。

在上游侧1#和12#吊杆处的拱肋布置6个表面式应力传感器,在下游侧1#和12#吊杆处、四分点及跨中拱肋共布置9个表面式应力传感器。上、下游侧1#、4#、7#、10#、13#新增吊杆处的系梁顶面布置表面式应力传感器。原单根吊杆为双吊杆形式,编号采用1-1、1-2的形式,上游

侧选择编号为 1-1、2-1、3-1、……、12-1、13-1 的吊杆, 下游侧选择编号为 1-2、2-2、3-2、……、12-2、13-2 的吊杆, 表面式应力传感器布置在吊杆上距系梁上缘 0.5 m 处. 上、下游侧的新吊杆与系梁结合处布置系梁竖向位移测点, 各应力测点、位移测点及结构一阶自振频率的理论变化值与实测变化值对比结果分别见图 10—图 14 所示.

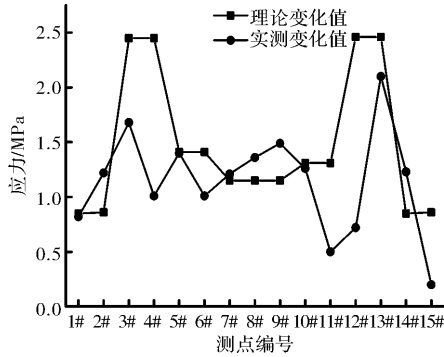


图 10 拱肋应力对比

Fig. 10 Stress comparison of arch ribs

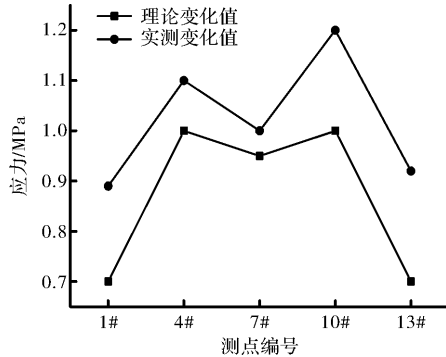


图 11 系梁应力对比

Fig. 11 Stress comparison of tie beam

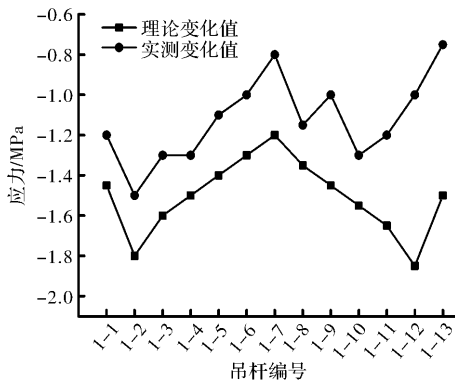


图 12 原吊杆应力对比

Fig. 12 Stress comparison of the original hanger

新增吊杆后, 其拱肋、系梁、原吊杆及桥面控制截面的应力及位移理论变化值与实测变化值的趋势基本一致. 新增吊杆使系梁产生小幅度反拱, 一定程度上提高了其抗裂性能, 同时增加了原吊杆的压应力储备, 桥面也产生小幅度的反拱,

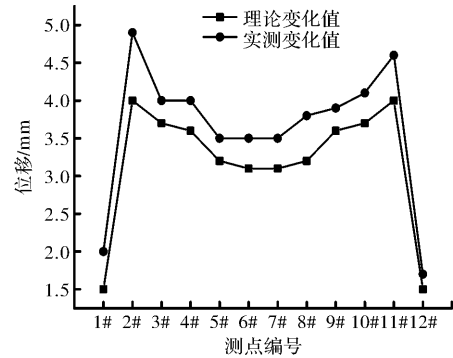


图 13 桥面位移对比

Fig. 13 Bridge deck displacement contrast

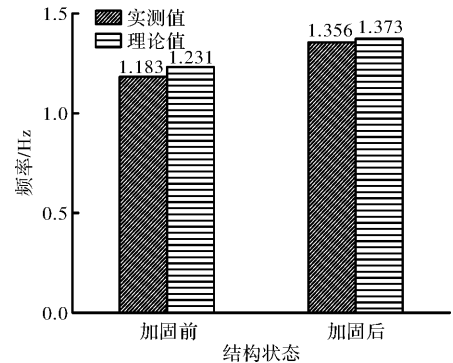


图 14 自振频率对比

Fig. 14 Self vibration frequency contrast

对原混凝土刚性吊杆上及系梁下缘裂缝的发展有抑制作用. 结构一阶自振实测频率由加固前 1.231 Hz 提高到 1.373 Hz, 说明有效提高桥梁整体刚度.

## 5 结论

通过对采用吊拉协同方法的钢筋混凝土系杆拱桥加固前后的主要受力构件进行有限元软件模拟, 并与实测数据进行对比分析, 可以得出以下主要结论:

(1) 通过吊拉协同方法增设柔性吊杆, 使原结构刚性吊杆基本处于受压状态, 且压应力储备较大, 有效提高混凝土刚性吊杆的抗拉性, 提高其开裂轴力, 并有效降低系梁四分点截面及拱肋截面内力值.

(2) 加固后的结构在设计荷载作用下各控制截面的位移量与原结构比均有明显减小, 且使桥面产生小幅度反拱. 因此, 对原混凝土刚性吊杆上及系梁下缘裂缝的发展有抑制作用, 提高了结构抗裂性.

(3) 加固后结构的一阶自振频率有明显提高, 说明该加固方法可有效增加结构整体刚度.

(4) 该加固方法有别于传统钢筋混凝土结构的

加固方法,可为日后同类型结构的加固提供理论依据及实例参考。

## 参考文献 References

- [1] 李扬. 中国公路交通可持续发展模式研究[M]. 北京:人民交通出版社,2013.  
LI Yang. Study on sustainable development model of highway traffic in China[M]. Beijing: China Communication Press, 2013.
- [2] 吕建根,王荣辉. 某钢管混凝土系杆拱桥病害检测及其加固[J]. 工业建筑, 2012(8): 158-161.  
LU Jiangen, WANG Ronghui. Disease detection and reinforcement of a concrete filled steel tube tied arch bridge[J]. Industrial Construction, 2012(8): 158-161.
- [3] Miri, M. Comparison the effect of different repair method applying on masonry arch bridges[J]. Structural Analysis of Historic Construction, 2008, 2: 909-912.
- [4] Narendra Gosain. Repair of concrete elements using externally bonded reinforcement: 30 year history [C]//advanced technology in structural engineering proceedings of structures congress 2009 [C]. USA: 2009;1975-1982.
- [5] 严建科,吕婷,贺拴海. 有初始几何缺陷混凝土系杆拱桥极限承载力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010,42(1): 54-59.  
YAN Jianke, LU Ting, HE Shuanhai. Analysis of ultimate bearing capacity of concrete tied arch bridge with initial geometric imperfections[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010,42(1): 54-59.
- [6] 田飞. 钢筋混凝土结构改造施工中加固方法优选研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.  
TIAN Fei. Study on optimization method of reinforcement construction of reinforced concrete structure[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech. , 2015.
- [7] 郭海. 粘钢加固钢筋混凝土梁的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2003.  
GUO Hai. Experimental research on the strengthening method-bonding steel plate to the reinforced concrete beam. [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech. , 2003.
- [8] 郑雷刚. 粘钢加固钢筋混凝土梁的可靠性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
- [9] ZHENG Leigang. The analysis of reliability for the reinforced concrete beams strengthened with steel plates. [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech. , 2007.
- [10] Dagher Habib J. Bending behavior of concrete-filled tubular FRP arches for bridge structures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 432-439.
- [11] 盖国晖. 钢筋混凝土拱桥检测及加固设计[J]. 工程建设与设计, 2007(4):59-61.  
GAI Guohui. Detection and reinforcement design of reinforced concrete arch bridge[J]. Construction & Design for Project, 2007(4):59-61.
- [12] 黄卫军. 系杆拱桥加固成套技术研究[D]. 上海:同济大学, 2008.  
HUANG Weijun. Research on complete set technology of tied arch bridge reinforcement[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [13] 黄志林. 预应力混凝土系杆拱桥病害分析及加固研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009.  
HUANG Zhiling. Analysis and study of reinforcement of prestressed concrete tied arch bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [14] 孙一新. 钢筋混凝土系杆拱桥检测与加固技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2009.  
SUN Yixin. Study on technology and reinforcement of reinforced concrete tied arch bridge detection [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [15] 邓少伟,滕康,林启辉,等. 某钢筋混凝土系杆拱桥加固设计理念述要[J]. 广东土木与建筑, 2010(7): 55-58.  
DENG Shaowei, TENG Kang, LIN Qihui, et al. The concept of reinforcement design of a reinforced concrete tied arch bridge[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2010(7):55-58.
- [16] 李小龙. 系杆拱桥加固方法研究[D]. 西安:长安大学, 2013.  
LI Xiaolong. Study on reinforcement method of Tied Arch Bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.

(编辑 沈波)