

# 某双曲拱桥力学性能分析、验算与加固设计

韩 静

(韶关职工大学, 广东 韶关 512031)

**摘 要:** 对某双曲拱桥进行有限元分析和各种验算, 在此基础上提出加固方案设计, 对公路双曲拱桥的加固设计有借鉴意义。

**关键词:** 双曲拱桥; 有限元; 加固设计

中图分类号: U445.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)03-0013-04

## Mechanical Analysis and Check of a Double Arch Bridge and its Reinforcement Design

Han Jing

(Shaoguan Occupational University, Shaoguan Guangdong 512031, China)

**Abstract:** A double arch bridge is analyzed in finite element method and the mechanical performances are checked in some aspects. Then the reinforcement design of the bridge is put forward which has reference to the reinforcement design of this kind bridge.

**Key words:** double arch bridge; finite element method; reinforcement design

### 1 工程概况

某单跨无铰双曲公路拱桥, 空腹式拱上建筑, 钢筋混凝土横截面, 六肋五波, 全桥等截面, 沿纵向共设置5片横隔梁。桥净跨径为20 m, 矢跨比为1/6。原设计荷载为汽-20, 挂-80。加固前该桥总体布置及横截面如图1、2所示。

### 2 加固前分析与验算

#### 2.1 加固前恒载内力计算

拱圈及拱上建筑综合容重取  $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ 。按拱上建筑的布置特点, 将立墙视为集中力作用, 将实腹段视为变集度分布力作用于拱圈, 拱圈自重亦转化为分布力作用; 同时考虑主拱圈的弹性压缩, 偏安全地不考虑拱上构造的联合作用。通过对该桥建立有限元模型, 得到控制截面的恒载内力如表1所示。

#### 2.2 加固前活载内力计算

按现要求的设计荷载汽-20, 挂-100, 对于汽-20按双车道布载, 按规范要求, 不考虑车道折减系数;

挂-100按1辆车布载。同时, 考虑主拱圈的弹性压缩, 通过建立的有限元模型并进行最不利加载, 计算所得活载内力如表2所示。

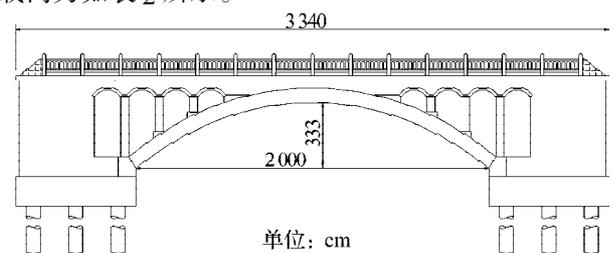


图1 加固前桥总体布置图

Fig. 1 The general view of the bridge before reinforcement

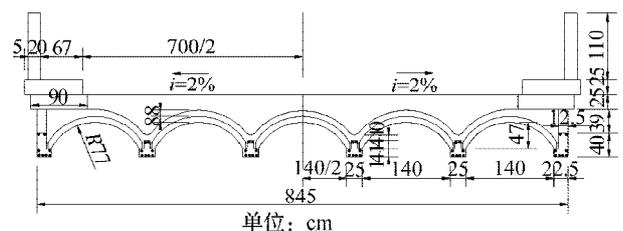


图2 加固前桥横断面图

Fig. 2 Cross-section map of the bridge before reinforcement

收稿日期: 2007-04-30

作者简介: 韩 静 (1973-), 女, 湖南邵阳人, 韶关职工大学讲师, 主要从事工程力学方面的教学与科研工作。

表 1 加固前恒载内力

Tab. 1 Internal force of dead load before reinforcement

项目	截面位置	
	拱顶	拱脚
弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	182.37	-377.34
轴力 $N/\text{kN}$	3 262.13	4 304.06

表 2 加固前活载内力

Tab. 2 Internal force of live load before reinforcement

荷载类别	内力	截面位置			
		拱顶		拱脚	
		$M_{\max}$	$M_{\min}$	$M_{\max}$	$M_{\min}$
汽-20	弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	403.94	-120.01	505.40	-564.49
	轴力 $N/\text{kN}$	774.88	512.41	824.04	647.28
挂-100	弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	375.69	-88.72	708.36	-670.38
	轴力 $N/\text{kN}$	1 128.48	319.49	1 330.65	1 269.15

2.3 温度变化及混凝土收缩产生的内力

温度变化按月平均最高气温为  $37^\circ\text{C}$ ，月平均最低

气温为  $3^\circ\text{C}$ ，浇注完成时温度为  $15^\circ\text{C}$ ；混凝土的线膨胀系数为  $1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。当考虑混凝土收缩影响时，温度变化值的折减系数为 0.7。由此计算得到温度变化及混凝土收缩产生的内力如表 3 所示。

表 3 温度变化及混凝土收缩产生的内力

Tab. 3 Internal force of temperature change and concrete shrinkage

项目	内力	截面位置	
		拱顶	拱脚
升温	弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	-418.73	866.40
	轴力 $N/\text{kN}$	385.92	298.61
降温	弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	228.40	-472.58
	轴力 $N/\text{kN}$	-210.50	-162.88
混凝土收缩	弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	214.80	-444.46
	轴力 $N/\text{kN}$	-197.97	-153.18

2.4 加固前内力组合

对各种不同的荷载内力，分别考虑不同的荷载安全系数进行内力组合，内力组合结果如表 4 所示。

表 4 内力组合表

Tab. 4 Internal force combination

荷载组合类别	项目	截面位置			
		拱顶		拱脚	
		弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	轴力 $N/\text{kN}$	弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	轴力 $N/\text{kN}$
荷载组合 I (恒 + 汽 - 20)	弯矩为最大的情况	1 085.08	4 722.23	-254.29	6 104.08
	偏心距 $e_0$	0.230		-0.042	
	弯矩为最小的情况	296.84	4 354.76	-1865.34	5 856.61
	偏心距 $e_0$	0.068		-0.319	
荷载组合 II (恒 + 汽 - 20 + 温度变化)	最大弯矩 + 升温弯矩	399.09	4 210.02	766.94	5 217.70
	偏心距 $e_0$	0.095		0.147	
	最大弯矩 + 温降弯矩	1 123.87	3 542.02	-732.72	4 700.84
	偏心距 $e_0$	0.317		-0.156	
	最小弯矩 + 升温弯矩	-231.50	3 916.04	-521.90	5 019.73
	偏心距 $e_0$	-0.059		-0.104	
荷载组合 III (恒 + 挂 - 100)	最小弯矩 + 温降弯矩	493.28	3 248.05	-2021.56	4 502.86
	偏心距 $e_0$	0.152		-0.449	
	弯矩为最大的情况	836.42	4 173.82	23.88	5 450.66
	偏心距 $e_0$	0.200		0.004	
	弯矩为最小的情况	272.51	3 267.75	-1 610.86	5 381.78
	偏心距 $e_0$	0.083		-0.299	

2.5 验算

2.5.1 拱顶截面强度验算

原主拱圈的拱顶截面下缘配 II 级 16 mm 的钢筋，主拱圈下缘的纵筋配筋率为  $\rho = 0.465\% > \rho_{\min} = 0.15\%$ 。因此，截面强度的验算应按偏心受压构件进行。把原主拱圈横截面等效为 5 片 T 形梁<sup>[1]</sup>，每片 T 梁的尺寸如图 3 所示。

考虑荷载横向分布，把荷载与截面布筋分配到每片 T 梁。

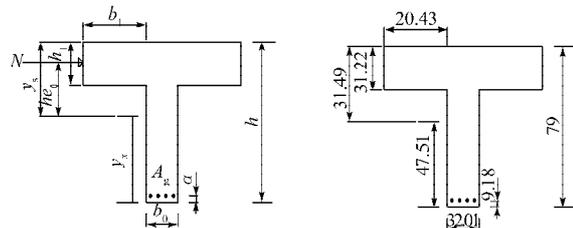


图 3 主拱圈简化为 T 梁示意图

Fig. 3 Simplified T beam of the main arch

该拱桥拱轴长度为  $S=1.075\ 54L=21.51\ \text{m}$ ，拱的偏心计算长度为  $L=0.36S=7.743\ 9\ \text{m}$ ，截面回转半径  $r_w=0.223\ 6\ \text{m}$ ，故  $L_0/r_w=34.63>28$ ，因此需要考虑偏心距增大系数。

偏心距增大系数的计算公式为：

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{\gamma_c N}{10\alpha_c E_h I_h \gamma_b} \cdot L_0^2}, \quad (1)$$

其中：参数  $\alpha_c = \frac{0.1}{0.3 + \frac{e_0}{h}} + 0.143$ ； (2)

$I_h$  为截面惯性矩； $E_h$  为混凝土的弹性模量。

由截面强度计算公式<sup>[2]</sup>可计算得到截面受压区高度  $x$ ，对应的截面承载力计算公式为：

$$[N] = \frac{\gamma_b}{\gamma_c} R_a (b' + b_0) x - \frac{\gamma_b}{\gamma_s} \sigma_g A_g, \quad (x < h_1), \quad (3)$$

$$[N] = \frac{\gamma_b}{\gamma_c} (R_a b' h_1 + R_a b_0 x) - \frac{\gamma_b}{\gamma_s} \sigma_g A_g, \quad (x > h_1). \quad (4)$$

上述各式中： $A_g$  为受拉钢筋截面积； $R_a$  为混凝土抗压设计强度； $R_g$  为钢筋的抗拉设计强度。

根据上述计算公式，在各种内力组合下，拱顶截面的强度验算结果如表 5 所示。

表 5 拱顶截面强度验算表

Tab. 5 Strength check of the vault cross section

内力组合	项 目					
	初始偏心距 $e_0/\text{cm}$	偏心距增大系数 $\eta$	计算偏心距 $\eta e_0/\text{cm}$	受压区高度 $x/\text{cm}$	截面承载力 $[N]/\text{kN}$	截面内力 $N/\text{kN}$
组合 I	23.0	1.045 2	24.04	38.89	2 329.55	944.45
组合 II	31.7	1.036 8	32.87	27.13	1 721.33	708.40
组合 III	20.0	1.038 3	20.77	42.43	2 520.65	834.76

### 2.5.2 拱脚截面强度验算

对于拱脚截面，由内力计算可知，截面上缘受拉，而原主拱圈截面上缘没有配受力钢筋，因此需按照圬工截面进行验算。截面的简化和荷载分配与拱顶截面的强度验算相同。

对于圬工截面，截面强度验算公式为：

$$[N] = \frac{AR_{wj}}{\left(\frac{Ae_0}{w} - 1\right)r_m} \quad (\text{小偏心受压截面}),$$

$$[N] = \frac{\alpha AR_{aj}}{r_m} \quad (\text{大偏心受压截面}).$$

根据上述公式，拱脚截面强度验算结果如表 6 示。

表 6 拱脚截面强度验算表

Tab. 6 Strength check of the arch foot cross section

内力组合	项 目				
	初始偏心距 $e_0/\text{cm}$	允许偏心距 $[e_0]/\text{cm}$	大小偏心的判断	截面承载力 $[N]/\text{kN}$	截面内力 $N/\text{kN}$
组合 I	-31.9	$0.6\gamma_x=28.5$	大偏心	285.80	1 171.32
组合 II	-44.9	$0.7\gamma_x=33.3$	大偏心	157.76	900.57
组合 III	-22.9	$0.7\gamma_x=33.3$	小偏心	1 945.97	1 076.36

从表 5、6 可以看出，按照该桥原始的设计情况，在目前的营运荷载汽 -20 和挂 -100 作用下，拱顶截面承载能力满足要求；拱脚截面的偏心距超过了容许值，正截面承载能力也不满足要求。因此，考虑到该桥目前的状态与原始设计状态的不同，为确保安全，建议对该桥进行加固<sup>[3, 4]</sup>。

## 3 加固方案设计

通过对该桥进行外观检查发现，该桥的拱肋和拱波大量开裂，腹拱圈顶部也出现横向贯通裂缝。因此，基于对该桥的分析及验算，确定如下加固方案<sup>[5-7]</sup>。

### 3.1 裂缝处理

为防止裂缝继续发展及外部水渗入对钢筋锈蚀，影响结构使用寿命，对结构安全造成不利影响，需对裂缝进行灌缝处理，然后再进行进一步的加固处理。

### 3.2 主拱圈加固

为改善拱肋承载力不足的状况，对拱肋采取加大截面并提高配筋率的加固方法，同时，为加强拱肋、拱波和拱板的整体性，将该桥实腹段部分的拱上填料全部铲除，采用现浇钢筋混凝土拱板置换来进行加固。

### 3.3 横隔梁改造

通过分析发现该桥的横向联系较弱，为提高该桥的整体性，增大横向刚度，对横系梁进行刚度补

强。刚度补强的措施为：采用外包混凝土将原有横系梁由 15 cm 加厚至 30 cm，在现有横系梁的下缘及拱肋对应位置沿加厚宽度均布 3 根  $\Phi 22$  的通长钢筋，同时，在横系梁上布置  $\Phi 8$  的箍筋，使之通到拱波底面，再浇注 40# 微膨胀混凝土，以使新混凝土与拱波底面紧密粘接，从而将横系梁改造为横隔板，提高横向联系的强度与刚度，满足结构的受力要求。

加固后该桥的总体布置如图 4 所示，横截面形式如图 5 所示。

#### 4 加固后分析与验算

采用上述加固方案对该桥进行加固后，用有限元方法对桥梁进行分析及内力计算，再进行截面强度验算。因为拱顶截面加固前后均为截面下缘受拉，且受力钢筋也布置在截面下缘，因此加固前后验算方法相同；对于拱脚截面，在受力上属于截面上缘受拉，加固以后属于双筋截面，应按双筋截面的强度公式进行

强度验算，验算结果如表 7、8 所示。



图 4 加固后总体布置图

Fig. 4 The general view of the bridge after reinforcement

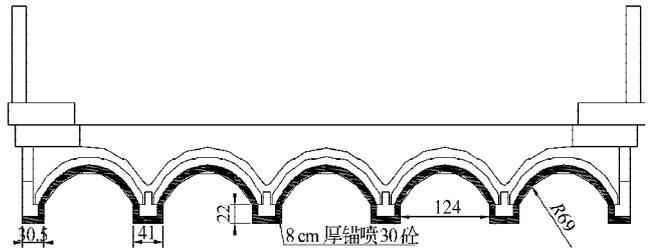


图 5 加固后拱顶横截面图

Fig. 5 Cross section of the vault after reinforcement

表 7 加固后拱顶截面强度验算表

Tab. 7 Strength check of the vault cross section after reinforcement

内力组合	项 目					
	初始偏心距 $e_0/cm$	偏心距增大系数 $\eta$	计算偏心距 $\eta e_0/cm$	受压区高度 $x/cm$	截面承载力 $[N] /kN$	截面内力 $N/kN$
组合 I	21.5	1.031	22.17	51.26	2 727.32	1 037.90
组合 II	29.3	1.025	30.03	45.80	2 289.02	783.16
组合 III	18.9	1.026	19.39	65.98	2 921.58	909.52

表 8 加固后拱脚截面强度验算表

Tab. 8 Strength check of the arch foot cross section after reinforcement

内力组合	项 目					
	初始偏心距 $e_0/cm$	偏心距增大系数 $\eta$	计算偏心距 $\eta e_0/cm$	受压区高度 $x/cm$	截面承载力 $[N] /kN$	截面内力 $N/kN$
组合 I	-29.8	1.031	-30.72	70.79	3 657.38	1 295.12
组合 II	-41.5	1.026	-42.58	63.24	2 859.68	999.61
组合 III	-28.3	1.027	-29.06	70.19	3 593.98	1 175.40

#### 5 结论

从以上加固前后拱顶截面和拱脚截面强度验算的结果对比可以看出，采用提出的加固方案，在目前的营运荷载汽-20 和挂-100 作用下，该桥的承载能力能够满足要求，说明该加固设计方案是可行的，对当前我国公路双曲拱桥的加固分析和设计有借鉴意义。

#### 参考文献：

[1] 张 慧, 贡 力. 煌水河双曲拱桥的病害诊断与力学性能

研究[J]. 城市道桥与防洪, 2006 (6): 48-54.

- [2] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [3] 李亚东. 既有桥梁评估方法研究[J]. 铁道学报, 1997, 19 (3): 109-115.
- [4] 郑玉国, 钟新谷, 袁帅华, 等. 斜拉桥成桥安全检测及评价[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16 (10): 135-140.
- [5] 禹智涛, 韩大建. 某钢筋混凝土桥梁现有状况评定及维修加固方案[J]. 广东工业大学学报, 2004, 21 (1): 83-87.
- [6] 黄冬梅. 公路旧桥的加固与改造[J]. 山西建筑, 2004, 30 (1): 110-111.
- [7] 湛润水, 胡钊芳, 帅长斌. 公路旧桥加固技术与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.