

混凝土现浇箱形拱圈与拱架联合作用研究*

刘鹏^{1,2}, 刘会², 郑凯锋¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川成都 610031; 2. 四川建筑职业技术学院, 四川德阳 618000)

摘要:混凝土箱型拱桥在无支墩拱式拱架上现浇施工时,采用分环分段的施工方法,可以利用拱圈与拱架的联合作用,减少钢拱架的用钢量,达到节省施工成本的目的。通过大型通用有限元软件 MSC. Marc 2005 的模拟及实桥测试数据的分析,发现先期浇注的混凝土拱环与拱架的联合作用明显,拱圈可承担其自重的 43%,即拱架只承担拱圈重量的 57%,利用联合作用可节约用钢量达 30%。同时提出了一个估算拱架承担拱圈重量的公式,该公式简便实用,并通过两种施工工艺的计算结果验证了该公式的准确性,可用于指导初步设计。

关键词:箱形拱桥;拱架;分环分段施工;现浇;联合作用

中图分类号:U448.33

文献标志码:A

文章编号:1006-7329(2008)02-0061-05

Research on Coaction of Concrete Cast-in-place Box Arch Ring and Arch Centering

LIU Peng^{1,2}, LIU Hui², ZHENG Kai-feng¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan College of Architecture Technology, Deyang 618000, China)

Abstract: The construction method of concreting layer by layer and segment by segment could reduce the use of steel and save construction cost, when concrete box arch ring was built cast-in-place with aid of arch centering. According to the simulation of large-scale finite element software MSC. Marc 2005 and the analysis of test data on one arch bridge, the coaction of early built arc ring and arc centering is found significantly. Arch ring can take 43% of its deadweight. In other words, arch centering takes only 57% rather than all of the weight of arch ring. Steel savings amounts to 30% by utilizing the functions. Furthermore, a formula is presented to estimate how much arch centering undertakes the arch ring weight. The formula is simple, practical and accurate, which is confirmed by computation of two different construction technologies. It can be used to guide preliminary design.

Key words: box arch bridge; arch centering; concreting layer by layer and segment by segment; cast-in-place; coaction

1 工程简介

官地永久交通大桥位于官地水电站坝址下游约 2 km 处,横跨雅砻江。该桥设计为 2×8.0 m(连续板) + 138 m(箱形拱) + 2×9.6 m(简支空心板),全桥长 192.0 m。主跨为净跨 138 m 的上承式钢筋混凝土无铰拱桥,拱圈为单箱三室箱形拱。由于缺少预制场地,

采用在钢拱架上分环分段现浇的施工方式,拱架及拱圈示意图如图 1 所示。钢拱架主要采用 Q235 和 Q345 两种钢材,上弦杆均为 Q345 钢,拱架下弦杆拱脚至 $L/4$ 范围内杆件为 Q345 钢,下弦杆跨中杆件为 Q235 钢,其余杆件为 Q235 钢。

拱圈一共分为四环,施工步骤为:第 1 步,浇注第 1、3 室底板及腹板高 150 cm 混凝土;第 2 步,浇注第

* 收稿日期:2007-09-23

基金项目:铁道部科技研究开发项目(安工指合(2006)03号)

作者简介:刘鹏(1982-),男,西南交通大学博士生,主要从事桥梁结构分析研究,(E-mail)liu_peng110@sina.com。

郑凯锋(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail)kfz2000@sina.com。

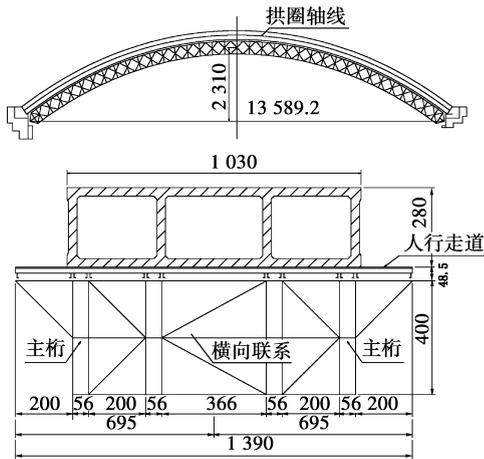


图 1 拱架及拱圈示意图

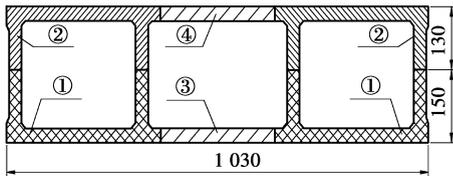


图 2 拱圈混凝土浇注分环方案图

1、3 室底板和剩余腹板 130 cm 混凝土；第 3 步，浇注第 2 室底板 30 cm 厚混凝土；第 4 步，浇注第 2 室顶板 30 cm 厚混凝土。分环如图 2 所示。拱圈第 1、2 环均划分为 10 段，采用相同的分段方式及浇注顺序。在左右拱脚、 $L/8$ 、 $3L/8$ 、 $5L/8$ 、 $7L/8$ 和拱顶设置楔口，每环最后浇注楔口进行合拢。第 3、4 环一次性浇注。分段方式及浇注顺序如图 3 所示。

2 有限元模拟分析

本文采用大型通用有限元软件 MSC. Marc 2005 进行模拟分析。MSC. Marc 是功能齐全的高级非线性求解器，有极强的结构分析能力，可以处理各种线性和非线性结构分析。且为用户提供了丰富的单元库和材料库，同时具有用户自己定义单元的用户子程序接口，这些都方便用户处理大变形几何非线性、材料非线性和包括接触在内的边界条件非线性以及组合的高度非线性分析等复杂的工程技术难题。

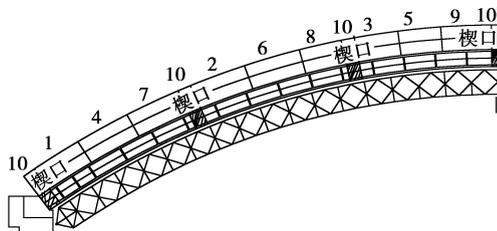


图 3 混凝土浇注分段示意

官地永久交通大桥拱圈和拱架结构离散单元图如图 4 所示。共有单元 43 416 个，节点 66 406 个，其中

三维实体单元 38 594 个、空间梁单元 475 个、空间桁架单元 4 347 个。

分步施工的拱圈受力，是否真实模拟了拱圈的施工过程，其结果差异非常明显^{[1][2]}，大跨径分步施工的拱桥模拟分析必须考虑拱圈的施工过程。同样，混凝土的强度是随时间增长的，考虑混凝土强度的增长对混凝土结构的分析也是非常重要的^[3]，尤其对采用分环分段施工的桥梁而言。按强度发展曲线计算弹性模量采用 CEB-FI P 规范。

混凝土的弹性模量随时间变化的计算公式如下：

$$E_{ci}(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} E_{ci} \quad (1)$$

$$E_{ci} = E_{co} [f_{cm}/f_{cmo}]^{1/3} \quad (2)$$

且， $E_{co} = 2.15 \times 10^4$ MPa， $f_{cmo} = 10$ MPa。

$$\beta_{cc}(t) = e^{[s(1 - \sqrt{28/t_1})]} \quad (3)$$

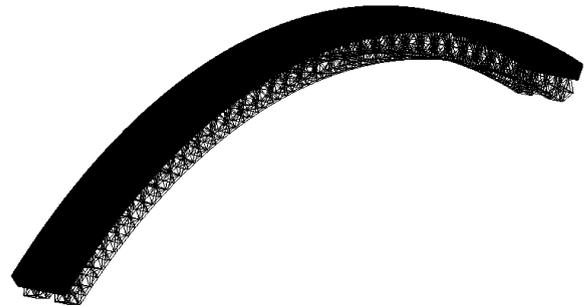


图 4 空间整体模型单元离散

$\beta_{cc}(t)$ 是强度发展速度， s 是水泥种类常数。

$$s = \begin{cases} 0.02, & 3 \text{ 类水泥} \\ 0.25, & 1、5 \text{ 类水泥} \\ 0.38, & 2 \text{ 类水泥} \end{cases} \quad t_1 = 1 \text{ d}$$

官地永久交通大桥的拱圈全部采用 C40 的混凝土，故 $f_{cm} = 40$ MPa 水泥采用的是普通硅酸盐水泥， s 取 0.25。

在模拟分析中，同时基于以下几点假设：

- 1) 施工过程中拱圈与拱架不发生相对滑移。这一点一般情况下靠摩擦力就可以实现，当不能实现时，则可以通过增设剪力铰来达到防止相对滑移目的；
- 2) 不考虑收缩徐变的影响；
- 3) 不考虑温度的影响。

表 1 一次性浇注拱圈时主要部位内力及位移增量

位置	拱脚	L/4	3L/8	拱顶
应力				
MPa				
竖腹杆	216.7	-43.3	-41.9	-28.3
斜腹杆	-288.2	38.2	-26.6	-24.0
上弦杆	-320.9	-313.3	-280.2	-317.6
下弦杆	-302.8	-231.0	-194.8	-185.9
位移/m	0	0.000	-0.213	-0.286

表 2 第 1 环混凝土浇注后主要部位应力及位移

位 置	拱脚	L/4	3L/8	拱顶	
应力 MPa	竖腹杆	48.6	-8.0	-7.3	-6.4
	斜腹杆	-77.9	10.9	-5.4	-6.1
	上弦杆	-85.9	-79.2	-82.9	-84.6
	下弦杆	-86.1	-67.1	-57.5	-54.6
位移/m	0	-0.045	-0.061	-0.07	

当官地永久交通大桥采用一次性浇注拱圈的施工方法时,钢拱架主要杆件内力和主要节点位移见表 1。Q235 钢的设计强度为 215 MPa, Q345 钢的设

计强度为 315 MPa,设计中取安全系数为 1.3。那么全部的上弦杆和拱脚到 L/4 范围内的下弦杆的应力不能超过 242 MPa,其余的下弦杆应力不能超过 165 MPa。由表 1 可以看到,上弦杆拱顶部位压应力为 317 MPa,超过允许应力 31%,拱脚部位达 320 MPa,超过允许应力 32%;下弦杆拱脚至 L/4 范围内最大应力出现在拱脚部位,为 302 MPa,超过允许应力 25%;下弦杆 L/4 至拱顶范围内,最大压应力出现在 3L/8,为 194 MPa,超过允许应力 18%。官地永久交通大桥的拱架主桁为 8 片,为了使应力降到允许应力以下,至少应该增加 30%的主桁杆件,近 3 片,多达 130 t 钢材。

表 3 第 2、3、4 环混凝土浇注后关键截面应力比较/MPa

位置		第 2 环			第 3 环			第 4 环		
		工况 1	工况 2	二者之比	工况 1	工况 2	二者之比	工况 1	工况 2	二者之比
拱脚	上弦	-19.0	-80.4	0.24	-4.0	-28.9	0.14	-3.1	-29.5	0.11
	下弦	-17.0	-80.6	0.21	-3.3	-23.0	0.14	-2.7	-23.5	0.12
L/4	上弦	-16.1	-74.1	0.22	-2.9	-21.5	0.14	-2.4	-21.9	0.11
	下弦	-14.5	-62.8	0.23	-2.6	-17.0	0.16	-2.2	-17.3	0.13
3L/8	上弦	-15.4	-77.6	0.20	-2.9	-22.8	0.13	-2.2	-23.3	0.09
	下弦	-9.0	-53.8	0.17	-1.5	-13.8	0.11	-1.2	-14.1	0.09
拱顶	上弦	-15.2	-79.2	0.19	-3.0	-24.3	0.12	-2.1	-24.8	0.08
	下弦	-6.6	-51.1	0.13	-1.2	-16.0	0.08	-1.0	-16.3	0.06

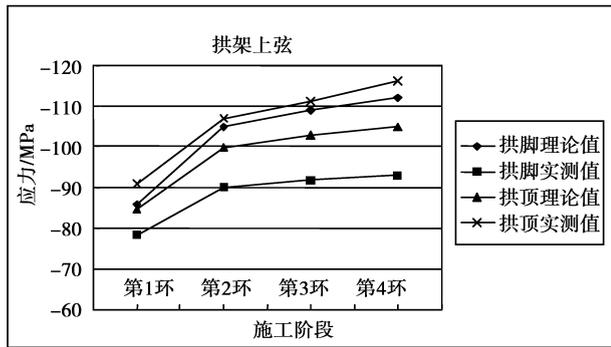
说明:工况 1 为该环浇注后拱架应力增量;工况 2 为该环全部由拱架承担时拱架应力增量。

采用分环分段施工时,第一环混凝土浇注后拱架主要杆件内力及主要节点位移见表 2,最大应力发生在拱脚下弦杆上,为-86.1 MPa。第 2、3、4 环混凝土浇注后拱架关键截面杆件实际应力增量与拱架全部承担该环混凝土时应力增量见表 3,从表中看到,第 2 环混凝土浇注后各个控制截面上,上、下弦的增量应力均不到拱架全部承担第 2 环混凝土重量时拱架产生的应力的 30%,所以可以说第 2 环重量的 70%由第 1 环混凝土承担,其余的 30%由拱架承担;第 3 环混凝土浇注后各个控制截面上,上、下弦的应力增量均不到拱架承担全部第 3 环混凝土重量时拱架产生的应力的 20%,所以可以说第 3 环重量的 80%由第 1、2 环混凝土承担,其余的 20%由拱架承担;同样,第 4 环混凝土浇注后各个控制截面上,上、下弦的应力增量均不足拱架承担全部第 4 环混凝土重量时拱架产生的应力的 15%,所以可以说第 4 环重量的 85%由前 3 环混凝土——尤其是第 1、2 环混凝土承担,其余的 15%由拱架承担。第 1、2、3、4 环混凝土分别占全桥混凝土重量的 41.1%、39.1%、9.8%和 10.0%。那么可以算出拱架

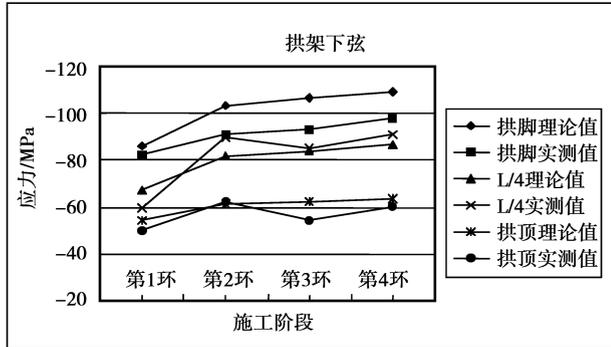
承担了拱圈混凝土重量的 56%,通过联合作用,已形成的拱环承担了混凝土重量的 44%。

3 实桥测试数据

在拱架的关键部位安装表面式传感器,在拱圈的关键部位安装埋置式传感器,得到的应力实测值与理论值的比较分别见图 5、图 6。由于数据庞大,图 5 只列举拱圈每环合龙后的值;图 6 列举的是拱圈内的传感器开始稳定发挥作用的值。在两图中,(a)列举的是第 2 环每段(共 10 段)和第 3、4 环合龙后的值,(b)列举的是第 3、4 环合龙后的值。可以看出拱架应力实测值与理论值存在一些偏差,但偏差不大。这是由表面传感器受外界环境影响比较大造成的。由于元件量程的原因,在量值较小时,拱圈应力实测值与理论值有一定偏差,当达到一定幅值后规律性即显现出来,与理论值比较接近。另外,从实测值还可以看到,拱脚部位的顶板在施工过程中出现了少量的拉应力,这在拱架现浇的施工中是经常遇到的情况,应加强监测,必要时可采取一些措施以减小拉应力。

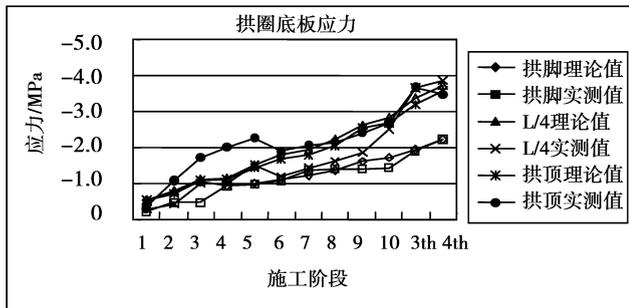


(a) 拱架上弦应力理论值与实测值

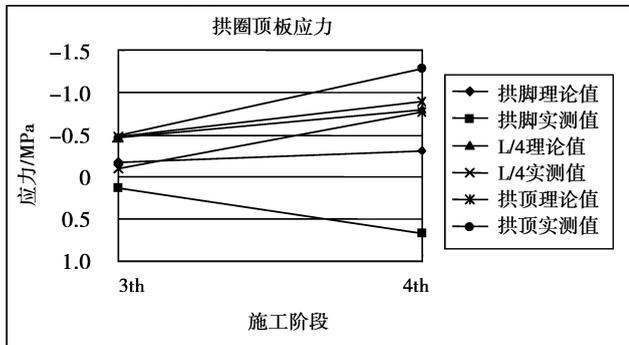


(b) 拱架下弦应力理论值与实测值

图5 主要施工阶段拱架应力理论值与实测值比较



(a) 拱圈底板应力理论值与实测值



(b) 拱圈顶板应力理论值与实测值

图6 主要施工阶段拱圈顶、底板应力理论值与实测值比较

4 估算公式

由于变形反映刚度,相对刚度又是两个联合截面分担承受荷载的重要影响因素,现提出利用变形来估算拱圈和拱架联合作用时二者承担拱圈荷载的比例。

设 δ_0 是混凝土浇筑前,拱架拱顶部位作用单位荷载时拱顶部位的变形量; δ_i (其中 $i=1,2,\dots$) 是第 i 环混凝土刚浇筑后,拱架拱顶部位作用单位荷载产生的拱顶变形增量。拱架承担的第 1 环混凝土重量的比例 α_1 可由下式计算得到:

$$\alpha_1 = \frac{1/\delta_0}{1/\delta_1} \quad (4)$$

δ_1 因为是第 1 环刚浇筑完后值,此时第 1 环混凝土尚未能承担自重,所以有 $\delta_1 = \delta_0, \alpha_1 = 1$ 。

现在考虑第 2 环混凝土浇筑后拱架承担的第 2 环混凝土重量的比例。 δ_2 是第 2 环混凝土刚浇筑后在拱架拱顶部位作用单位荷载产生的拱顶变形增量,此时第 1 环混凝土和拱架已形成联合作用,第 2 环混凝土尚未参加联合作用,那么拱架承担第 2 环混凝土重量的比例 α_2 可由下式得到:

$$\alpha_2 = \frac{1/\delta_0}{1/\delta_2} \quad (5)$$

依次类推, α_i 是前 $i-1$ 环混凝土和拱架联合作用时,拱架承担的第 i 环混凝土重量的比例。又记第 i 环混凝土的重量占拱箱重量的比例为 β_i ,那么拱架承担拱箱混凝土重量的比例:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i \quad (6)$$

其中 n 为拱圈分环总数。

表4 由估算公式计算值

i	δ_i	α_i	β_i	$\alpha_i \beta_i$
0	-1.991×10^{-4}			
1	-1.991×10^{-4}	1	0.411	0.41
2	-7.315×10^{-5}	0.367	0.391	0.15
3	-3.259×10^{-5}	0.164	0.098	0.02
4	-3.299×10^{-5}	0.166	0.100	0.02

按照上述方法,计算官地永久交通大桥所得数据见表4。表中为在模型中施加 10 kN 的力的变形值,混凝土的弹性模量均按设计值考虑。

$\gamma = \sum_{i=1}^4 \alpha_i \beta_i = 0.59$, 那么拱圈承担的比例为 $1-\gamma = 0.41$ 。该值与按施工顺序计算的拱圈承担自重的 44% 很接近,说明用此方法估算较为准确,又可以省去考虑混凝土强度发展、施工顺序影响等复杂过程。

用该法时需要注意的事项有:

- 1) 施加的荷载要适中;
- 2) 施加的荷载应分布在拱顶几个沿纵向轴线对称的节点,防止沿拱顶横向变形不一致影响准确性;
- 3) 由于是估算,混凝土的弹性模量可取设计值,而不考虑强度随时间发展的变化。

表 5 第 2、3 环砼浇注后关键截面应力比较/MPa

位置	第 2 环		第 3 环		
	工况 1	工况 2 二者之比	工况 1	工况 2 二者之比	
拱脚	上弦	-16.0-80.4	0.20	-2.9 -28.9	0.10
	下弦	-20.1-80.6	0.25	-3.8 -23.0	0.17
L/4	上弦	-14.7-74.1	0.20	-2.5 -21.5	0.12
	下弦	-15.0-62.8	0.24	-2.5 -17.0	0.15
3L/8	上弦	-14.2-77.6	0.18	-2.3 -22.8	0.10
	下弦	-7.7 -53.8	0.14	-1.2 -13.8	0.09
拱顶	上弦	-14.1-79.2	0.18	-2.2 -24.3	0.09
	下弦	-4.9 -51.1	0.10	-0.9 -16.0	0.06

5 估算公式进一步验证

上面通过对严格按施工顺序的计算结果、实桥测试数据和估算公式的比较,可以说明估算公式具有较高的准确性。下面再通过另外一种施工顺序的计算结果来进行进一步的验证。施工前有两种方案供选择,前面提到的是实际施工采用的方案,另外一种方案分为 3 环(见图 2),第 1 环施工①和③,第 2 环施工②,第 3 环施工④。按照施工顺序有限元计算结果见表 5,可以看出第 1 环全部、第 2 环约 25%和第 3 环约 20%的重量由拱架承担,而 3 环混凝土分别占全桥混凝土重量的 51.0%、39.0%和 10.0%,那么拱架承担拱圈混凝土重量的 63%,通过联合作用,已形成的拱环承担了混凝土重量的 37%。通过前面提出的估算方法计算数据见表 6, $\gamma = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \beta_i = 0.65$, 那么拱圈承担的比例为 $1-\gamma=0.35$, 这与按施工顺序计算的拱圈承受自重的 37%很接近,进一步说明估算公式具有较高的准确性。

表 6 第 2 种方案由估算公式计算值

i	δ_i	α_i	β_i	$\alpha_i \beta_i$
0	-1.991×10^{-4}			
1	-1.991×10^{-4}	1	0.510	0.51
2	-6.501×10^{-5}	0.327	0.390	0.13
3	-3.299×10^{-5}	0.166	0.100	0.02

6 结论及建议

本文结合官地永久交通大桥的施工,按照施工顺序及施工工艺进行有限元分阶段空间模拟分析,通过理论分析与实桥测试结果的相互验证,结果表明:

1)分环分段施工的钢筋混凝土拱桥,先期浇注的拱环与拱架的共同作用明显。在官地永久交通大桥中,其整体贡献度可达 43%,较石拱桥的 30%^{[1][2][4]}要高,达到了许多文献估计的 25%~40%^{[5][6][7]} 的上限。

2)在进行钢拱架设计时,考虑拱圈与拱架的联合作用可以节省大量的钢材。在充分考虑安全系数的情况下,在官地永久交通大桥上节约钢材达 30%。

3)提供的简化估算公式简便实用、准确性高,可为初步设计提供参考,当然还有进一步的验证的必要。

4)通过两种不同工艺的分析可以看出,施工工艺对拱圈与拱架的联合作用有影响,建议在确定施工时应对比备选方案进行比较。

5)建议有待进一步研究的内容包括:收缩徐变对拱圈与拱架联合受力作用的影响,拱圈与拱架联合作用随跨度变化的规律,拱圈与拱架的联合作用随拱圈、拱架宽度变化的规律。

参考文献:

[1] 胡崇武,范立础.丹河大桥拱圈与拱架共同作用研究[J].公路,2005(4):50-53.
HU Chong-wu,FAN Li-chu. Research on coaction of arch ring and arch centering of Danhe river bridge [J]. Highway,2005(4):50~53.

[2] 向中富,徐君兰,王银辉,等.拱桥拱架施工过程中的结构行为分析[J].重庆交通学院学报,2001,20(S1):17-22.
XIANG Zhong-fu, XU Jun-lan, WANG Yin-hui, et al. Structural analysis during the course of construction of arch bridge with the aid of centering [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2001, 20(Sup):17-22.

[3] GRIDER A, RAMIREZ J A, YUN Y M. Structural concrete design. Structural engineering handbook [M]. Boca Raton:CRC Press LLC,1999.

[4] 李华,牛学勤.特大石拱桥施工拱架结构的设计与计算[J].桥梁建设,1999(3):36-38.
LI Hua,NIU Xue-qin. Design and calculation of centering structure for constructing extra-large stone arch bridge [J]. Bridge Construction,1999(3):36-38.

[5] 顾安邦.桥梁工程(下册)[M].北京:人民交通出版社,2000.

[6] 范立础.桥梁工程(上册)[M].北京:人民交通出版社,1987.

[7] 顾懋清,石绍甫.公路桥涵设计手册 拱桥(上册)[M].北京:人民交通出版社,1994.

(编辑 陈 蓉)