

文章编号：1002-0268 (2004) 11-0047-05

钢管混凝土单圆管拱刚度取值 对静力计算的影响

韦建刚，陈宝春，彭桂瀚

(福州大学土木建筑工程学院，福建 福州 350002)

摘要：各国规范中对钢管混凝土构件截面刚度的定义存在着差异，钢管混凝土截面刚度的取值对钢管混凝土拱内力、变形和稳定计算均有影响。本文以 1 座实桥的实测资料为基础，对现有钢管混凝土截面刚度的不同算法进行了比较分析，得出了一些有益的结论，可供工程实践参考。

关键词：钢管混凝土；拱；刚度

中图分类号：TU399

文献标识码：A

Analysis of Rigidity of Concrete Filled Steel Tubular (Single tube) Arch

WEI Jian-gang , CHEN Bao-chun , PENG Gui-Han

(College of Civil Engineering and Architectures , Fuzhou University , Fujian Fuzhou 350002 , China)

Abstract : There are some differences in the definition of the rigidity of CFST component between the codes of different countries. These differences influence the internal force , deform , stability of CFST arch. Comparing with the results of the testing of a real bridge , the calculation for it by using the different rigidity definitions of the CFST component was carried out in this paper. Some useful conclusions were deduced and it will be of help for the design of this kind of bridge.

Key words : Concrete filled steel tube ; Arch ; Rigidity

1 概述

钢管混凝土作为组合材料，其刚度的取值对结构的变形和稳定计算有一定的影响，而且由于钢管混凝土拱桥一般为超静定结构，所以刚度取值对内力也有一定的影响。目前国内尚未颁布有关钢管混凝土拱桥的设计规范，而现有的钢管混凝土结构的设计规程或规范对钢管混凝土材料的截面刚度计算存在着差异^[1]。因此，文献[2]在进行钢管混凝土拱桥计算理论研究进展综述时指出，应研究钢管混凝土拱桥设计计算的截面刚度取值问题。本文将以一钢管混凝土（单圆管）肋拱桥——福建福安群益大桥为例，对该桥进行了静载测试和有限元计算，讨论了钢管混凝土拱肋截面刚度对钢管混凝土拱的面内内力、变形和稳

定计算的影响，为此类桥梁的设计计算提供参考。

2 实桥静载试验

群益大桥位于福建省福安市城关。桥梁上部为一孔净跨 46m、净矢跨比 1/3 的钢管混凝土中承式肋拱。主拱圈由单根 $\phi 800 \times 14\text{mm}$ 的钢管内灌 C30 混凝土组成。设计荷载：汽—20，挂—100，人群荷载 3.5kN/m^2 。大桥于 1996 年 10 月开工，1998 年 7 月建成。成桥后进行了静载测试。静载测试选取上游侧拱肋为测试对象。应变测试选取两拱脚、 $L/4$ 、 $L/2$ 及 $3L/4$ 等 5 个截面，每个截面布置了 4 个测点，各测点有 4 个应变片。拱肋挠度测试选取 $L/4$ 、 $L/2$ 及 $3L/4$ 等 3 处，每处的拱肋悬有标尺，用精密水准仪测其挠度。大桥总体布置及静载测点布置见图 1。

收稿日期：2003-09-01

基金项目：福建省重大科技项目（2003F007），福建省教育厅科技项目（JA03016）

作者简介：韦建刚（1971—），男，福建福州人，博士研究生，主要从事桥梁工程研究。

典尚设计-路桥效果图、三维动画

<http://www.dillsun.com>

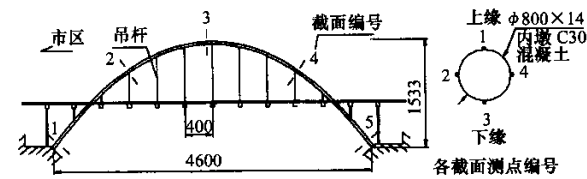


图 1 群益大桥总体布置及测点布置图/mm

静载测试有 3 个工况。工况 1、2、3 分别按拱顶弯矩最大、拱脚弯矩最大和拱脚水平力最大进行布载。加载车辆编号及重量见表 1，车辆平面布置见表 2。加载车辆工况 1 为 2 排 3 列，工况 2 为 3 排 2 列，工况 3 为 4 排 2 列。各工况车辆布置情况见图 2，测试结果见表 3。

表 1 车辆编号及重量

车辆编号	前轮重/kN	后轮重/kN	总重/kN
1	33.2	124.6	160.8
2	39.6	126.9	160.2
3	32.5	125.9	160.5
4	36.5	131.4	168.6
5	29.4	137.7	166.9
6	33.4	139.1	172.7
7	30.0	141.7	172.7
8	36.0	132.2	169.0

表 3 群益桥测试结果

测试截面	工况 1			工况 2			工况 3		
	上缘应力 /MPa	下缘应力 /MPa	挠度 /mm	上缘应力 /MPa	下缘应力 /MPa	挠度 /mm	上缘应力 /MPa	下缘应力 /MPa	挠度 /mm
1	-19.74	5.04		-23.94	9.03		-12.60	-0.21	
2	2.31	-16.17	-0.48	5.04	-17.64	-4.47	-2.10	-5.46	0.20
3	-19.53	13.44	4.15	-6.39	-2.52	0.92	-7.98	5.04	3.23
4	7.77	-11.55	-0.33	-13.02	14.49	9.10	-9.66	-10.71	1.98
5	-4.2	4.2		11.55	-28.35		-18.06	-4.20	

3 有限元计算

桥梁在车辆荷载作用下的受力采用空间梁、板单元建模，共 380 个节点，376 个梁单元和 158 个板单元。计算模型中，先计算出钢管混凝土拱肋的抗压与抗弯刚度，在各工况作用下计算出拱肋的内力、变形与应变后，根据截面钢管与混凝土的刚度分配计算出钢管与混凝土的纤维应力。

钢管混凝土拱肋截面的刚度计算方法详见各规程^[3~8]和表 4、表 5。本文为表达统一，符号意义如下： EA 为钢管混凝土的抗压刚度； EI 为钢管混凝土的抗弯刚度； E_s 、 E_c 分别为钢材和混凝土的弹性模量； I_s 和 I_c 分别为钢管截面和混凝土截面的惯性矩； A_s 和 A_c 分别为钢管截面和混凝土截面的面积。

不同规范的钢管混凝土抗压刚度与抗弯刚度的不同取值的计算结果与实测结果的比较见表 4 和表 5。

表 2 各工况车辆布置平面示意表

市区	工况 1			工况 2			工况 3		
	6	5	4	6	5	8	1		
	3	2	7	4	2	6	5		
				3	7	4	2		
						3	7		

注：表中数字为车辆编号

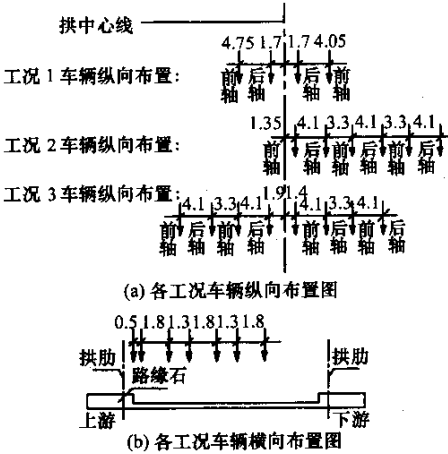


图 2 各工况车辆布置图/m

表 4 中，抗压刚度根据不同规范取值，抗弯刚度取

表 4 抗压刚度计算结果

项目	CESC ^[3] AIJ ^[8] BS5400 ^[7]	JCJ ^[4]	DL/T ^[5]	AISC ^[6]
计算公式	$E_s A_s + E_c A_c$	$E_{sc} = 0.8 \xi \rho E_s + (1 - \rho) E_c$		$E_c A_s + 0.4 E_c A_c$
计算结果 /10 ⁶ kN	21.16	18.09	18.85	12.74
工况 1				
稳定系数	12.92	12.93	12.93	12.97
$\Delta_{1/2}/\Delta'_{1/2}$	1.40	1.46	1.44	1.58
$\epsilon_{1/2上}/\epsilon'_{1/2上}$	2.67	2.67	2.67	2.72
$\epsilon_{1/2下}/\epsilon'_{1/2下}$	2.73	2.74	2.74	2.78
工况 2				
稳定系数	14.21	14.14	14.12	14.15
$\Delta_{1/4}/\Delta'_{1/4}$	1.58	1.61	1.58	1.63
$\epsilon_{L上}/\epsilon'_{L上}$	2.75	2.76	2.75	2.77
$\epsilon_{L下}/\epsilon'_{L下}$	2.00	2.01	2.00	2.01
工况 3				
稳定系数	12.97	12.86	12.86	12.90
$\Delta_{1/2}/\Delta'_{1/2}$	1.20	1.28	1.30	1.64
$\epsilon_{L上}/\epsilon'_{L上}$	1.08	1.12	1.13	1.10
$\epsilon_{L下}/\epsilon'_{L下}$	2.05	1.83	1.83	1.94

$EI = E_s I_s + E_c I_c$ 保持不变。表 5 中, 抗弯刚度根据不同规范取值, 抗压刚度取 $EA = E_s A_s + E_c A_c$ 保持不变。表 4、表 5 中 Δ 表示计算挠度, 下标表示拱肋的截面, 如 1/2 为拱顶, $L/4$ 为 $L/4$ 处, L 为拱脚; ϵ 表示计算应力, 下标的最后一个符号“上”表示截面的上缘、“下”表示下缘, 下标的前面符号也是表示截面位置; Δ' 表示实测挠度, ϵ' 表示实测应力, 下标符号意义同计算值。

表 5 抗弯刚度计算结果

项目	CESC ^[3] Alf ^[8] BS5400 ^[7]	JCJ ^[4]	DL/T ^[5]	Alf ^[8]	AISC ^[6]
刚度	计算公式 $E_s I_s + E_c I_c$	$E_{sc} = 0.8 \left[\rho E_s + (1 - \rho) E_c \right]$		$E_s A_s + 0.2 E_c I_c$	$E_s A_s + 0.8 E_c I_c$
计算结果					
/10 ⁶ kN·m ²	1.07	0.72	0.75	0.66	0.97
工况 1					
稳定系数	12.92	9.24	9.56	8.56	11.85
$\Delta_{1/2}/\Delta'_{1/2}$	1.40	1.64	1.62	1.70	1.46
$\epsilon_{1/2上}/\epsilon'_{1/2上}$	2.67	2.25	2.30	2.13	2.63
$\epsilon_{1/2下}/\epsilon'_{1/2下}$	2.73	2.28	2.32	2.21	2.50
工况 2					
稳定系数	14.21	10.07	10.42	9.31	12.94
$\Delta_{1/4}/\Delta'_{1/4}$	1.58	1.82	1.79	1.90	1.63
$\epsilon_{L上}/\epsilon'_{L上}$	2.75	2.26	2.30	2.19	2.49
$\epsilon_{L下}/\epsilon'_{L下}$	2.00	1.68	1.72	1.59	1.98
工况 3					
稳定系数	12.97	9.14	9.46	8.45	11.75
$\Delta_{1/2}/\Delta'_{1/2}$	1.20	1.30	1.26	1.32	1.22
$\epsilon_{L上}/\epsilon'_{L上}$	1.08	1.00	1.03	0.93	1.05
$\epsilon_{L下}/\epsilon'_{L下}$	2.05	1.44	1.55	1.18	1.75

4 刚度取值对计算结果影响分析

4.1 不同刚度取值的计算结果对比

不同刚度取值对计算结果的影响变化幅度值见表 6 (表中负号表示下降)。

表 6 刚度取值对计算结果的影响比较 %

工况	刚度取值	计算结果			
		拱顶弯矩	拱顶位移	拱顶上缘应力	拱顶下缘应力
1	抗压刚度 (66%)	-1.5	-12.9	-1.8	-1.9
	抗弯刚度 (62%)	24.3	-21.4	23.5	25.4
2	抗压刚度 (66%)	-0.4	-3.4	-0.5	-0.7
	抗弯刚度 (62%)	25.7	-20.3	25.8	25.6
3	抗压刚度 (66%)	0.7	-36.7	12.0	-4.6
	抗弯刚度 (62%)	0.4	-10.0	53.5	16.1

4.2 刚度取值对内力计算结果的影响

钢管混凝土拱是超静定拱, 所以刚度会对结构内力计算结果产生影响。在以下分析中, 取各工况的典型截面的典型内力作为分析对象, 工况 1 的内力为拱顶弯矩、工况 2 为拱脚弯矩、工况 3 为拱脚水平推力。从表 6 可以看出, 在保持抗弯刚度不变的前提下, 抗压刚度变化对内力计算结果的影响并不大, 在抗压刚度的数值变化 66% 的情况下, 内力最大的变化幅度仅为 -1.5%。同时抗压刚度的增大使得应力并没有相应地增大而是略有下降, 见图 3 和图 4。但这种变化也不大, 拱肋截面应力变化在工况 1、2 情况下最大幅度为 1.9%, 在工况 3 下为 4.6% ~ 12.0%。

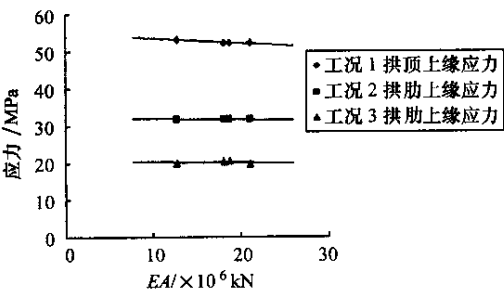


图 3 各工况拱肋上缘应力随抗压刚度变化趋势图

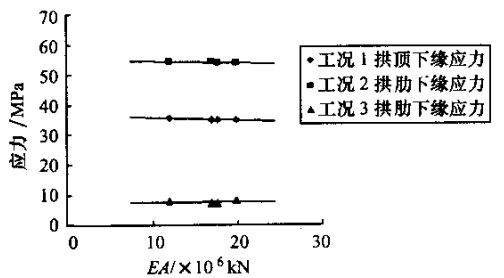


图 4 各工况拱肋下缘应力随抗压刚度变化趋势图

当抗压刚度保持不变时, 随着抗弯刚度的增大, 拱的内力也相应增大。从图 5 可以看出, 抗弯刚度对拱的内力的影响在工况 1 和工况 2 中显然要比抗压刚度的影响要大很多, 在抗弯刚度变化幅度为 62% 的情况下, 其截面内力的变化幅度达到 24.3% ~ 25.7%; 而在工况 3 中, 拱脚水平推力的变化幅度仅为 0.4%。由此可见, 在拱肋以受弯为主时, 截面抗弯刚度的变化对内力的计算有着很大的影响; 而当拱肋以受压为主时, 截面抗弯刚度的变化对内力的影响就相对较小。

从图 6 和图 7 可以看出, 随着抗弯刚度的增大, 拱肋截面上下缘应力也相应增大。从与图 3、图 4 的对比可以看出, 在抗压刚度与抗弯刚度变化幅度大致

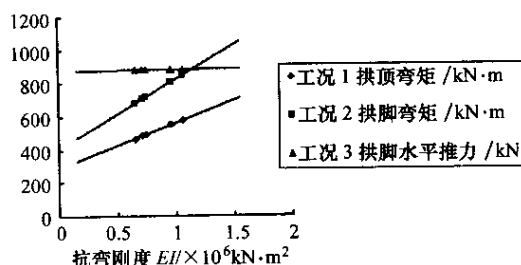


图 5 各工况模型桥截面内力随抗弯刚度变化趋势图

相当的情况下,抗弯刚度的变化对应力计算的影响幅度至少达到了 16.1%,而抗压刚度的变化对应力计算的影响最多达到 12.0%,因此抗弯刚度对拱肋截面应力计算的影响要远大于抗压刚度的影响。

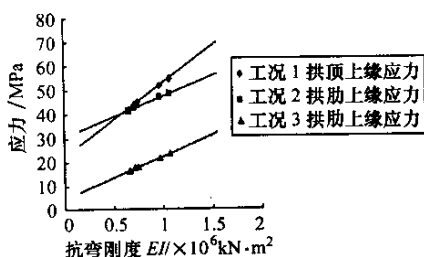


图 6 各工况拱肋上缘应力随抗弯刚度变化趋势图

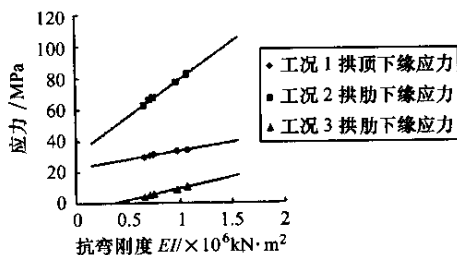


图 7 各工况拱肋下缘应力随抗弯刚度变化趋势图

4.3 刚度取值对变形计算结果的影响

拱的挠度由两部分组成,一部分为拱在弯矩作用下的下挠,另一部分为拱由于弹性压缩使拱轴线缩短引起的下挠。因此,无论是抗压刚度的减小还是抗弯刚度的减小,均会引起拱的挠度的增大,但不同的工况增大的幅度并不同。当拱以受弯为主时,抗弯刚度的减小引起计算挠度的增大幅度较大;当拱以受压为主时,抗压刚度减小引起挠度的增加幅度较大。反映到本文的算例中,在工况 1 和工况 2 中,抗弯刚度的变化引起拱肋截面位移的变化幅度为 20.3% ~ 21.4%,而抗压刚度引起的变化仅为 3.4% ~ 12.9%;而在工况 3 中,抗压刚度的变化引起拱肋截面位移的变化幅度为 36.7%,而抗弯刚度仅为 10.0%。

4.4 刚度取值对弹性屈曲临界荷载计算结果的影响

众所周知,拱的屈曲临界轴力可以方便地以下面方程表示,它同直杆构件的表示方式是一致的。

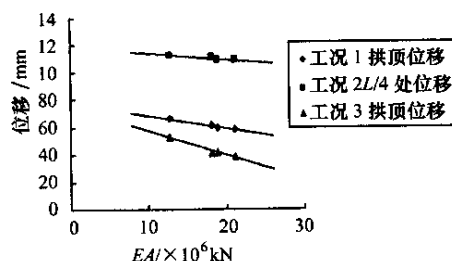


图 8 各工况拱肋截面位移随抗压刚度变化趋势图

$$N_{cr} = \alpha \frac{EI}{S^2} = \pi^2 \frac{EI}{(kS)^2} \quad (1)$$

式中, N_{cr} 为 1/4 跨中处的临界轴压荷载; E 为杨氏模量; I 为横截面惯性矩; S 为拱轴长度的一半; α 为系数; k 为有效长度系数。

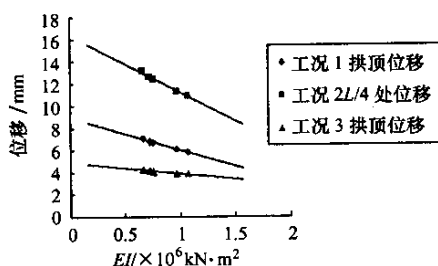


图 9 各工况拱肋截面位移随抗弯刚度变化趋势图

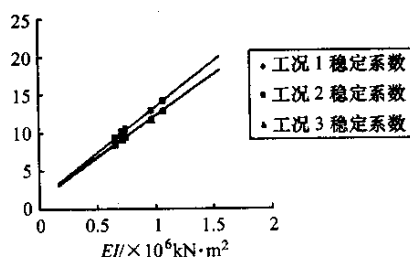


图 10 各工况模型拱稳定系数随抗弯刚度变化趋势图

从公式 (1) 可以看出,拱的弹性屈曲临界荷载与拱的抗压刚度无关。对于超静定拱由于抗压刚度影响到拱的内力,所以抗压刚度对弹性屈曲临界荷载的计算结果有一点影响,但影响极小,表 4、表 5 及表 6 的计算结果表明了这一点。但抗弯刚度对拱的弹性屈曲临界荷载有很大的影响,从图 10 可以看出,拱的稳定系数与拱肋的抗弯刚度呈线形关系,且变化趋势不随加载工况的改变而改变。

5 几点讨论

(1) 钢管混凝土拱肋抗压刚度的变化对于弹性一类稳定系数的影响极小,可以忽略不计。拱肋抗压刚度越大,其内力也越大,但这种变化幅值不大,因此拱肋抗压刚度对内力的影响也可以忽略不计。此外,拱肋截面抗压刚度的变化对截面应力的计算结果的影响

响也很小。

(2) 钢管混凝土拱肋抗弯刚度的变化对于弹性一类稳定系数的影响很大, 抗弯刚度越小, 拱的一类弹性稳定系数越小。

(3) 从计算结果可以看出, 在各工况下, 拱肋截面抗弯刚度的变化均对截面应力的计算产生较大的影响。而当拱的受力以受弯为主(工况 1 和工况 2)时, 截面抗弯刚度的变化对内力计算结果的影响较大; 对挠度的影响也较大。当拱以受压为主(工况 3)时, 钢管混凝土拱肋抗弯刚度的变化对拱截面内力计算结果和拱肋挠度计算结果的影响较小。

(4) 当拱的面内强度验算采用极限承载力时, 拱肋的抗压刚度与抗弯刚度的增大均引起超静定钢管混凝土拱的内力的增加, 因此应采用较大的刚度值才偏于安全。当拱的面内强度采用容许应力法验算时, 抗压刚度的增加虽然会引起应力的减小, 但其减小幅度很小, 而抗压刚度的增大会使拱肋截面的应力有较大的增加, 所以也应采用较大的刚度值才偏于安全。因此, 进行内力计算时建议拱肋截面的刚度采用钢管与混凝土刚度的直接迭加, 即 $EA = E_s A_s + E_c A_c$, $EI = E_s I_s + E_c I_c$ 。

(5) 由于钢管内混凝土密实度存在一定的离散性, 同时在使用荷载作用下管内混凝土开裂退出工作会对截面刚度产生削弱。因此从安全角度出发, 在进行钢管混凝土拱的挠度与弹性一类稳定计算时, 拱肋截面刚度建议采用对混凝土进行折减的计算方法, 至于用哪一本规范的计算公式还有待于进一步的研究。

在本文比较的 6 本规范中, JCJ 采用对全截面的折减不尽合理, 当含钢率较大时可能计算出来的钢管混凝土截面的刚度甚至低于空钢管的刚度; DL/T 没有显式不便于应用。余下的 4 本规范, 对于抗压刚度, 只有美国的 AISC 对混凝土刚度进行了折减, 即 $EA = E_s A_s + 0.4 E_c A_c$; 对抗弯刚度, 日本的 AIJ 公式为 $EI = E_s I_s + 0.2 E_c I_c$, 英国的 BC4 公式为 $EI = E_s A_s + 0.8 E_c I_c$, 对混凝土刚度的折减系数相差较大, 基于折衷和与抗压刚度计算公式的一致, 本文建议在进行变形计算时钢管混凝土截面抗弯刚度对混凝土刚度的折减系数采用 0.4, 即 $EI = E_s I_s + 0.4 E_c I_c$ 。

参考文献:

- [1] 王来永, 陈宝春, 孙潮. 钢管混凝土设计方法比较 [J]. 工程力学, 2001 (增刊): 544 - 548.
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集 (一) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 中国工程建设标准化协会标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程 (CECS28:90) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1990.
- [4] 国家建筑材料工业局标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程 (JCJ01-89) [S]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- [5] 中国电力行业标准. 钢管混凝土组合结构设计规程 (DL/T5085-1999) [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [6] AISC. Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, Chapter one [S]. 1986.
- [7] British Standards Institute, BS5400, Part 5. Concrete and Composite Bridges [S]. 1979.
- [8] Architectural Institute of Japan (AIJ). Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Tubular Structures [S]. Japan, 1997.

(上接第 42 页)

- 工控制的理论与方法 [J]. 重庆交通学院学报, 1999, 18 (2).
- [5] 向木生. 连续刚构桥梁施工分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24 (6).
- [6] 徐君兰. 大跨度桥梁施工控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [7] 韩大建, 等. BP 神经网络用于斜拉桥施工过程中混凝土弹性模量的识别 [J]. 桥梁建设, 2003, (1).
- [8] 胡志坚, 等. 神经网络方法在钢箱梁施工过程控制中的应用 [J]. 武汉理工大学学报, 2002, 26 (6).
- [9] 李传习, 等. 基于神经网络的混凝土大跨度桥梁主梁参数实时估计 [J]. 中国公路学报, 2001, 14 (3).

- [10] 刘来君. 大跨径桥梁施工控制温度荷载 [J]. 长安大学学报, 2003, 23 (2).
- [11] 王来林, 等. 温度变化对箱形梁桥施工控制的影响研究 [J]. 兰州铁道学院学报, 2003, 22 (1).
- [12] 应国刚, 颜东煌. 桥梁施工控制中结构温度场短期预测方法 [J]. 长沙交通学院学报, 2002, 18 (2).
- [13] 阮圣璜, 曹晓川. 炳草岗金沙江大桥施工控制及其效果 [J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22 (2).
- [14] 陈红, 等. 大跨度预应力混凝土斜拉桥的一种施工控制方法 [J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22 (6).
- [15] 刘桂生. 悬臂施工连续梁桥分阶段预应力设计 [J]. 公路测设简讯, 1996. (6).