

文章编号:1001-7372(2007)06-0056-05

# 钢管混凝土拱桥的挠度限值研究

陈宝春, 韦建刚, 王加迫

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 为了分析挠度限值是否能控制钢管混凝土拱桥结构的振动, 在对桥梁活载挠度限值研究进行回顾的基础上, 以 3 座不同结构形式的钢管混凝土拱桥为典型算例, 分别采用挠度限值和动力参数限值对钢管混凝土拱桥的行车舒适性进行了分析。分析结果表明: 挠度限值并不能有效地反映在活载作用下的实际振动和振感; 建议在钢管混凝土拱桥的设计中, 采用振动参数控制法取代活载挠度限值法来评价和控制钢管混凝土拱桥的行车舒适性。

**关键词:** 桥梁工程; 钢管混凝土拱桥; 理论分析; 挠度限值

**中图分类号:** U448.22

**文献标志码:** A

## Research on Deflection Limit Value for CFST Arch Bridge

CHEN Bao-chun, WEI Jian-gang, WANG Jia-po

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:** In order to research the problem whether the deflection limit value controls CFST arch bridge structural vibration or not, based on the literature review of the deflection limit values, three different type CFST arch bridges were taken as examples study to examine the vehicle occupant comfort by the method of live-load deflection limit values and vibration parameter limit values. Analytical results show that the live-load deflection limit values can not control the vibration of bridges under the effect of live-load effectively. In the design of CFST arch bridges, vibration parameter control method is more reasonable to assure pedestrian and vehicle occupant comfort compared with live-load deflection limit values method.

**Key words:** bridge engineering; CFST arch bridge; theoretical analysis; deflection limit value

## 0 引言

桥梁上部设计除了进行强度、稳定性等验算外, 往往还要进行活载挠度限值的验算, 以控制其振动, 从而保证行车的舒适性和安全性, 并控制因振动引起的桥面铺装等结构的损坏<sup>[1-2]</sup>。

钢管混凝土拱桥近十几 a 来在中国得到广泛的应用, 但其基础理论研究却落后于工程实践<sup>[3-5]</sup>, 目前在中国尚未颁布有关钢管混凝土拱桥的设计规范。以往的设计大多依据规范 J TJ 022—85 或 J TJ

023—85 中的有关规定进行活载挠度限值的验算。在 2004 年颁布的规范 J TG D62—2004<sup>[6]</sup> 中取消了拱桥在持久状况正常使用极限状态中活载挠度限值的有关规定。因此在钢管混凝土拱桥的设计中, 是否有必要进行挠度验算, 或挠度限值是多少, 这些都是工程界关心的问题。本文中笔者将从桥梁活载挠度限值的目的出发, 在对有关研究进行综述的基础上, 通过对 3 个不同类型的钢管混凝土拱桥典型算例的分析, 对钢管混凝土拱桥的活载挠度限值问题进行探讨。

收稿日期: 2007-03-15

基金项目: 国家西部交通建设科技项目 (2003 318 798 201)

作者简介: 陈宝春 (1958-), 男, 福建福州人, 教授, 博士生导师, 工学博士, E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn.

### 1 挠度限值的起源

根据美国 ASCE 提供的资料显示,桥梁活载挠度限值问题的研究最早可以追溯到 1871 年<sup>[7]</sup>。当时美国一个桥梁设计公司(Phoenix Bridge Company)规定火车以  $48.27 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  过桥时,桥梁的最大挠度不得超过跨径的  $1/1\ 200$ 。目前美国规范规定的挠度限值则起源于 20 世纪 30 年代初期的一份关于桥梁振动的报告。该报告调查了当时各种桥型在汽车荷载作用下的振动情况,并进行了统计分析。分析结果表明,在活载作用下,当简支梁和连续梁桥的挠度超过  $L/800$  ( $L$  为桥梁单跨跨径,后文同),悬臂梁桥挠度超过  $L/400$  时,汽车行驶引起的桥梁的振动会导致车上乘客的不舒适。因此在 1936 年的规范(AASHTO)中明确规定桥梁在活载作用下,挠度不得超过  $L/800$ 。1939 年对规范进行了修订,规定简支梁和连续梁桥的挠度限值为  $L/800$ ,悬臂梁桥挠度限值为  $L/300$ 。此后在 1958 年,美国桥梁结构挠度限值委员会对当时的挠度限值的合理性进行了研究,指出虽然当时的挠度限值为一组经验值,但能较好地控制桥梁振动,在没有更好的控制方法或参数前,仍然可采用此标准。由此可见,对桥梁挠度进行限制是为了避免高速行驶车时产生振动颠簸和冲击,从而保证行车舒适度和减少振动损害。

### 2 桥梁振动控制与舒适度评价

随着研究的不断深入,人们发现活载挠度限值并不能有效地控制桥梁结构的振动。桥梁结构振动控制的一个主要目的是保证行人与驾乘人员的舒适性,同时桥梁振动与结构损害之间的关系研究还不成熟,因此,目前对桥梁振动控制的研究主要是以舒适度为主。从人体对振动的反应来看,它主要受到振动频率、振幅、振动速度和振动加速度的影响,尤其是振动加速度对人的舒适性感觉影响最大<sup>[8]</sup>。目前在桥梁舒适度评价的指标中,采用的参数除静力挠度外,更多的是振幅、速度、加速度和频率等动力参数。

在 1985 年中国颁布的公路桥涵设计规范中,对不同桥型采用不同的挠度限值进行了限制。对于拱桥,规范 J TJ 022—85 规定按汽车荷载(不计冲击力)计算的拱桥上部结构在一个桥跨范围内的正、负挠度的绝对值之和不得大于  $L/1\ 000$ ,规范 J TJ 023—85 规定当拱桥荷载作用在一孔的半跨时,桥

跨范围内的正负挠度绝对值之和不得大于  $L/800$ 。加拿大安大略省桥梁规范(OHBDC—1992)中<sup>[9]</sup>以静力挠度和竖向一阶振动频率为参数对桥梁的振动进行控制,认为这样可以避免在设计过程中进行动力响应的计算,从而简化设计并达到满足舒适性的要求。该规范根据桥上行人多少将桥梁分成桥上有大量行人(级标准)、桥上有少量行人(级标准)和桥上不走行人(级标准)3 类设置桥梁的挠度限值,如图 1 所示。

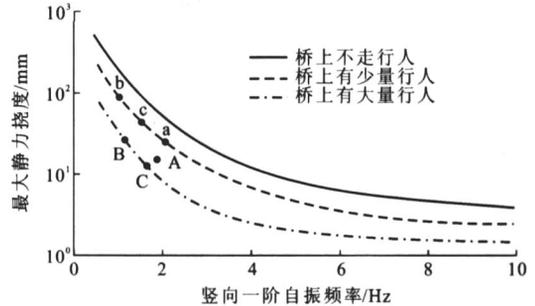


图 1 挠度限值

Fig. 1 Deflection Limit Values

图 1 中挠度为荷载作用下的最大静力挠度,频率为竖向一阶自振频率的换算频率,换算频率计算方法见式(1)

$$f_{obs} = \begin{cases} f_{cal} & f_{cal} \leq 2 \text{ Hz} \\ 0.95 f_{cal} + 0.072 & 2 \text{ Hz} < f_{cal} < 7 \text{ Hz} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $f_{obs}$  为换算频率； $f_{cal}$  为计算频率。

文献[10]中采用的则是以完全动力特性为参数的评价体系,该体系中给出了不同自振频率下桥梁的容许加速度曲线,见图 2。桥梁设计者可以根据桥梁的用途选择不同的标准。

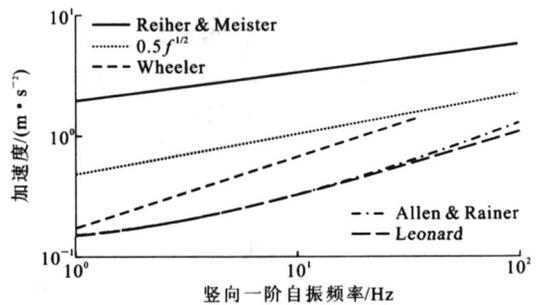


图 2 加速度容许曲线

Fig. 2 Acceleration Allowable Curves

Kobori 等<sup>[11]</sup>对公路桥梁的振动做了大量的试验,认为振动对人体的影响取决于人体自身的心理反应,提出了根据桥梁最大响应速度计算得出的振动感觉指标对公路桥梁的舒适度进行分级的评价体系。振动感觉指标的计算方法为

$$S = V_{\max} / \sqrt{2} \quad (2)$$

$$V_{\alpha} = 20 \lg(S/S_0) \quad (3)$$

式中:  $S$  为振动刺激;  $V_{\alpha}$  为振动水平;  $S_0 = 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

根据不同的  $V_{\alpha}$ , 可求得振动感觉指标  $V_G$

$$\lg V_G = \begin{cases} 0.05(V_{\alpha} - 40) & V_{\alpha} \leq 40 \text{ dB} \\ 0.03(V_{\alpha} - 40) & V_{\alpha} > 40 \text{ dB} \end{cases} \quad (4)$$

桥上行人的舒适度与振动感觉指标  $V_G$  标准值之间的关系见表 1。

表 1 行人舒适度与  $V_G$  标准值的关系

Tab. 1 Relation of Pedestrian Comfort and Normal Values of  $V_G$

舒适度等级	分类标准	$V_G$
1	轻微感觉到振动	0.32
2	明显感觉到振动	0.61
3	稍微难走	1.12
4	极其难走	1.48

### 3 算例分析

#### 3.1 算例桥梁及有限元模型

笔者以 3 座不同结构的钢管混凝土拱桥为典型算例, 对其挠度限值问题进行讨论。这 3 座算例桥梁分别为新桐山大桥、石潭溪大桥和郑州黄河公路二桥主桥。新桐山大桥为 3 跨下承式刚架系杆拱, 主孔跨径为 75 m, 拱肋截面为哑铃形, 设计荷载为城-B; 石潭溪大桥为一孔有推力中承式结构, 跨径为 136 m, 拱肋截面为桁式, 设计荷载为汽-20; 郑州黄河公路二桥主桥为 10 孔刚性系杆刚性拱梁组合结构, 每孔跨径为 100 m, 拱肋截面为哑铃形, 设计荷载为汽-超 20。3 个算例桥梁的详细资料见相关文献<sup>[12-14]</sup>。根据实桥的现场感觉, 在车辆正常行驶过程中, 人站在桥面上, 新桐山大桥和郑州黄河公路二桥主桥能感觉到轻微振动, 而石潭溪大桥能感觉到明显的振动。

在 3 座算例桥梁的有限元模型中, 拱肋均采用 Beam4 单元建模, 吊杆采用 Link10 单元, 桥面系采用梁格法模拟。有限元模型(图 3)均经过实桥测试结果的验证。

#### 3.2 算例桥梁活载挠度限值评价

在活载作用下, 为了使桥面的  $L/4$  和  $3L/4$  截面的正、负挠度绝对值之和达到最大, 根据桥面的  $1/4$  跨截面挠度影响线, 采用最不利布载工况对算例桥梁进行布载, 计算结果见表 2。

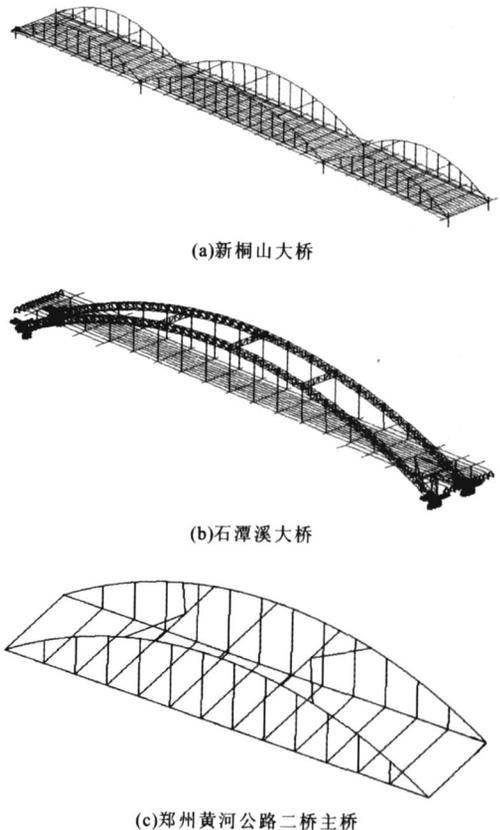


图 3 3 座钢管混凝土拱桥的有限元模型

Fig. 3 Finite Element Models of Three CFST Arch Bridges

表 2 算例桥梁有限元计算结果

Tab. 2 Calculation Results for Finite Element of Example Bridges

桥名	不同截面的挠度/mm		$\cdot L^{-1}$	竖向一阶自振频率/Hz
	$L/4$	$3L/4$		
新桐山大桥	- 20.1	8.2	1/2 669	1.680
石潭溪大桥	- 32.2	20.5	1/2 580	1.048
郑州黄河公路二桥主桥	- 14.3	5.6	1/5 025	1.394

#### 3.2.1 挠度限值评价

从表 2 可以看出: 由于郑州黄河公路二桥主桥为拱梁组合结构, 桥面系为整体肋板式, 其上部结构的整体刚度较大, 在荷载的作用下, 挠曲变形为  $L/5 025$ , 远小于新桐山大桥和石潭溪大桥。3 座算例桥梁的挠度值均远远小于规范 J TJ 022—85 和 J TJ 023—85 分别规定的  $L/1 000$  和  $L/800$  的变形值的要求。大量工程实践表明, 中国已建的钢管混凝土拱桥设计中计算挠度值一般均小于规范 J TJ 022—85 和 J TJ 023—85 的限制值<sup>[15-18]</sup>。同时由表 2 可见, 新桐山大桥和石潭溪大桥的挠度与跨径比值相近, 没有反映出现场的车辆振动感觉明显不同的实际情况, 因此用相对挠度值无法对行车舒适度

进行判别。

3.2.2 静力挠度评价

将表 2 中的计算挠度与竖向一阶频率代入图 1,图 1 中 A、B、C 三点分别为新桐山大桥、石潭溪大桥、郑州黄河公路二桥主桥挠度值和自振频率在图中对应的点,a、b、c 三点分别表示 3 座算例桥梁自振频率对应于 Ⅱ级标准的容许挠度。从图 1 中可以看出,3 座算例桥梁的挠度计算值都远远小于 Ⅱ级标准(桥上有少量行人)的容许挠度,其中新桐山大桥和石潭溪大桥的挠度计算值约为容许挠度的 1/2,郑州黄河公路二桥主桥约为挠度限值的 1/3。用这一方法所得的结果与采用规范 JTJ 022—85 和 JTJ 023—85 的分析结果基本相同,仍然无法对行车舒适度进行判别和区分。

3.3 算例桥梁动力响应参数评价

为进行动力响应参数评价,对车辆作用下桥梁的动力响应进行计算。在分析时,桥梁模型单元的材料阻尼设置为 0.01,忽略汽车阻尼及桥面粗糙、不平顺的影响,不考虑外界风载及地震的影响,也不考虑车辆、桥梁的初始状态,即认为车辆在理想的状态下运行并通过桥面。为了简化模型,以脉冲荷载模拟一辆重 200 kN,其中前后轮重分别为 70 kN 和 130 kN 的车辆<sup>[19]</sup>,如图 4 所示。车辆分别以 30、40、50、60、70 km·h<sup>-1</sup> 的速度通过桥梁,计算桥梁在各种速度下,L/4、L/2、L/3 三个截面的速度和加速度响应峰值,取其中的最大值作为桥梁振动响应峰值。

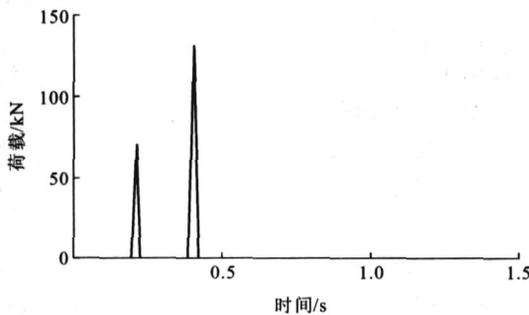


图 4 车辆脉冲荷载

Fig. 4 Impulsive Load of Vehicle

3.3.1 加速度标准评价

采用 O HBDC—1995 中给定的加速度限值 [a] 为 0.5f<sup>1/2</sup> 的标准,3 座算例桥梁的容许加速度见表 3。以计算的加速度响应峰值 a<sub>max</sub> 除以表 3 中容许加速度 [a] 得到的结果作为纵坐标,以车辆活载的不同速度为横坐标,就能得到如图 5 所示 3 座算例桥梁的加速度响应峰值曲线。

从图 5 可见,3 座桥梁在相同车辆与速度作用

表 3 容许加速度

Tab. 3 Allowable Acceleration cm·s<sup>-2</sup>

新桐山大桥	64.807
石潭溪大桥	51.182
郑州黄河公路二桥主桥	59.034

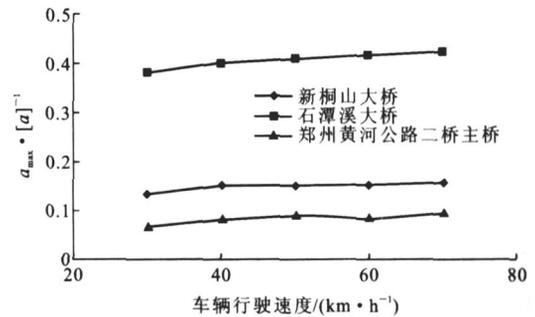


图 5 加速度响应峰值

Fig. 5 Peak Values of Acceleration Response

下,加速度响应峰值均小于容许值,从大到小的排列顺序为石潭溪大桥、新桐山大桥和郑州黄河公路二桥主桥。从图 5 还可以看出,桥梁振动加速度峰值随着汽车行驶速度的增大呈上升的趋势。当汽车速度为 70 km·h<sup>-1</sup> 时,3 座桥梁的振动加速度响应峰值均达到最大,石潭溪大桥、新桐山大桥、郑州黄河公路二桥主桥的振动加速度响应峰值分别为容许加速度的 42.4%、15.7% 和 9.5%。显然,由于郑州黄河公路二桥主桥为刚性系梁刚性拱,其上部结构整体性最好,因此其振动响应峰值最小,舒适性最好。新桐山大桥舒适性次之,而石潭溪大桥的舒适性较差。由此可见,采用 O HBDC—1995 进行加速度限值评价的结果与 3 座钢管混凝土拱桥的实地车辆振动感觉相吻合,说明用这一方法能较好地判别这 3 座钢管混凝土拱桥的行车舒适性。

3.3.2 振动感觉指标评价

根据文献[11]中提出的振动感觉指标,用振动速度对算例桥梁的计算结果进行比较,结果见图 6。

图 6 中振动感觉指标的计算结果与第 3.3.1 节加速度响应峰值的计算结果规律相同。3 座算例桥梁振动感觉指标均未达到极其难走的程度,从大到小的排列顺序也是石潭溪大桥、新桐山大桥和郑州黄河公路二桥主桥;每座桥的振动感觉指标也是随车辆行驶速度的增大而增大。在各级荷载移动速度下,郑州黄河公路二桥主桥的振动感觉指标始终小于 0.32,处于没有振动和轻微感觉到振动之间。新桐山大桥在车速小于 60 km·h<sup>-1</sup> 时,其振动感觉指标处于没有振动和轻微感觉到振动之间,而当车速

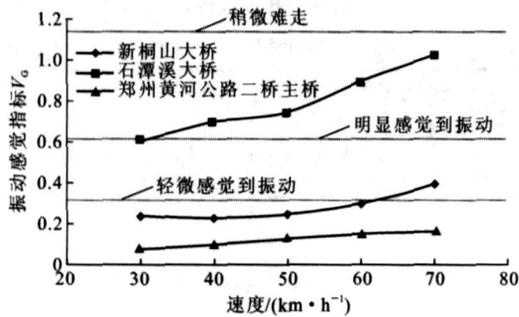


图6 振动感觉指标计算结果

Fig.6 Calculation Results of Vibration Feeling Indexes

达到  $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 则振动感觉指标为 0.39, 跳到轻微感觉到振动和明显感觉到振动之间。石潭溪大桥在车速仅大于  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 其振动感觉指标就已处于明显感觉到振动和稍微难走之间。这与采用 OHBDC—1995 容许加速度评价的结果基本一致, 同时也与 3 座桥梁的现场测试结果相吻合。

## 4 结 语

(1) 挠度限值的设置最早是为了有效地控制桥梁振动, 满足桥上行人、车上旅客的舒适性要求和减小振动损害, 然而研究表明, 挠度限值并不能有效地控制桥梁的振动。中国新颁布的公路桥梁规范 JTG D62—2004 中已取消了拱桥挠度的限值。目前国际上的发展趋势是以桥梁频率和振幅等动力参数的直接控制代替挠度限值的规定。

(2) 中国在设计钢管混凝土拱桥时大多进行了挠度限值验算。本文中进行的 3 座算例桥梁分析表明, 挠度值并不能有效地反映桥梁结构在活载作用下的实际振动和振感, 因此挠度限值丧失了控制振动的意义; 而且, 钢管混凝土拱桥计算挠度值一般均远小于规范 J TJ 022—85 和 J TJ 023—85 的限制值, 因此, 对挠度限值也无需进行控制设计。建议制订钢管混凝土拱桥设计规范时取消挠度限值这一指标。

(3) 振动速度和振动加速度等动力参数可以较好地反映出钢管混凝土拱桥在汽车荷载通过时的振动情况与振感。因此, 笔者建议在规范制订中, 引入振动加速度响应峰值或振动感觉等指标来评价和控制钢管混凝土拱桥的振动。

(4) 车辆行驶时, 钢管混凝土拱桥桥面的振动问题较为突出, 本文的研究仅仅是初步的, 要想提出可以用于规范制订的条文, 还有待于开展大量的研究工作。

## 参考文献:

### References:

- [1] J TJ 022—85, 公路砖石及混凝土桥涵设计规范[S]. J TJ 022—85, Code for Design of Highway Masonry and Concrete Bridge Culvert[S].
- [2] J TJ 023—85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. J TJ 023—85, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridge Culvert[S].
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999. CHEN Bao-chun. Design and Construction of CFST Arch Bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [4] 黄文金, 陈宝春. 钢管混凝土桁梁受弯试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 29-33. HUANG Wen-jin, CHEN Bao-chun. Experimental Research on Concrete-filled Steel Tube Truss Girder Under Bending[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 29-33.
- [5] 王元清, 张勇, 石永久, 等. 吊索与钢管混凝土拱桥新型节点承载性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 55-58. WANG Yuan-qing, ZHANG Yong, SHI Yong-jiu, et al. Analysis of Load Capacity of New-style Joints Between Cable and Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 55-58.
- [6] J TG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. J TG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridge Culvert[S].
- [7] ASCE Structures Division. Deflection Limitations of Bridges, Progress Report of the Committee on Deflection Limitations of Bridges[J]. Journal of the Structural Division, 1958, 84(3): 14-19.
- [8] SHAHABADI A. Bridge Vibration Studies[R]. West Lafayette: Purdue University, 1977.
- [9] Ministry of Transportation. Ontario Highway Bridge Design Code[M]. 3rd ed. Ontario: Quality and Standards Division, 1992.
- [10] Ministry of Transportation. Ontario Highway Bridge Design Code Commentary and March 1995 Update[M]. Ontario: Quality and Standards Division, 1995.

(下转第 78 页)

- WEI Cheng-long, ZENG Qing-yuan, LIU Xiao-yan. One Dimensional Finite Element Method for Thir-walled Curved Box Beam Analysis Including the Shear Lag Effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 65-69.
- [6] 张叔辉. 曲桥分析的薄壁箱梁单元[J]. 土木工程学报, 1984, 17(2): 1-12.  
ZHANG Shu-hui. A New Thir-walled Box Beam Element for Curved Bridge Analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 1984, 17(2): 1-12.
- [7] 王荣辉, 刘光栋. 薄壁曲线箱梁空间计算的曲板板梁单元法[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1): 73-76.  
WANG Rong-hui, LIU Guang-dong. A Curved Plate Beam Element Method of Spatial Computation for Thir-walled Curved Box Girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 73-76.
- [8] 邱波, 王荣辉, 刘光栋. 考虑隅角点承托刚性影响薄壁箱梁的空间计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 50-53.  
QIU Bo, WANG Rong-hui, LIU Guang-dong. Spatial Computational Analysis of Considering Rigidity of Box Corner Reinforcement Part for Thir-walled Box Girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 50-53.
- [9] 谢旭, 黄剑源. 曲线箱梁桥结构分析的一种有限元计算方法[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 75-80.  
XIE Xu, HUANG Jian-yuan. A Finite Element Method for Analysis of Curved Box Girder Bridge Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(2): 75-80.
- [10] 张敬珍, 徐岳, 黄平明, 等. 宽弯桥变形及控制[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(2): 64-66.  
ZHANG Jing-zhen, XU Yue, HUANG Ping-ming, et al. Displacement Control of Wide-curved Bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(2): 64-66.
- [11] 丁汉山, 刘华, 胡丰玲, 等. 高架桥弯梁抗扭稳定性[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 44-48.  
DING Han-shan, LIU Hua, HU Feng-ling, et al. Overturning Stability Analysis of Curved Box Girder Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 44-48.

## (上接第 60 页)

- [11] KOBORI T, KAJIKAWA Y. Ergonomic Evaluation Methods for Bridge Vibrations[J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, 1974, 230(6): 23-31.
- [12] 杨亚林, 陈宝春. 新桐山大桥静载试验分析[J]. 福建建筑, 2006, 24(1): 129-130.  
YANG Ya-lin, CHEN Bao-chun. The Static Load Test Analysis of Xintongshan Bridge[J]. Fujian Architecture & Construction, 2006, 24(1): 129-130.
- [13] 欧智菁, 陈宝春. 钢管混凝土桁架静力性能分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2000, 28(1): 62-67.  
OU Zhi-jing, CHEN Bao-chun. The Static Property Analysis of CFST Truss-rib Arch Bridge[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2000, 28(1): 62-67.
- [14] 孙潮, 陈宝春, 张伟中, 等. 钢管混凝土系杆拱桥空间效应分析[J]. 福建工程学院学报, 2004, 2(1): 17-22.  
SUN Chao, CHEN Bao-chun, ZHANG Wei-zhong, et al. Spatial Analysis of Concrete Filled Steel Tubular Tied Arch Bridge[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2004, 2(1): 17-22.
- [15] 张德生, 李远瑛, 刘洋. 钢管混凝土拱桥静载试验与有限元分析[J]. 混凝土, 2005, 32(8): 64-66.  
ZHANG De-sheng, LI Yuan-ying, LIU Yang. The Static Load Test and Finite Element Analysis of CFST Arch Bridge[J]. Concrete, 2005, 32(8): 64-66.
- [16] 彭桂瀚, 陈宝春. 东莞大汾北水道钢管混凝土拱桥受力分析[J]. 福建建筑, 2003, 21(4): 36-38.  
PENG Gui-han, CHEN Bao-chun. Analysis of Dongguan Dafen Waterway CFST Arch Bridge[J]. Fujian Architecture & Construction, 2003, 21(4): 36-38.
- [17] 曹宝珠, 周绪红, 刘永健. 钢管混凝土桁架新型节点试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 45-48.  
CAO Bao-zhu, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian. Experimental Research on New Joints of Concrete-filled Steel Tube Truss[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 45-48.
- [18] 李万恒, 张劲泉, 何玉珊. 丫髻沙大桥主桥荷载试验与评价[J]. 铁道标准设计, 2001, 21(6): 40-42.  
LI Wan-heng, ZHANG Jin-quan, HE Yu-shan. Yajisha Bridge Load Test and Evaluation of the RCS Standard Design[J]. Railway Standard Design, 2001, 21(6): 40-42.
- [19] DEMITZ J R, MERTZ D R, GILLESPIE J W. Deflection Requirements for Bridges Constructed with Advanced Composite Materials[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(8): 73-83.