

文章编号: 1001-8360(2006)06-0099-06

钢管混凝土(单圆管)肋拱面内极限承载力 计算的等效梁柱法

陈宝春¹, 秦泽豹²

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350002; 2. 福建工程学院 土木系, 福建 福州 350014)

摘 要: 根据试验研究与双重非线性有限元计算分析结果, 提出钢管混凝土(单圆管)肋拱面内极限承载力的等效梁柱法。分析讨论了等效梁柱法的等效长度、作用力选取和钢管混凝土梁柱极限承载力计算方法的选用。分析结果表明, 等效梁柱法中钢管混凝土梁柱的极限荷载宜采用 DL/T 规程; 对于非对称荷载, 等效长度可取 $0.72S$ (S 为半跨拱轴线弧长)、采用拱脚截面内力作为作用力; 对于对称荷载, 等效长度可取 $0.62S$ 、拱顶截面内力为作用力。与采用双重非线性有限元计算的极限承载力的比较表明, 等效梁柱法能基本反映钢管混凝土(单圆管)肋拱极限承载力的基本规律, 可供进一步研究与工程应用参考。

关键词: 钢管混凝土; 拱; 极限承载力; 等效梁柱法

中图分类号: U442 **文献标识码:** A

Equivalent Beam-column Method for Calculation of the Ultimate Load-carrying Capacity of Concrete Filled Steel Tube(Single) Arch under In-plane Loads

CHEN Bao-chun¹, QIN Ze-bao²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

2. Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350014, China)

Abstract: Based on the results from experimental researches and dual nonlinear finite element analyses, the equivalent beam-column method to predict the plane ultimate load-carrying capacity of the CFST (single) rib arch is proposed. The equivalent lengths, applied forces and calculation method of the ultimate load of CFST are analyzed. Analysis results indicate: It is better to calculate the strengths of CFST beams and columns by using Code DL/T; take $0.72S$ (the arc length of the arch axis) as the equivalent length and the inner forces at the springing section as the acting forces when the arch loads are asymmetrical; take $0.62S$ (the arch length of the arch axis) as the equivalent length and the inner forces at the crown section as the acting forces when the arch loads are symmetrical. Comparisons with the dual-nonlinearity finite element method show that the predicted results of the equivalent beam-column method follows the basic rule of the ultimate loads of the CFST (single) rib arch and they may be referred to in future research and engineering practice.

Key words: concrete filled steel tube; arch; ultimate load-carrying capacity; equivalent beam-column method

钢管混凝土(单圆管)肋拱面内极限承载力的研究已取得可喜进展, 文献[1]提出的面内受力双重非线性有限元分析方法与文献[2]的模型拱试验结果吻合良

好。然而, 双重非线性分析方法计算费时、占用内存大, 因此, 极限承载力的实用(简化)算法的研究, 对工程应用具有重要的实用价值。

如同纯压拱的弹性屈曲临界荷载借用纯压柱的弹性屈曲临界荷载公式形式一样, 考虑轴力与位移相互作用的拱的面内极限承载力的计算也常常借用直杆梁柱的简化计算公式, 如弯矩放大系数法、相关曲线法、

收稿日期: 2005-01-12; 修回日期: 2006-03-04
项目基金: 福建省基础性研究计划重大项目(2003F007)
作者简介: 陈宝春(1958—), 男, 福建罗源人, 教授, 博士。
E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn

等效梁柱法等。文献[3]曾提出钢管混凝土(单圆管)肋拱极限承载力的等效梁柱法,对福安群益大桥(主跨46 m,钢管混凝土单圆管肋拱桥)进行了分析。文献[2]应用该方法对以福安群益桥为原型的模型拱 A-1(四分点加载)和 A-2(跨中加载)进行了计算并与试验结果比较。

在讨论等效梁柱法时,文献[2,3]着重应用不同钢管混凝土结构设计规程^[4-6]与拱桥设计规范^[7]之间的比较。分析结果表明,钢管混凝土拱桥采用钢筋混凝土结构的计算方法过于保守;采用国内现有的3种钢管混凝土结构设计规程计算的结果不尽相同。这3种规程均以钢管混凝土柱为主要对象,对于拱桥的等效梁柱法的适用性还有待进一步探讨。

由于文献[2,3]分析的对象仅两个模型拱和模型拱的原型实桥,分析的样本太少,而且对该方法也缺乏深入的讨论。为此,本文以文献[1]提出的钢管混凝土(单圆管)肋拱双重非线性有限元分析方法与程序为手段,在文献[8]对钢管混凝土肋拱受力性能参数分析的基础上,对等效梁柱法进行进一步的探讨,以供工程应用参考。

1 等效梁柱法

等效梁柱法借用拱的弹性屈曲计算中等效柱的概念,将拱模拟成简支的钢管混凝土直柱,柱的长度为等效长度,柱的两端作用着偏心轴力(拱的轴力与弯矩),应用有关的钢管混凝土结构设计规程求出等效柱的极限轴力,将极限轴力代入拱的内力与外荷载的关系中,求得拱的极限荷载。

1.1 等效长度

大量的分析表明,拱的非对称弹性屈曲可以等效成柱长为 kS 的简支轴压柱的计算(k 为等效长度系数; S 为半跨拱轴线弧长)。 k 对于无铰拱为0.68~0.73、二铰拱为1.01~1.24,三铰拱为1.00~1.15^[9,10]。在中国公路桥涵设计规程(JTJ 022-85)^[11]中将上述系数进一步简化为无铰拱0.72,二铰拱1.08和三铰拱1.16。本文分析中,对于非对称荷载作用下的无铰拱(模型拱 A-1),取等效长度系数为 $0.68S \sim 0.73S$ 进行分析。分析中应用 DL/T 规程计算等效偏压柱的极限承载力,通过外加极限荷载与 $L/4$ 截面极限轴力的弹性关系,反算得到结构的极限荷载。计算结果见图2(a)。

拱顶作用集中力的拱的变形见图1(b),结构破坏时模型拱 A-2 测得两反弯点间的弧长为 $0.62S$ ^[2]。假定拱的变形曲线按三等分为三段,则每一段的弧长为 $0.66S$,将拱顶段取出,视其两端为铰接,则等效梁

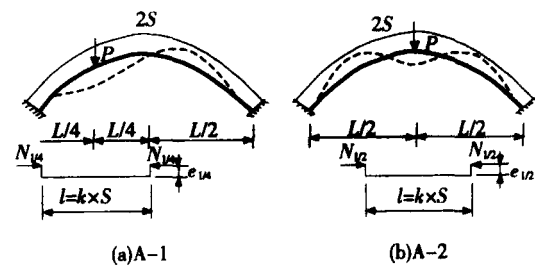


图1 拱的等效长度计算图

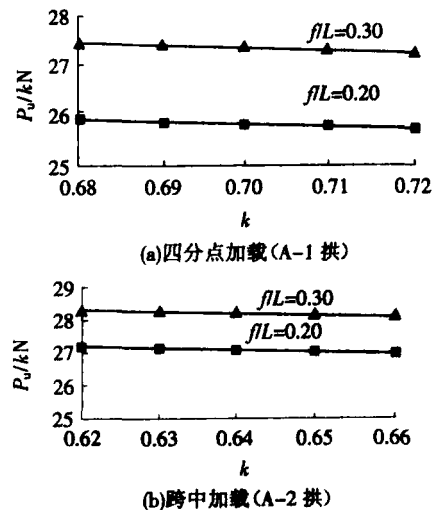


图2 极限荷载与等效长度的关系曲线

柱长为 $0.66S$ 。对于拱顶对称荷载作用下的无铰拱(模型拱 A-2),等效长度系数为 $0.62S \sim 0.66S$,采用拱顶处内力、应用 DL/T 规程的计算结果见图2(b)。

从图2可见,对于 $L/4$ 加载(A-1拱),等效梁柱法计算的极限荷载最大值与最小值仅相差0.70%;对于拱顶加载(A-2拱),最大值与最小值仅相差0.59%;因此,在比较的范围内,等效长度系数 k 对极限荷载影响很小,建议对于非对称集中力加载时, k 值采用0.72,对称集中力加载, k 值采用0.62。

1.2 作用力选取

在拱屈曲分析的等效梁柱法中,两端作用力可选取拱脚轴力、拱脚水平力、 $1/4$ 跨处的轴力及平均轴力^[9-11]。由于屈曲分析研究的是纯压拱,轴力在拱内各截面是相同的,所以选取不同截面内力对计算结果影响不大。然而,对于一般的拱,轴力沿着拱轴是变化的,拱内的弯矩(或偏心矩)作用对极限承载力的削弱非常明显,而弯矩(偏心矩)沿拱轴的变化很大。因此,如何选取作用在等效梁柱两端的作用力(轴力和弯矩),对计算结果有很大的影响。

模型拱 A-1(四分点加载)、A-2(跨中加载)作用力取不同截面内力(轴力和弯矩)采用等效梁柱法计算的极限荷载见表1和表2。计算时,模型拱 A-1和 A-2的等效长度分别取 $0.72S$ 和 $0.62S$,钢管混凝土极限

承载力应用 DL/ T 规程。

对 A-1 拱进行以拱脚内力和 $L/4$ 截面内力作为作用力的等效梁柱计算。表 1 计算结果表明,选取拱脚截面极限轴力作为等效梁柱的作用力时,等效梁柱法与有限元法计算结果之间相差 11.2%;采用四分点截面极限轴力等效梁柱的作用力时,等效梁柱法与有限元法计算结果之间相差 16.78%。两者的方差均很小,表明等效梁柱法计算结果的稳定性较好。因此,建议计算非对称加载(A-1 拱)时,把拱脚内力作为等效梁柱的作用力。

表 1 A-1 模型拱(四分点加载)

有限元法		等效梁柱法			
f/L	P_u/kN	L/4 内力		拱脚内力	
		P_1/kN	P_1/P_u	P_2/kN	P_2/P_u
0.1	29.8	23.07	0.774	25.94	0.870
0.2	32.0	25.76	0.805	27.80	0.869
0.3	32.8	27.27	0.831	31.14	0.949
0.4	32.0	27.88	0.866	28.94	0.899
0.5	31.7	28.07	0.885	27.04	0.853
均值			0.832		0.888
相对差/%			16.78		11.20
比值方差			0.045		0.038

表 2 A-2 模型拱

有限元法		等效梁柱法			
f/L	P_u/kN	拱顶内力		三分点内力	
		P_1/kN	P_1/P_u	P_2/kN	P_2/P_u
0.1	39	24.64	0.632	73.3	1.88
0.2	46.4	27.17	0.585	84.9	1.83
0.3	48.1	28.3	0.588	88.4	1.838
0.4	46.7	27.83	0.596	86.2	1.845
0.5	45.1	26.31	0.583	83.5	1.852
均值			0.595 5		1.853 5
相对差/%			40.05		85.35
比值方差			0.020 3		0.019 8

对拱顶加载(A-2 拱)的拱顶截面和三分点截面进行了等效梁柱计算。表 2 结果表明,选取拱顶截面内力和三分点截面内力作为等效梁柱的作用力时,等效梁柱法计算结果与有限元法计算结果之间相差分别为 40.05% 和 85.35%,而计算结果方差均不大,表明计算结果的稳定性好。所以,选取拱顶内力作为等效梁柱的作用力。

因此,对于单圆管肋拱在非对称荷载作用下,建议

采用拱脚截面的极限轴力作为等效梁柱的作用力;对于单圆管肋拱在对称荷载作用下,建议采用拱顶截面的极限轴力作为等效梁柱的作用力。

2 等效偏压柱承载力计算方法的选取

钢管混凝土拱桥目前尚无专门的设计规程,我国的公路桥梁与铁路桥梁的设计规程中也无钢管混凝土材料的相关计算方法,因此把拱比拟成等效梁柱后,比较简便的方法是套用现有建筑工程中钢管混凝土结构(主要是柱子)的设计规程来计算等效梁柱(偏压柱)的极限承载力。

我国目前已出版的钢管混凝土结构的设计规程主要有 3 种,即 CECS 28:90^[4]、JGJ 01 - 89^[5] 和 DL/ T 5085 - 1999^[6]。3 种规程的计算理论与计算方法虽然存在不同之处,但均建立在大量的试验研究基础上,因此在试验资料所涵盖的范围内,三者计算结果相差不大^[12]。然而应用到钢管混凝土拱的等效梁柱法中,三者之间的差异有时可能很大^[2,3]。因此有必要对这 3 种规程在钢管混凝土拱极限承载力计算的等效梁柱法中的适用性进行分析。

CECS 28:90^[4] 比其他两种规程更多地沿用了钢筋混凝土结构设计规程中的公式,主要依据钢管混凝土构件的试验结果,以经验回归公式为主。钢管混凝土承载力计算公式为

$$N_u = \eta_e N_0 \quad (1)$$

式中, N_u 为设计承载力; η 为考虑长细比的修正系数; e 为考虑偏心率的修正系数(考虑弯矩对轴向承载力的影响); N_0 为轴压构件的承载力。

JGJ 01 - 89^[5] 在基本构件计算中借用了混凝土结构设计理论的一些公式形式,根据钢管混凝土构件的试验结果和理论分析建立起一套半经验半理论的计算公式和表格。钢管混凝土承载力计算公式为

$$N_e = \eta_e N_0 \quad (2)$$

式中, η_e 为考虑构件偏心受压的折减系数; η 为 η_e 的修正值;其他符号同前。

DL/ T 5085 - 1999^[6] 所依据的基本理论视钢管混凝土为一种材料,采用统一理论,以建立在试验基础上的理论公式为主,在公式形式方面更多地借鉴了钢结构的设计理论,对压弯构件采用应力表达方式,而不是承载力,由于理论公式较繁,更多地采用了表格的形式。具体公式见文献[6]。

以上 3 种规程所涉及的对象均以房屋建筑中的柱系为主,没有钢管混凝土拱桥结构方面的有关内容,其规程的体系为建设部行业标准的体系,与公路桥梁规

程体系存在着差异。这种差异之间的转换见文献[12]。

根据 3 种规程偏压柱的计算公式,把单圆管肋拱等效成偏压柱后,计算出等效偏压柱的稳定极限承载

力,根据所选拱肋截面的内力与外荷载之间的弹性关系,反算得到单圆管肋拱的极限荷载。极限荷载的计算结果以及对比数据分析见表 3。

表 3 不同钢管混凝土结构设计规程计算结果

模型拱	有限元法		CECS 规程		DL/ T 规程		JCI 规程	
	f/L	P_u/kN	P_1/kN	P_1/P_u	P_2/kN	P_2/P_u	P_3/kN	P_3/P_u
A-1	0.20	32.0	21.71	0.678	25.76	0.805	53.23	1.664
	0.30	32.8	20.48	0.624	27.27	0.831	58.84	1.794
	0.50	31.7	18.56	0.585	28.07	0.885	59.41	1.874
相对差/ %				37.1		16.0		77.7
比值方差				0.004 4		0.003 3		0.022 5
A-2	0.20	46.4	19.04	0.410	27.17	0.585	47.96	1.034
	0.30	48.1	18.48	0.384	28.30	0.588	71.37	1.484
	0.50	45.1	14.73	0.327	26.31	0.583	114.98	2.549
相对差/ %				62.6		41.5		68.9
比值方差				0.003 6		0.000 1		1.210 7

根据表 3 的计算结果分析可得,对于非对称加载条件下,利用 CECS 规程的计算结果与试验相差较大(37.1%和 62.6%),主要是长细比修正系数与偏心率修正系数的乘积使极限荷载急速下降,使计算的极限荷载偏小。

JCI 规程给出的偏心率折减系数未考虑 e_0/D 大于 1.50 时的情况,计算时当 e_0/D 大于 1.50 时只能取 e_0/D 等于 1.50 的折减系数。由于等效梁柱法中拱的偏心率 e_0/D 一般均大于 1.5,所以计算的极限荷载对偏心率的削弱作用估计不足,导致计算结果远大于有限元计算结果(为 77.7%和 68.9%)。因此,应用 JCI 规程进行等效梁柱法计算是偏于不安全的。

DL/ T 规程借鉴了钢结构的设计理论,对压弯构件采用应力表达方式,理论公式考虑了套箍系数的影响,在偏心矩计算,考虑偏心影响时,相对比较准确,等效梁柱法计算结果与有限元法计算结果之间相差较小(16.0%~41.5%)。方差分析表明 DL/ T 规程的计算结果也最稳定。因此,建议等效梁柱法选用 DL/ T 规程进行钢管混凝土梁柱的极限承载力计算。

3 等效梁柱法与有限元法计算结果的比较

通过以上分析,本文建议等效梁柱法采用 DL/ T 规程,对于非对称荷载,等效长度取 $0.72S$ 、采用拱脚截面内力作为作用力;对于对称荷载,等效长度取 $0.62S$ 、拱顶截面内力为作用力。以下对本文建议的

等效梁柱法和文献[8]进行的受力性能参数分析的结果进行比较,进一步探讨等效梁柱法的合理性。

3.1 矢跨比

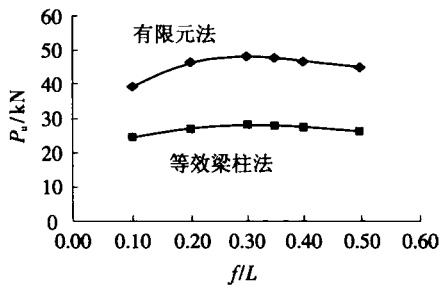
图 3 为极限荷载与矢跨比关系应用有限元法和等效梁柱法计算的结果。从图 3 可见,等效梁柱法的计算结果与有限元法计算结果规律相同,二者之间存在着一定的差值,且此差值较为稳定。有限元法计算结果大于等效梁柱法的计算结果。对于本文分析的模型拱,采用等效梁柱法进行极限承载力的计算是可行且偏于安全的。

3.2 长细比

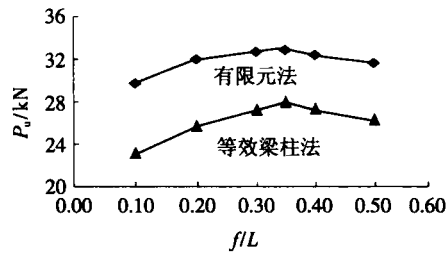
图 4 为极限荷载与长细比关系应用有限元方法和等效梁柱法计算所得的结果而绘制的曲线。等效梁柱法计算结果与有限元法计算结果的规律与 3.1 节是基本相同的。因此,模型拱可以采用等效梁柱法进行极限承载力的计算。

3.3 含钢率

图 5 中计算结果分布表明,当含钢率小于 7.2% 时,等效梁柱法计算结果大于有限元法计算结果,计算结果偏于不安全;当含钢率大于 7.2% 时,等效梁柱法计算结果小于有限元法计算结果,而且这种差值随含钢率的增大而不断扩大,换句话说,含钢率越大计算结果越安全。文献[8]分析表明,当含钢率小于 8% 时,钢管混凝土拱将呈脆性破坏,因此,一般要求含钢率大于或等于 8%。所以本文分析的含钢率不小于 8% 的模型拱,等效梁柱法是可行的。



(a)跨中加载



(b)四分点加载

图 3 极限荷载与矢跨比关系曲线

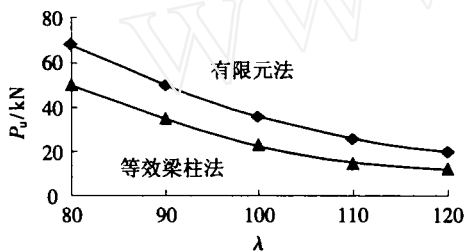


图 4 极限荷载与长细比关系曲线

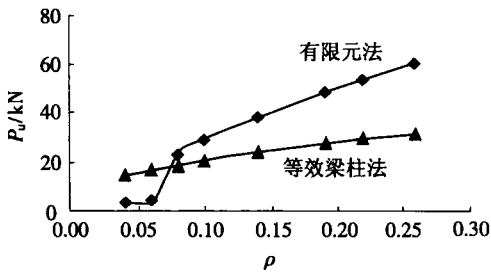


图 5 极限荷载与含钢率关系曲线

3.4 荷载作用方式

3.4.1 集中力加全跨均布荷载

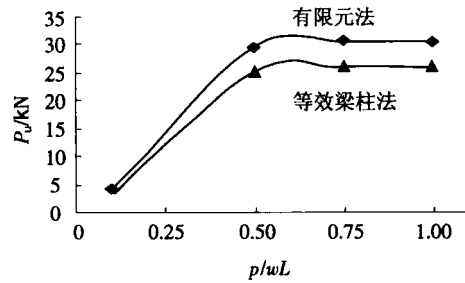
图 6 为均布荷载和集中力共同作用工况下等效梁柱法计算结果。计算结果表明,等效梁柱法计算的极限荷载与有限元法计算结果规律相同,且均小于有限元法计算结果。

3.4.2 非对称均布荷载

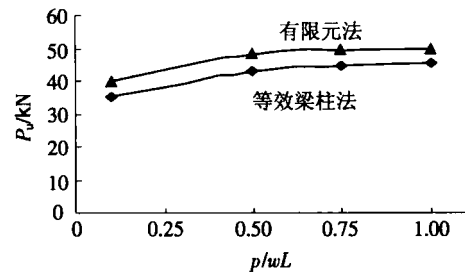
单圆管肋拱承受非对称均布荷载作用时,采用等效梁柱法的计算结果与有限元计算结果吻合很好,见图 7。

4 结论

本文提出了钢管混凝土(单圆管)肋拱面内极限承



(a)四分点集中力加全跨均布荷载



(b)跨中集中力加全跨均布荷载

图 6 极限荷载与 p/wL 的关系曲线

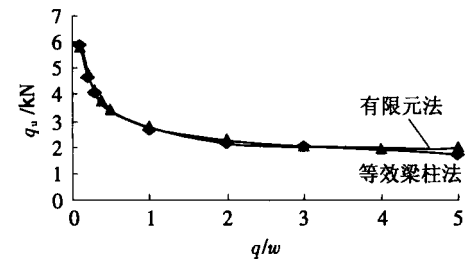


图 7 极限荷载与 q/w 的关系曲线

载力的等效梁柱法。应用该方法对文献[2]进行试验的钢管混凝土(单圆管)模型拱的极限承载力进行了计算,并与应用双重非线性有限元法计算结果进行了比较。分析表明,等效梁柱法中钢管混凝土梁柱的极限荷载宜采用 DL/T 规程;对于非对称荷载,等效长度可取 0.72S、采用拱脚截面内力作为作用力;对于对称荷载,等效长度可取 0.62S、拱顶截面内力为作用力。

与双重非线性有限元法计算结果比较表明,等效梁柱法的计算结果能基本反映模型拱极限承载力的变化规律,且一般情况下偏于安全。今后,可选取典型的实桥对本文提出的等效梁柱法进行进一步分析,以验证和改进该方法,提出极限承载力的实用算法。

参考文献:

[1] 陈宝春,秦泽豹,彦坂熙,等. 钢管混凝土拱(单圆管)面内受力双重非线性有限元分析[J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 80-84.
CHEN Bao-chun, QIN Ze-bao, HIKOSA KA Hiroshi, et al. Analysis of Concrete Filled Steel Tubular (Single Tube) Arch Subjected to in-plane Loads by Nonlinear Finite Ele-

- ment Method[J]. Journal of China Railway Society, 2003, 25(4): 80—84.
- [2] 陈宝春, 陈友杰. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程试验研究[J]. 工程力学, 2000, 17(2): 44—50.
CHEN Bao-chun, CHEN You-jie. Experimental Study on Mechanic Behaviors of Concrete-filled Steel Tubular Rib Arch Though All-process Under In-plane Loads, Engineering Mechanics[J]. 2000, 17(2): 44—50.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土单圆管肋拱桥设计计算探讨. 福州大学学报(自然科学版) [J]. 1998, 26(6): 81—85.
CHEN Bao-chun. Analysis of Design and Calculation of the Concrete Filled Steel Tubular (Single Tube) Ribbed Arch Bridge[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 1998, 26(6): 81—85.
- [4] CECS 28:90, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
- [5] JGJ 01—89, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
- [6] DL/T 5085—1999, 钢管混凝土组合结构设计规程[S].
- [7] JTJ 023—85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规程[S].
- [8] 陈宝春, 秦泽豹, 等. 钢管混凝土(单圆管)肋拱面内极限承载力参数分析[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 87—92.
CHEN Bao-chun, QIN Ze-bao, et al. Parametric Analysis of Ultimate Load-carrying Capacity of Concrete Filled Steel (Single) Tubular Arch under in-Plane Loads[J]. Journal of China Railway Society, 2004, 26(4): 87—92.
- [9] Walter J Austin. In-Plane Bending and Buckling of Arches [J]. Journal of the Structural Division, ASCE. 1971, 97 (ST5): 1575—1592.
- [10] Tetsuya Yabuki, Sriramulu Vinnakota. Stability of Steel Arch Bridges: A State-of-the-Art Report [J]. Solid Mechanics Archives, 1984, (9): 115—158.
- [11] JTJ 022-85, 公路砖石及混凝土桥涵设计规程[S].
- [12] 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.

(责任编辑 安鸿逵)

《铁道学报》(1979~2002)光盘征订启事

《铁道学报》是中国铁道学会主办的综合性学术刊物,是中国交通运输类期刊的核心刊物。本刊为双月刊, A4 开本, 128 页。逢双月 15 日出版, 国内外公开发行。主要刊登铁路运输与经济、铁道机车车辆、铁道通信信号、铁道工程等学科的科研成果论文, 在运输生产和工程实践中具有理论性的总结, 对铁道科技进步具有重要参考价值的综述评论、研究与探讨等。论文均经资深专家、学科带头人评审通过, 具有较高学术水平。适合从事铁路工作的中、高级科技人员阅读参考。

为了便于读者对《铁道学报》进行完整的保存和方便的检索, 《铁道学报》(1979~2002)光盘于 2003 年 12 月出版发行。该光盘收录了《铁道学报》自创刊到 2002 年的所有论文, 读者可以根据出版年、期、作者姓名、论文题目(或只输入题目中出现的词或字)即可检索到所需论文。

需要该光盘的单位和个人请按以下途径订购:

1. 直接向《铁道学报》编辑部订购(全年均可, 010-51892393, 010-51842631)。订价: 150 元/盘,(含邮资)。邮局汇款: 北京复兴路 10 号, 中国铁道学会《铁道学报》编辑部, 邮编: 100844。请在汇款单背面附言栏注明“学报光盘”、数量及联系电话。银行汇款: 工商银行北京北蜂窝路支行, 账号: 057130-82, 户名: 中国铁道学会。请在汇单用途栏注明“学报光盘”字样及收件部门或联系电话。款到后即回寄发票, 并及时寄送光盘。

2. 订户也可到所在省、市、自治区铁道学会联系订购事宜。

3. 该光盘也参加“全国非邮发报刊联合征订”, 并入编《全国非邮发报刊联合征订目录》。读者也可向该服务部订购。电话及传真: (022) 23973378; 地址: 天津市大寺泉集北里别墅 17 号, 联合征订服务部, 邮编: 300385。网址: <http://www.LHZD.com>。

《铁道学报》编辑部