

文章编号: 1001-8360(2004)04-0087-06

钢管混凝土(单圆管)肋拱面内极限承载力的参数分析

陈宝春¹, 秦泽豹²

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

摘 要: 应用双重非线性有限元分析方法对钢管混凝土(单圆管)肋拱受力全过程的非线性性能与极限承载力进行了参数分析。分析的参数有矢跨比、长细比、含钢率以及加载方式。分析结果可供提出极限承载力实用算法和工程应用参考。

关键词: 钢管混凝土; 拱; 非线性; 极限承载力; 参数分析

中图分类号: U442 文献标识码: A

Parametric Analysis of the Ultimate Load-carrying Capacity of the Concrete Filled Steel (Single) Tubular Arch under In-Plane Loads

CHEN Bao-chun¹, QIN Ze-bao²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

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

Abstract: With the dual non-linearity finite element program, the nonlinear behaviors and ultimate load-carrying capacity of the Concrete Filled Steel (single) Tubular (CFST) rib arches are analyzed for the whole stressing process. The analyzed parameters include the rise to span ratios, slenderness ratios, steel ratios and loading conditions. The results can be referred to in putting forward an practical algorithm for the ultimate load-carrying capacity of the CFST arches, and can be useful for practical engineering.

Key words: concrete filled steel tube; arch; nonlinearity; ultimate load-carrying capacity; parametric analysis

随着钢管混凝土拱桥在我国的应用发展,其设计理论的研究也不断深入。钢管混凝土拱桥面内极限承载力作为设计理论中的核心问题之一已取得了一定的进展。已对钢管混凝土单圆管模型肋拱面内受力全过程进行了试验研究^[1,2]。文献[3]提出的钢管混凝土拱(单圆管)面内受力双重非线性有限元分析方法与文献[1]模型拱试验结果对比表明,该方法能较好地反映钢管混凝土拱受力全过程的非线性性能。本文以文献[3]提出的双重非线性分析方法,以文献[1]的试验模型为基本对象,对钢管混凝土(单圆管)拱进行参数分析,探讨不同参数对结构的非线性性能与极限承载力的影响,为建立钢管混凝土(单圆管)拱的极限承载力的实用算法打下基础,也为工程应用提供参考。分析

等。

文献[1]进行试验的模型拱净跨径为 460 cm,净矢高 $f = 153.3$ cm,净矢跨比为 $1/3$,肋拱下缘曲线为二次抛物线。拱肋钢管为 $\phi 76 \times 3.8$ mm 的无缝钢管,含钢率 $= 4t/D$ (t 为钢管壁厚, D 为钢管外径) 为 20%。管内灌注 C30 混凝土。相同尺寸的钢管混凝土模型肋拱制作了 A—1 和 A—2 两根。A—1 模型在 $L/4$ 点处加集中力, A—2 模型在 $L/2$ 点处加集中力,试验荷载通过 10 t 油压千斤顶反顶支撑框架取得反力来实施。对模型拱受力全过程的若干截面的变形和钢管应变进行了测试。具体试验内容和结果详见文献[1]。

文献[2]的双重非线性的有限元方法中,材料非线性采用纤维单元模型,将截面划分为有限个条带通过数值积分求得截面刚度。几何非线性的切线刚度矩阵采用 UL 法建立,非线性解采用修正的 Newton-Raphson 方法。双重非线性采用嵌套的方法,全过程分析用混

收稿日期: 2003-05-12; 修回日期: 2004-03-12
基金项目: 福建省基础性研究计划重大项目(2003F007)
作者简介: 陈宝春(1958—),男,福建福州人,教授,博导。
E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn

合法求解。极限荷载取荷载-位移曲线的峰值点所对应的荷载值。具体计算方法及对文献[1]模型拱的建模详见文献[3]。

1 矢跨比

矢跨比是拱结构的一个重要参数,对受力性能影响很大。对于拱的内力,从结构力学可知,矢跨比大,弯矩大、轴力小;反之,矢跨比小,则弯矩小、轴力大。但对于非线性性能与极限承载力,矢跨比的影响要复杂得多,解析解是不可能的。图1给出了模型拱不同矢跨比的荷载-位移曲线,图2给出了极限荷载随矢跨比变化的曲线。

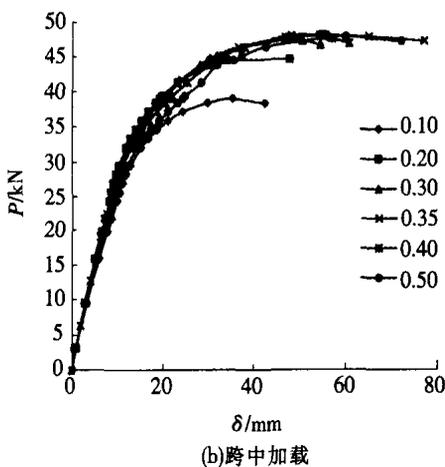
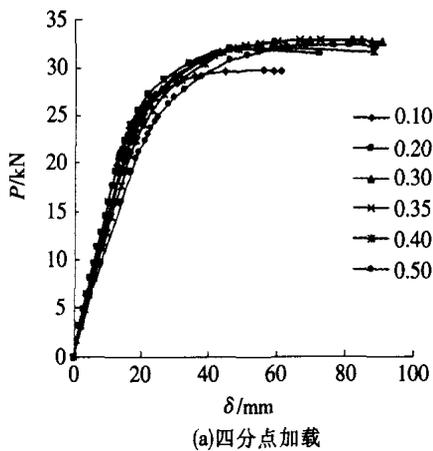


图1 不同矢跨比的荷载-位移曲线

从图1、图2可见,结构的受力性能与矢跨比的关系,大致以矢跨比0.3为分界点分为两个阶段。当矢跨比小于0.3时,随矢跨比的增大,曲线的初始切线刚度增大、线性段增长、极限承载力提高;当矢跨比大于0.35时,随矢跨比的增大,曲线的初始切线刚度减小、线性段缩短、极限承载力下降。矢跨比从0.10到0.35之间,承载力增加的幅度在19%~22%左右,矢跨比从0.35到0.50之间,承载力的下降幅度在10%左右。

由此可见,对于模型拱的受力,以矢跨比0.3~0.35附近最好。

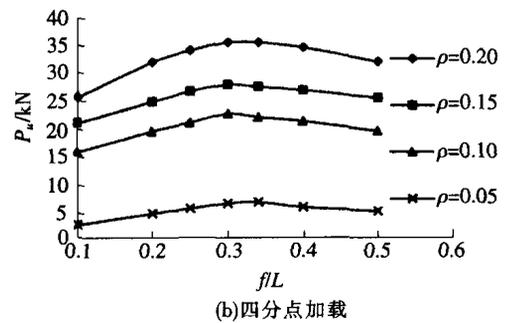
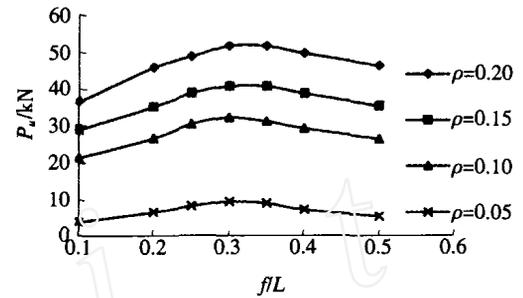


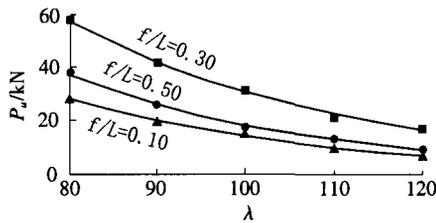
图2 极限荷载与矢跨比关系曲线

2 长细比

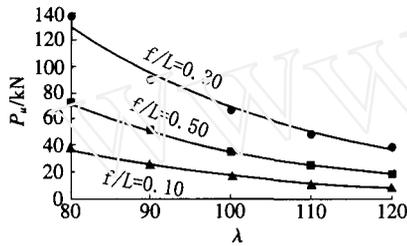
钢管混凝土拱由于材料的强度较高,相对于圬工和钢筋混凝土拱桥,截面尺寸小,在荷载作用下压力与挠度的相互作用将产生较大的附加弯矩。换言之,几何非线性问题较为突出。因此,长细比也是影响钢管混凝土拱受力的一个重要因素。依据DL/T规范和JCI规范计算长细比的方法,本文按照 $4L/D$ 计算构件的长细比(L 为构件的计算长度; D 为圆钢管的直径),其中 L 的长度为拱轴线长度乘以有效长度系数0.72。按这种方法计算国内已建成的部分钢管混凝土单圆管肋拱桥的长细比为80~120^[4](文献[1]中试验模型拱的长细比为94.6)。本文分析的长细比范围取80~120,计算结果见图3和图4。

图3的极限荷载与长细比关系曲线表明,随着长细比的增加,极限荷载逐渐减小。

图4中列出了极限荷载相对值,以图3中曲线的最高点为基准点,其他点的纵坐标除以基准点的纵坐标,得到一系列的相对值。根据这些点的分布,进行拟合回归,得到一趋势线,变化关系为 $y = 12.822e^{-0.0323x}$,因此认为钢管混凝土单圆管肋拱结构的极限承载力随长细比的增大呈现指数函数下降的变化。



(a)四分点加载



(b)跨中加载

图 3 极限荷载与长细比关系曲线

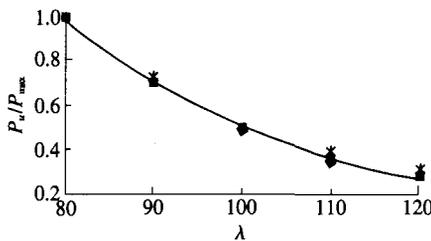
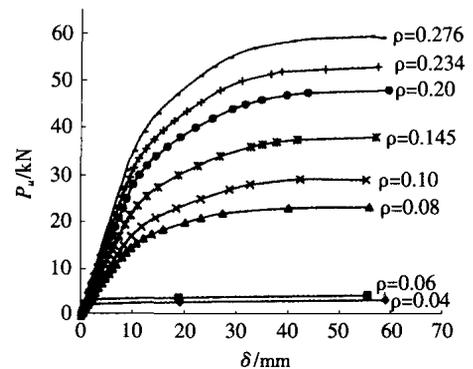


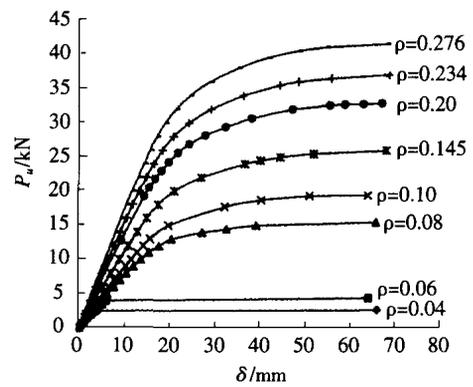
图 4 长细比对极限荷载的影响曲线

3 含钢率

钢管混凝土材料的显著优点之一是在构件受压时,钢管对混凝土的紧箍力作用使混凝土的抗压强度得到提高,而管内混凝土使钢管的局部稳定性也得到提高。因此,含钢率和钢材强度应与混凝土等级相匹配,主要是套箍系数要适合。套箍系数 $\eta = f_y A_y / f_{ck} A_c$, 其中, f_y 为钢材屈服强度; f_{ck} 为混凝土的轴心抗压强度; A_y 和 A_c 分别为钢管和混凝土的截面积。套箍系数一般宜在 0.5 以上。当钢材强度与混凝土强度相对固定后,它就体现在含钢率或钢管直径 D 与壁厚 t 之比(简称径厚比)。一般要求径厚比 D/t 应小于 100, 或含钢率大于 4%^[4]。钢管混凝土拱肋的含钢率一般在 6%~20%之间,其中单圆管拱肋的含钢率一般在 8%以上。含钢率太小则钢管对混凝土的紧箍作用不明显,且管壁容易出现局部失稳。但如果太大,则不经济,因为钢管管壁较厚时,钢管的局部屈曲问题并不突出,钢材的强度也不能充分发挥,填充混凝土的必要性不足,而且钢管的加工也困难。



(a)跨中加载



(b)四分点加载

图 5 不同含钢率的荷载-位移曲线

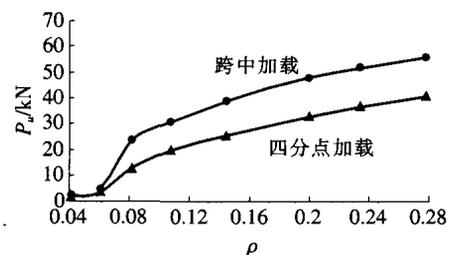


图 6 极限荷载与含钢率的关系曲线

从图 5 和图 6 的不同含钢率荷载-位移曲线和极限荷载与含钢率关系曲线可以看出,结构的刚度和强度随含钢率的增大而增大,但含钢率与结构受力性能关系也不是线性的。当含钢率小于 8%时,钢管本身与钢管对混凝土套箍作用对结构受力性能的影响都很小,结构以混凝土受力为主,荷载-位移曲线经过短暂的线性段后,即进入水平线,结构破坏呈现出脆性破坏特征,这是工程设计应避免的。所以,钢管混凝土单圆管拱肋的含钢率一般不应小于 8%。但反过来,含钢率也不是越大越好,除前述的经济、施工方面的原因外,从极限荷载与含钢率的关系曲线本身来看,极限荷载随含钢率的增大,并不是呈现线性关系。当含钢率增加到一定之后,极限荷载的增长呈现缓慢趋势。所以,对于钢管混凝土单圆管拱肋,建议含钢率在 8%~20%。

4 荷载作用方式

实际结构中,拱肋既受到恒载的作用也受到活载的作用,而与试验模型 A-1 与 A-2 的加单个集中力不同。为此,这里根据不同荷载作用对结构受力性能的影响进行分析。荷载作用方式主要分为对称集中力荷载、非对称集中力荷载、对称均布荷载、非对称均布荷载、对称集中力荷载与对称均布荷载共同作用、非对称集中力荷载与对称均布荷载共同作用 6 种。

4.1 单个集中力荷载

对不同矢跨比的模型拱分别进行跨中和四分点加载的双重非线性分析,计算所得的极限荷载结果见图 7。曲线表明,跨中对称加载时,极限荷载较大;四分点非对称加载时,极限荷载较小。计算结果与试验结果一致。显然,拱承受非对称荷载作用时极限承载力较小,所以拱桥设计中常以非对称荷载作为设计计算的控制条件。

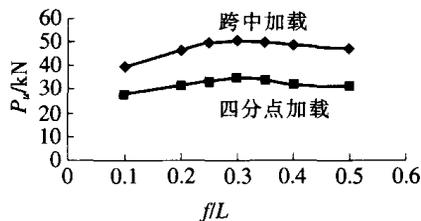
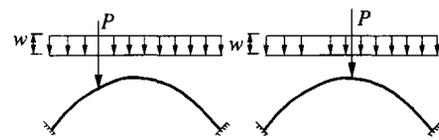


图 7 单个集中力作用极限荷载对比

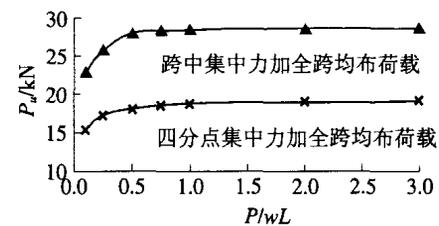
4.2 集中力加全跨均布荷载

我国城市桥梁的设计规范和新颁布的公路工程技术标准中汽车荷载分为车辆荷载和车道荷载两种。车道荷载为均布荷载加一个集中荷载^[5,6]。图 8(a) 为集中力加全跨均布荷载示意图,图中全跨均布荷载 w 和集中力荷载 P 同时作用于单圆管肋拱上,并按比例同时增加,直至结构破坏。计算分析中,把集中力荷载和均布荷载总值的比值作为一个参数来研究结构的极限承载力。

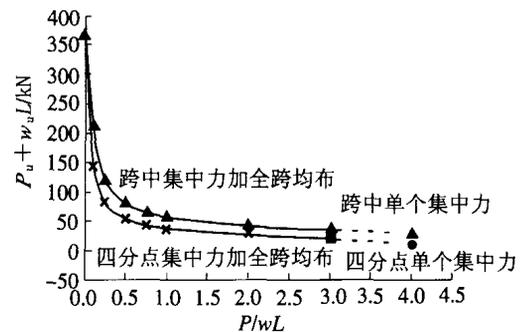
图 8 的曲线趋势表明,随着集中力荷载比例的增加,结构破坏时 P_u 也逐步增加,增长幅度在 10% 左右。但是 $P_u + wL$ 随着集中力荷载比例的增加而逐渐减小,从 0.1 增加到 0.50 的过程中, $P_u + wL$ 的变化幅度较大(数据表明在 33% 左右);当 P/wL 从 0.50 继续增加时, $P_u + wL$ 的增加幅度减小(5% 以内)。因此,对于钢管混凝土单圆管肋拱结构,承受单个集中力加载时的极限荷载小于集中力荷载与均布荷载共同作用时的极限荷载。换言之,受集中力作用的拱,加上均布荷载后,结构的受力性能会得到改善,极限承载力也相应提高。而实际结构中,恒载占了相当的比重,因



(a)集中力加全跨均布荷载示意图



(b)集中力加全跨均布荷载 P_u 与 P/wL 的关系



(c)集中力和均布荷载共同作用时极限荷载对比

图 8 集中力加全跨均布荷载作用极限荷载曲线

此,实际结构的极限承载力比之试验进行的集中力加载要大。

4.3 分布荷载

由于非对称荷载是拱结构设计控制荷载,当采用车道荷载时往往车道荷载半跨分布比全跨分布更为不利。这样,设计时常采用全跨均布荷载(恒载) rq ($0.0 < r < 1.0$) 加半跨均布荷载(活载) $(1-r)q$ 作为拱桥的整体结构验算荷载。在研究中,常常用 r 的变化来探讨拱的强度与稳定的关系^[7]。图 9 给出了 r 为 1.0、0.50 和 0.0 的拱的变形图。

当 r 为 1.0 时,结构受到均布荷载的作用,结构的内力与变形是对称的。对于三铰拱,抛物线是其合理拱轴线,拱内只有轴力而无弯矩。然而,这里分析的是无铰拱,考虑到弹性压缩后,结构内有弯矩的存在。当结构不存在缺陷、荷载完全对称时,计算所得结构破坏时的变形也应是对称的。然而,由于这里采用的是数值算法,在计算中数据处理引起的累计误差使得其数值模型在受力的后期并非完全对称。在受力的后期,由于拱内的轴力很大,拱的微小挠度就会产生很大的附加弯矩,这是对计算中的微小的非对称因素的放大,使得图 9 (b) 结构最终破坏时呈现出非对称的变形。双重非线性有限元计算出来的最大荷载值 $q = 7.66$

kN/m,就是结构的临界屈曲荷载。

由文献[8],纯压拱的临界屈曲荷载可通过下式求解

$$q_{cr} = K_1 EI_x / L^3 \quad (1)$$

式中, q_{cr} 为临界屈曲荷载; EI_x 为纵桥向的抗弯刚度; L 为拱的跨径; K_1 为与等效长度有关的系数。

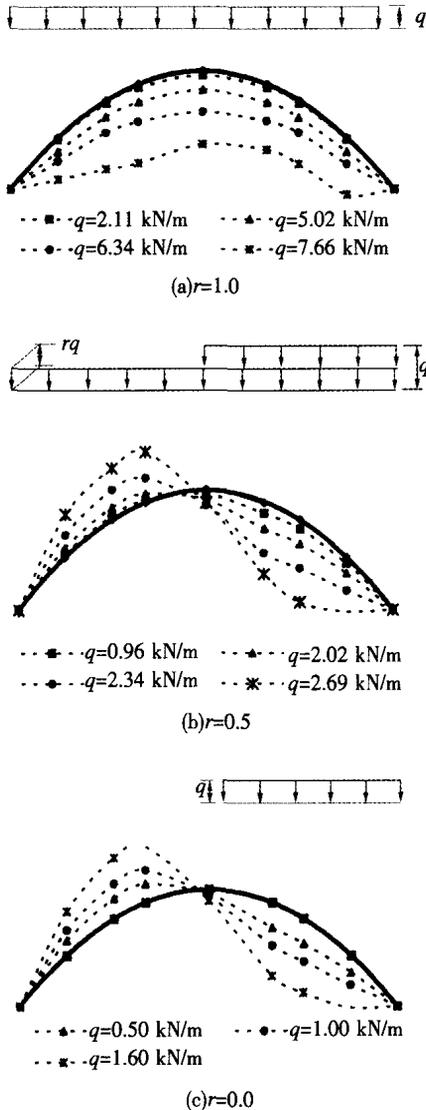


图 9 单圆拱变形图

表 1 给出了不同矢跨比时,用式(1)和双重非线性有限元计算的临界屈曲荷载。可以看出,二者在矢跨比为 0.2~0.4 时吻合较好,当矢跨比超出此范围时,二者差距加大。当矢跨比大于 0.2(实际中几乎不出现)时,结构的弯矩值较大,材料非线性影响加剧;当矢跨比小于 0.4 时,拱的几何非线性影响加剧。有限元计算考虑了几何与材料的双重非线性因素,而一类弹性稳定计算的临界屈曲荷载只考虑了小变形的几何非线性,没有考虑大变形和材料非线性的影响,因此,当材料非线性、几何非线性或双重非线性影响加剧后,临界屈曲荷载与双重非线性计算的极限荷载的差值就

加大了。

表 1 极限荷载计算结果 单位:kN/m

f/L	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
式(1)	6.05	10.07	11.46	11.06	9.71
双重非线性	4.76	8.53	9.41	12.11	12.01
比值	0.786	0.847	0.821	1.094	1.236

当 $0.0 < r < 1.0$ 时,从图 9(b)和(c)可见,结构从开始受力到最后的破坏都是非对称的,结构受力性能上没有本质上的区别。从图 10 给出的拱的极限荷载与 r 的关系曲线可见,极限荷载随着 r 值的增大呈非线性地增加。换言之,全跨的均布荷载在总荷载中所占的比重越大,结构的极限承载力也越大。在 $r=0.7$ 附近,极限荷载的增长趋势有一较大的变化。对于一般的公路与城市桥梁,通常恒载占总荷载的比重均较大,从这一点出发,它对于结构的受力是有利的。

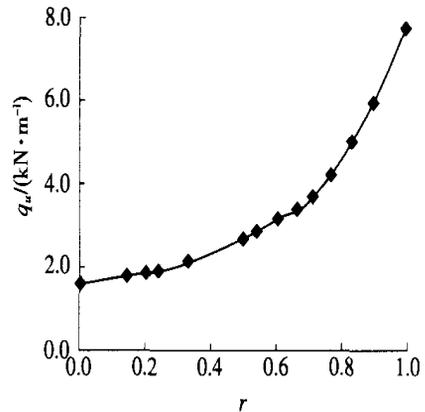


图 10 极限承载力与 r 曲线

5 结束语

本文应用双重非线性有限元分析方法对文献[1]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参数分析,以下几点主要结论可供进一步研究和工程应用参考。

- (1) 极限承载力与矢跨比的关系,以矢跨比 0.3~0.35 为分界点分为两个阶段。当矢跨比小于 0.30 时,随矢跨比的增大,极限承载力逐渐增大;当矢跨比大于 0.35 时,随矢跨比的增大,极限承载力下降。
- (2) 极限承载力随长细比增大而明显降低。
- (3) 随着含钢率增大,钢管混凝土单圆管肋拱弹性阶段的刚度增大,弹性工作阶段延长,极限承载力提高。含钢率小于 8% 时,结构的受力性能较差,呈脆性破坏的特征;从 8% 增加到 20% 之间,极限荷载增长显著;当含钢率大于 20% 以后,结构极限承载力增幅减

小。

(4) 承受全跨均布荷载作用时,拱的刚度、承载力均较大。应用双重非线性有限元可以计算出结构临界屈曲荷载。

(5) 同时承受集中力和均布荷载时和承受非对称分布荷载时,全跨均布荷载在总荷载中所占的比重越大,结构受力性能越好,极限承载力也越大。

本文的分析是以具体的模型拱为分析对象的。进一步的研究,可在本文分析的基础上,以实际的典型桥梁为例,通过典型荷载模式下拱的极限承载力分析,确定具有表征意义的荷载模式,然后进行包括拱轴线型在内的参数分析,为提出极限承载力的实用算法提供参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 韦建刚,陈宝春,林英. 钢管混凝土肋拱面内多点对称加载试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2001,34(增刊):102—106.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] CJJ 77-98,城市桥梁设计荷载标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [6] JTGB01—2003,公路工程技术标准[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [7] Tetsuya Yabuki, Sriramulu Vinnakota. Stability of Steel Arch Bridges: A State-of-the-Art Report [J]. Solid Mechanics Archives, Vol. 9, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, 1984: 115—158.
- [8] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,1996.

(责任编辑 张武美)

《铁路交通噪声与震动》出版

由华东交通大学雷晓燕、圣小珍教授编著的《铁路交通噪声与震动》已由科学出版社出版发行。

《铁路交通噪声与震动》一书取材于国内外学者近十年来应用新理论和新方法在铁路交通噪声与震动领域内的最新研究成果,其中相当部分内容属作者的工作。主要内容包括:声波的辐射、传播与衰减特性,列车-轨道耦合系统振动分析,铁路噪声、地铁噪声和轮轨噪声计算方法及控制,地面列车和地下列车产生的大地振动,以及统计能量分析在预测高架轨道交通噪声中的应用。书中内容取材新颖、跟踪学术前沿;注重理论的严谨与完整,各章之间既有联系又相对独立,读者可通篇阅读也可按专题阅读;注重理论联系实际,增加信息量。作者期望把国内外学者在本领域内的最新研究成果和发展动向介绍给读者。本书可作为土木、交通、环境、道路与铁道工程专业本科生、研究生、教师和工程技术人员的教材和参考书。全书44万字,定价为45元人民币。

(雷晓燕 供稿)