第 12 卷 第 32 期 2012 年 11 月
1671—1815(2012)32-8770-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 12 No. 32 Nov. 2012
© 2012 Sci. Tech. Engrg.

建筑技术

薄壁矩形钢管混凝土受压柱临界宽厚比

侯红伟 高轩能* 张惠华

(华侨大学土木工程学院,泉州 362021)

摘 要 对薄壁矩形钢管混凝土柱在轴压作用下的局部屈曲性能进行了研究。使用能量法分析了钢板的局部屈曲系数。假设钢管壁在非加载边受到弹性约束,在内侧受到混凝土的径向压力,通过计算弹性约束系数,得到了矩形钢管混凝土柱轴压下的临界宽厚比。从公式中得知径向力降低了钢管的屈曲应力。钢管屈曲系数随着约束系数的增大而增大,且与钢管截面高宽比和邻边厚度比有关。

关键词 薄壁矩形钢管混凝土 临界宽厚比 能量法 局部屈曲系数 弹性约束

中图法分类号 TU398.7; **文献标志码** A

钢管混凝土结构由于具有承载力高、塑性韧性好、施工方便、耐火性能好等优点,近十余年在我国发展迅速,大量应用于工程实践[1,2]。矩形钢管混凝土构件承载力虽然没有圆形截面钢管混凝土高,但其外形规则、截面相对展开、有利于配合建筑设计及梁柱节点连接,且拥有较大的抗弯强度和抗剪强度,防火措施相对简单;同时相对于圆方形截面,矩形截面可以按要求提高强轴方向刚度,而保持弱轴方向刚度不变,从而提高截面整体效果[3]。在钢管混凝土结构工程中采用薄壁钢管,可以减少钢材用量,减轻焊接工作量,进而降低工程造价。其中的核心混凝土能有效地提高薄壁构件的局部屈曲强度、抗火性能和防腐蚀性能。同时薄壁型钢对混凝土有效约束作用使其处于复杂应力状态,从而提高了混凝土强度,改善了塑性和韧性。薄壁矩形钢管混凝土构件充分结合了二者的优势,在工程中得以广泛应用。

2012 年 7 月 11 日收到,7 月 26 日修改 福建省科技计划重大项目(2012Y4010)、福建省自然科学基金项目(2011J01319)、中央高校科研业务费专项基金项目(JB-JC1005)资助

第一作者简介:侯红伟(1987—),男,硕士研究生。研究方向:钢结构。E-mail:hgwhou@163.com。

* 通信作者简介:高轩能(1962—),男,工学博士,教授,博士生导师。研究方向:钢结构及工程结构灾害控制。E-mail: gaoxn117@sina.com。

矩形薄壁钢管混凝土柱管壁在压力作用下很容易发生局部屈曲,使钢管部分截面提前退出工作,降低钢管混凝土构件的承载能力。但由于混凝土向外膨胀延缓或阻止了钢管向内凹屈曲,同时产生对钢管的径向压力,导致与空钢管局部屈曲性能有很大不同。

对于薄壁钢管混凝土柱局部屈曲问题目前已开展了相关研究,文献[4]用有限元软件分析考虑初始几何缺陷薄壁方钢管混凝土柱的局部屈曲性能,计算得到临界宽厚比。文献[5]采用能量法对有初始弯曲的钢管混凝土柱进行了屈曲分析,初弯曲存在降低了管壁宽厚比。文献[6]假定方形钢管混凝土构件钢管板件在非加载边受到弹性约束,得出钢管局部屈曲强度计算公式,并给出带约束拉杆方形钢管混凝土轴压构件的宽厚比限值。文献[7,8]对钢管混凝土的钢管屈曲承载力进行了分析,结果表明钢管填充混凝土后明显提高了钢管的屈曲承载力。同时由于钢板存在初始几何缺陷和残余应力,导致大宽厚比下钢板的屈曲承载力下降。以上假设钢管间为固定约束或未考虑混凝土对钢管压力,与实际不符。本文主要研究受压矩形薄壁钢管混凝土柱局部屈曲,考虑钢管间弹性约束和混凝土径向应力等,分析管壁宽厚比的限值表达式,探讨临界宽厚比的合理取值。

1　计算分析

1.1　边界条件与位移函数

用能量法对受压矩形钢管混凝土柱管壁局部屈曲应力进行分析推导,进而得到临界宽厚比。假定管内核心混凝土为半刚性材料,管壁发生局部屈曲前与混凝土共同工作;在钢管纵向加载边为固定边,相邻管壁间约束为弹性约束,模型如图 1。

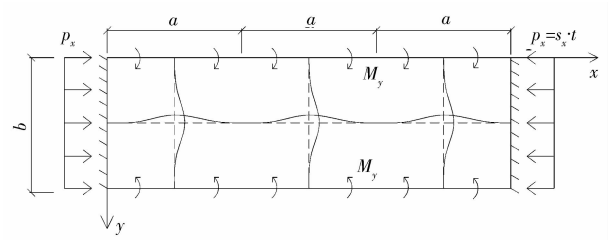

图 1　矩形钢管壁局部屈曲模型

根据假设纵向取钢板的一个半坡进行研究,由计算模型分析,边界条件有

$$当\ x=0,a\ 时,\omega=\frac{\partial\omega}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\begin{cases}\omega=0,M_y=-D\dfrac{\partial^2\omega}{\partial y^2}=-\zeta\dfrac{\partial\omega}{\partial y},当\ y=0\ 时\\ \omega=0,M_y=-D\dfrac{\partial^2\omega}{\partial y^2}=+\zeta\dfrac{\partial\omega}{\partial y},当\ y=b\ 时\end{cases} \tag{2}$$

式(2)中 ζ 为非加载边约束刚度,沿边缘为常数,钢板弯曲刚度 $D=\dfrac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$。

$$利用对称性\begin{cases}\left.\dfrac{\partial\omega}{\partial y}\right|_{y=0}=-\left.\dfrac{\partial\omega}{\partial y}\right|_{y=b}\\ \left.\dfrac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right|_{y=0}=\left.\dfrac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right|_{y=b}\end{cases} \tag{3}$$

设满足边界条件的位移函数为

$$\omega=\left[c_1\left(1-\cos\frac{2\pi y}{b}\right)+c\sin\frac{\pi y}{b}\right]\left(1-\cos\frac{2\pi x}{a}\right) \tag{4}$$

代入式(3)

$$\chi=\frac{\xi b}{2D}=\frac{2\pi c_1}{c} \tag{5}$$

χ 为非荷载边弹性约束系数,并取 $m=\dfrac{\chi}{2\pi}$。

则位移函数为

$$\omega=c\left[m\left(1-\cos\frac{2\pi y}{b}\right)+\sin\frac{\pi y}{b}\right]\left(1-\cos\frac{2\pi x}{a}\right) \tag{6}$$

1.2　屈曲应力

根据弹性理论,应用能量法求解小挠度情况下管壁的屈曲荷载。

1.2.1　弯曲应变能

$$U=\frac{D}{2}\iint_\Omega\left\{(\nabla^2\omega)^2-2(1-\mu)\left[\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}-\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x\partial y}\right)^2\right]\right\}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\frac{c^2D\pi^4}{24b^2}\left(a_1\eta+a_2\frac{1}{\eta^3}+a_3\frac{1}{\eta}\right) \tag{7}$$

$$式(7)中\ \eta=\frac{a}{b},\begin{cases}a_1=9+\dfrac{96m}{\pi}+144m^2\\ a_2=48+\dfrac{512m}{\pi}+144m^2\\ a_3=24+\dfrac{256m}{\pi}+96m^2\end{cases}。$$

1.2.2　板面力做功

由于板均匀受压,板内面力 $N_x=-\sigma_x t$,$N_y=0$,$N_{xy}=0$。

$$W=-\frac{1}{2}\iint_\Omega\left[N_x\left(\frac{\partial\omega}{\partial x}\right)^2+N_y\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)^2+2N_{xy}\frac{\partial\omega}{\partial x}\frac{\partial\omega}{\partial y}\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\frac{c^2\pi^2\sigma_x t}{6\eta}a_4 \tag{8}$$

$$式(8)中\ a_4=\left(3+\frac{32m}{\pi}+9m^2\right)。$$

1.2.3　径向力变形能

钢管屈曲前核心混凝土受压向外膨胀对管壁有纵向力作用,假设与位移成正比,即 $q=k_1\omega$。k_1 为混凝土刚度支承系数,当 $k_1=0$ 时为刚性支承。

引入无量纲参数:支承刚度与弯曲刚度比 $Y=\dfrac{k_1b^4}{D\pi^4}$。

$$U_1=-\iint_\Omega k_1\omega^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y=-\frac{c^2D\pi^4}{4b^2}Y\eta a_4 \tag{9}$$

1.2.4　钢板非加载边弹性变形能

$$\mathrm{U}_\Gamma=\frac{\zeta}{2}\int_0^a\left[\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)^2\Big|_{y=0}+\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)^2\Big|_{y=b}\right]\mathrm{d}x=\frac{6c^2\pi^3\mathrm{Dm}\eta}{b^2} \tag{10}$$

1.2.5　钢板屈曲总势能

$$\Pi=U+U_1+U_\Gamma-W \tag{11}$$

根据最小势能原理 $\frac{\partial \Pi}{\partial c}=0$。

$$\sigma_x t=\frac{\pi^2 D}{4a_4 b^2}\left[\left(a_1-6Ya_4+\frac{144m}{\pi}\right)\eta^2+a_2\frac{1}{\eta^2}+a_3\right]=k\frac{\pi^2 D}{b^2} \tag{12}$$

式(11)中 k 为板件屈曲系数

$$k=\frac{1}{4a_4}\left[\left(a_1-6Ya_4+\frac{144m}{\pi}\right)\eta^2+a_2\frac{1}{\eta^2}+a_3\right] \tag{13}$$

当 $\frac{\partial k}{\partial \eta}=0$ 时，k 取最小值 k_{cr}，此时 σ_x 取最小值。

$$\text{则 } \eta_{cr}=\left(\frac{a_2}{a_1-6Ya_4+\frac{144m}{\pi}}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{14}$$

$$\text{屈曲应力 } \sigma_x=k\frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{15}$$

2 刚度支承系数及弹性约束影响

(1)当 $\zeta\to 0$ 时，$\chi\to 0$，$m\to 0$ 此时钢板非加载边可看作简支边，计算 $\eta_{cr}=\left(\frac{48}{9-18Y}\right)^{\frac{1}{4}}$，当刚度支承系数 $k_1=0$ 时，$\eta_{cr}=1.52$，$k_{cr}=5.46$；

(2)当 $\zeta\to\infty$ 时，$\chi\to\infty$，$m\to\infty$ 此时钢板非加载边可看作固定边，计算 $\eta_{cr}=\left(\frac{144}{144-54Y}\right)^{\frac{1}{4}}$，当刚度支承系数 $k_1=0$ 时，$\eta_{cr}=1$，$k_{cr}=10.67$。

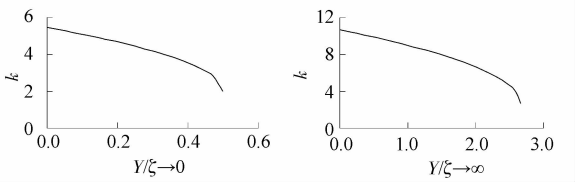

图 2 支承刚度与弯曲刚度比 Y 对 k 影响关系

对于矩形钢管混凝土柱而言，相邻钢管壁间约束为弹性约束，即 $0<\chi<\infty$，若考虑混凝土为刚性支承 $Y=0$，则板件屈曲系数在 5.46～10.67 之间，从图 2 可以分析混凝土的径向力导致管壁屈曲系数下降。

由于 k 与 χ 关系式较复杂，可将其简化为 $k=10.39-\left(\frac{21}{\chi+10}\right)^2$，图 3 为与计算公式[6,9]比较，$\chi$ 在 0—20 之间时屈曲系数增长较快，之后几乎不再变化，保持在 10 左右。

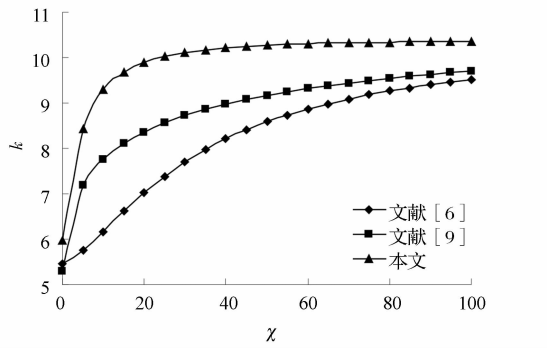

图 3 屈曲系数 k 随 χ 变化曲线

3 屈曲系数及临界宽厚比的确定

3.1 屈曲系数

根据箱形截面钢板间转动约束系数公式[10]，考虑核心混凝土对钢管的支承作用及相邻钢板间的转动约束等相关因素，通过与试验[11—12]校对后，将系数 r 加以修正，得到相应计算公式为

$$\chi=\left(\frac{t_c}{t}\right)^3\frac{r}{\rho},\ r=1.5-\left(\frac{tc}{t_c b}\right)^2 \tag{16}$$

$$\rho=\frac{1}{\pi}\tanh\left(\frac{\pi c}{2b}\right)\left(1+\frac{\pi\frac{c}{b}}{\sinh\pi\frac{c}{b}}\right) \tag{17}$$

其中 b、t 为计算板的宽度和厚度，c、t_c 为相邻板宽度和厚度。

表 1 钢管屈曲应力计算与试验结果比较

试件	壁宽 b /mm	壁厚 t /mm	宽厚比 b/t	屈服强度 σ_y /MPa	实测应力 σ_{01} /MPa	计算应力 σ /MPa	$\frac{\sigma}{\sigma_{01}}$	资料
LB1	120	3	40	300	300	300	1.00	文献［11］
LB3	150	3	50	300	300	300	1.00	
LB5	180	3	60	300	300	300	1.00	
LB7	240	3	80	300	200	198.7	0.99	
LB9	300	3	100	300	120	127.2	1.06	
FB1	360	3	120	265	93.4	88.3	0.95	文献［12］
FB2	420	3	140	265	79.9	64.9	0.81	
FB3	480	3	160	265	43.7	49.7	1.14	
FB4	540	3	180	265	38.8	39.3	1.01	

表 2　屈曲系数与钢管截面参数关系

c/b \ t_c/t	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
0.5	5.70	7.98	9.51	10.12	10.50
0.6	5.49	7.79	9.42	10.09	10.49
0.8	–	7.40	9.30	10.04	10.48
1.0	–	6.83	9.19	10.02	10.48

通过表 2 分析在截面高宽比一定时,屈曲系数随厚度比增大而增大;在截面厚度一定时,屈曲系数随高宽比增大而减小。而且截面的厚度比影响更显著。

考虑一般矩形钢管混凝土柱,截面参数选取 $t_c/t = 1$ 及 $0.5 \leqslant c/b \leqslant 1$,将管壁屈曲系数拟合为二次函数 $k = -1.65\gamma^2 + 0.24\gamma + 8.25$,结果如图 4,其中截面高宽比 $\gamma = c/b$。

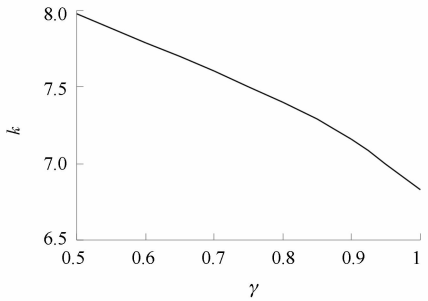

图 4　屈曲系数 k 与 γ 关系曲线

3.2　临界宽厚比

通过以上计算得知,当钢管截面各边厚度相同时,方钢管混凝土柱的屈曲系数最小,综合考虑板件残余应力缺陷及塑性变形等,将 E 修正乘以系数 0.5[13],满足弹性屈曲应力不小于钢材屈服强度

$$\sigma_x = k\frac{0.5\pi^2 E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{t}{b}\right)^2 \geqslant f_y \tag{18}$$

取 $E = 2.06 \times 10^5\ \mathrm{N/mm^2}$,$\mu = 0.3$,$k = 6.83$。

得 $\dfrac{b}{t} \leqslant 52\sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$,与文献[14]结果相一致。

4　结语

本文应用能量法分析了薄壁矩形钢管混凝土受压柱管壁局部屈曲,综合各种因素影响得到钢管混凝土柱的临界宽厚比。通过计算可知假设管壁非加载边为弹性约束是合理的,屈曲系数与截面高宽比和邻边厚度比取值有关,由于钢管与混凝土共同工作,相互之间存在径向作用,使受压管壁屈曲系数下降,即降低了钢管的屈曲承载力,从而影响整体结构的力学性能,因此在构造设计时要对管壁宽厚比加以限制,确保结构安全可靠。

参　考　文　献

1　韩林海,陶　忠,刘　威. 钢管混凝土结构 – 理论与实践. 福州大学学报,2001;29(6):24—34

2　陈宝春. 钢管混凝土拱桥(第 2 版). 北京:人民交通出版社,2007

3　王　蕾,江　雪. 矩形钢管混凝土短柱受压承载力计算. 桂林工学院学报,2003;23(4):441—444

4　沈剑波. 带肋薄壁钢管混凝土短柱轴压力学性能研究. 泉州:华侨大学,2007

5　张　健,高轩能. 考虑初始弯矩形薄壁钢管砼柱管壁屈曲分析. 南昌工程学院学报,2009;28(3):47—49

6　蔡　健,何振强,金雪峰. 带约束拉杆方形钢管混凝土轴压柱局部屈曲性能. 工程力学,2007;24(5):169—175

7　郭兰慧,梅洪元,远　芳. 钢管填充混凝土后屈曲承载力分析. 哈尔滨工业大学学报,2009;41(4):27—32

8　郭兰慧,戎　芹,张素梅. 方钢管混凝土中钢管屈曲承载力研究. 哈尔滨工业大学学报,2011;43(10):6—11

9　金雪峰,张学文,蔡　健. 方形钢管混凝土轴压柱局部屈曲性能的研究. 合肥工业大学学报,2007;30(7):885—887

10　柏拉希. 金属结构的屈曲强度. 同济大学钢木教研室译. 北京:科学出版社,1965

11　B U Y. Local and post-local buckling of concrete-filled steel-welded box columns. Journal of Constructional Steel Research, 1998; 47: 47—72

12　Brian U Y. Local and post – local buckling of fabricated steel and composite cross sections. Journal of Structural Engineering, 2001, (6): 666—677

13　夏志斌,姚　谏. 钢结构—原理与设计. 北京:中国建筑工业出版社,2004

14　Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures, part 1.1, general rules and rules for building. London (UK): British Standards Institution, 2004

(下转第 8780 页)

2 柳孝图. 建筑物理. 北京:中国建筑工业出版社,2010
3 高庆龙,杨 柳,刘加平,等. 居住建筑外墙传热系数优化研究. 四川建筑科学研究,2009;(2):245—248
4 金斯科,龚延风. 南京地区典型居住建筑能耗模型及65%节能措施研究. 暖通空调,2011;(2):94—98
5 孙诗兵,李俊领,田英良,等. 墙体节能改造保温层厚度的优化研究. 节能技术,2008;(3):219—221
6 徐云伟,贾 口,陈 滨. 墙体材料选择与最佳经济厚度的优化研究 节能与环保,2006;(6):20—23

Studying on the Method of Insulation Thickness of External Walls for Residential Buildings

WANG Jin-kui[1], XU Hao-jun[2], SHAO Xu[1]
(Department of Architecture Hebei Institute of Architecture and Engineering[1], Zhangjiakou 075024, P. R. China;
Zhang Jiakou City Construction Worker School[2], Zhangjiakou 075024, P. R. China)

[**Abstract**] Several common residential building external wall thermal insulation structure in Zhangjiakou for example is took, analysised insulation materials life cycle cost of residential building external wall adopted heating degree day and present value of annuity. It is concluded that the wall heat transfer coefficient is the main factors of economic thickness of insulation material. Analysis results showed that: when the life cycle cost of the wall is low, the wall economic heat transfer coefficient is same, no matter what kind of insulation materials and primary wall. Then the economical thickness of insulating material can be calculated. The wall heat transfer coefficient of Zhangjiakou area economy is between 0.3— 0.4 W/(m^2 · K).

[**Key words**] present value of annuity economic insulation thickness heating degree day based on 18 ℃

(上接第 8773 页)

Critical Width-to-thickness Ratio of Concrete-filled Rectangular Thin-walled Steel Tube Columns under Force Loading

HOU Hong-wei, GAO Xuan-neng*, ZHANG Hui-hua
(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, P. R. China)

[**Abstract**] The local buckling behavior of concrete-filled rectangular thin-walled steel tube columns under axial loading is presented, energy approach is used to calculate the local buckling coefficient of rectangular steel plate. Assumed that steel tube is subjected to elastic constraint at unloading edge and radial force provided by concrete inside, an elastically restraining factor is given and critical width-to-thickness ratio is got in the end. It is known that radial force reduces buckling stress of steel tube, buckling coefficient increases with the increase of restraining factor, and also is influenced by height-to-width ratio and thickness ratio.

[**Key words**] concrete-filled rectangular thin-walled steel tube critical width-to-thickness ratio energy approach local buckling coefficient elastically restraining