

文章编号:1673-2049(2013)02-0076-06

# 椭圆钢管柱受压性能研究进展

孙 波,童乐为

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

**摘要:**为了促进中国椭圆钢管结构的研究与应用,通过对国外椭圆钢管的应用和研究相关文献的调研与分析,归纳总结了椭圆钢管柱的截面特性、截面分类以及在轴压和压弯荷载作用下的结构性能等问题,发现目前国外对于椭圆钢管的研究主要关注单个构件的受力性能,对于椭圆钢管结构节点性能及椭圆钢管混凝土柱性能的研究将是未来研究的重点。

**关键词:**椭圆钢管;工程应用;受压性能;压弯性能;截面特性

**中图分类号:**TU375

**文献标志码:**A

## Research Development of Compression Properties of Elliptical Hollow Section Columns

SUN Bo, TONG Le-wei

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to promote the research and application of elliptical hollow section (EHS) in China, through investigation on literature about application and research of EHS, the structural behaviors of EHS columns were summarized about cross section characteristic and classification, and structural behaviors under axial compression as well as under combined compression and bending load. The recent research work of EHS is mainly about bearing capacity of individual component, and the future research shall focus on properties of the joints of EHS structures and concrete-filled EHS columns.

**Key words:** elliptical hollow section; engineering application; compression property; combined compression and bending behavior; cross section characteristic

## 0 引 言

钢管以其轻盈明快的建筑外形和在受压、受弯、受扭作用下表现出的卓越的结构性能,受到了建筑师及结构工程师的青睐。最早的无缝钢管和焊接圆钢管截面的生产方法是 19 世纪发展起来的,1886 年,Mannesmann 兄弟创造了斜辊道穿轧生产工艺,这一生产工艺连同数年后发展起来的皮尔格无缝轧制工艺实现了薄壁无缝长管的加工。1930 年,Fretz-Moon 发展了连续焊接工艺后,焊接圆钢管截

面实现了实用化。1952 年,Stewarts 和 Lloyds 又发展了矩形钢管截面。随着钢管制作、端面切割以及焊接问题的解决,钢管在结构上的应用得到了快速的普及与发展<sup>[1]</sup>。

随着现代建筑工程的发展,对建筑外形及结构效率的追求越来越高,近年来椭圆钢管正受到越来越多的关注和应用。椭圆钢管光滑的流线型外形不仅可以达到建筑美学的效果,还可以降低风荷载的作用。与圆钢管相比,椭圆钢管绕两对称轴的抗弯刚度不同,可以通过其截面尺寸以及长短轴的合理

收稿日期:2013-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(50478108)

作者简介:孙 波(1988-),男,山东章丘人,工学硕士研究生,E-mail:sunboce62@gmail.com。

布置,实现材料强度的充分利用,达到节约钢材和减少视线遮挡的目的。

目前,椭圆钢管在国外已比较多地应用于建筑结构及桥梁结构中,从近年来国际管结构会议发表的论文可知,英国、加拿大、澳大利亚等国的学者已对椭圆钢管构件的轴压、受弯、压弯性能进行了一定程度的研究,并已进入椭圆钢管节点性能及椭圆钢管混凝土柱受压性能的研究阶段。椭圆钢管截面分类已被纳入欧洲规范 EN 10210<sup>[2-3]</sup> 以及英国钢结构学会(SCI)和英国钢结构协会(BCSA)制定的行业设计规程。

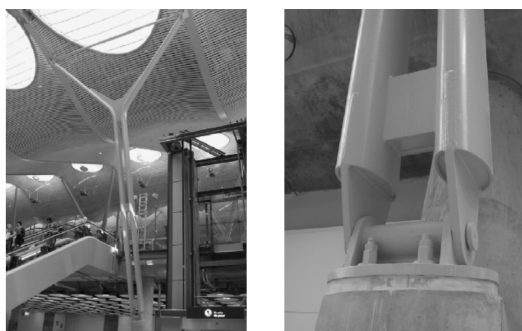
在中国,椭圆钢管在土木建筑结构中的研究和应用还是空白,这主要归结于目前中国尚无椭圆钢管的生产线。然而,了解国际上有关椭圆钢管的应用、研究和设计状况,有助于中国未来探索椭圆钢管在工程中的应用。

## 1 椭圆钢管的应用

椭圆钢管用于土木工程领域始于 19 世纪中叶,1845 年,在英国 Britannia 桥的设计中,主桁架梁的受压弦杆首先考虑了采用椭圆钢管;1859 年,Brunel 设计的 Royal Albert 桥的受压构件采用了钢板锻造的椭圆钢管。在建筑物中,椭圆钢管最早用作玻璃屋面以及玻璃幕墙的支撑构件,此后逐渐作为受压柱构件使用,并用于输电塔、风力发电塔架、城市装置(如候车亭)以及楼梯扶手等<sup>[4]</sup>。

近年来,椭圆钢管在欧洲得到了一些普及应用,如伦敦 Heathrow 机场 3 号航站楼长途汽车站和 5 号航站楼主体结构、马德里 Barajas 机场 4 号航站楼主体结构(图 1)等建筑结构以及苏格兰 Braemar Highland Society 桥等桥梁结构<sup>[5]</sup>。此外,加拿大也有一些工程采用了椭圆钢管柱,如温哥华的 Electronic Arts 大楼及安大略湖奥沙瓦的 Legends Centre 大楼<sup>[6]</sup>。

最早大量生产椭圆钢管的企业是法国的 Tubeurop 建材公司,他们同时生产的还有半椭圆形钢管(D 形钢管)。现在英国的 Corus 公司以及德国的 Ancofer Stahlhandel GmbH 公司也开始生产椭圆钢管。椭圆钢管加工的主要参数是截面的长宽比(半长轴长度  $a$  与半短轴长度  $b$  的比值  $a/b$ ),根据欧洲规范 EN 10210-2:2006 中的规定,工程用椭圆钢管截面的长宽比宜采用 2,钢材强度等级取 S335J2H(相当于中国 Q345 钢),最小屈服强度为 335 MPa,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的夏比冲击功为 27 J。由于椭



(a) 椭圆钢管柱

(b) 柱脚

图 1 马德里机场航站楼主体结构

Fig. 1 Major Structure of Terminal in Madrid Airport

圆钢管通过热加工成型,所以残余应力较小,且具有优良的焊接性能和韧性。EN 10210 中给出椭圆钢管的截面尺寸范围在  $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 3.2\text{ mm}$  到  $500\text{ mm}\times 250\text{ mm}\times 16\text{ mm}$  之间,管壁厚度的最大容许相对误差为  $-10\%$ ,外径的容许相对误差为  $\pm 1\%$ ,且误差不能超过  $\pm 0.5\text{ mm}$ 。

## 2 椭圆钢管的研究进展

椭圆钢管受压性能的研究始于 20 世纪后半叶,1951 年,Marguerre<sup>[7]</sup> 最先以不同曲率的圆柱壳为背景进行研究,通过假定变形方程,得出椭圆钢管的屈曲模态和弹性屈曲应力,并分析得到最大变形出现在靠近最大曲率半径的点,但最大曲率半径点的变形为 0。

1962 年,Kempner<sup>[8]</sup> 采用与文献[7]中不同的曲率方程研究了椭圆钢管的屈曲性能,得出椭圆钢管的屈曲应力与椭圆最大曲率半径相同的圆钢管的屈曲应力相当,这是一种下限解,最大变形出现在最大曲率半径的点,这与文献[7]中的结论不同。

1964 年,Kempner 等<sup>[9-10]</sup> 分析了椭圆钢管的后屈曲性能,发现椭圆钢管截面长宽比越大,后屈曲性能越稳定。他们后来的研究证明了截面长宽比大的椭圆钢管,可以达到高于分叉屈曲的承载能力,这是因为在曲率大的刚性主轴(长轴)区域发生了应力重分布。1968 年,Hutchinson<sup>[11]</sup> 进行了椭圆钢管的屈曲和初始后屈曲性能的研究,证明了当椭圆钢管壁厚足够薄时,文献[8]中提出的采用半径与椭圆钢管最大曲率半径相同圆钢管的屈曲应力作为椭圆钢管屈曲应力的计算方法是可行的。

1971 年,Feinstein 等<sup>[12]</sup> 进行了不同长度固支椭圆钢管的屈曲性能研究,发现长度对椭圆钢管弹性屈曲应力的影响非常显著。1971 年,Tennyson 等<sup>[13]</sup> 进行了截面长宽比在  $1\sim 2$  之间的椭圆钢管屈

曲性能的试验研究,验证了之前一些学者理论分析的结论。1976年,Tvergaard<sup>[14]</sup>研究发现,如果考虑材料的弹塑性性能,由于长轴区域材料的过早屈服,椭圆钢管的轴压承载力可能无法超过文献[9]中得出的屈曲荷载。另外,由文献[14]可知,长宽比大的弹塑性椭圆钢管,对初始缺陷不敏感,而长宽比较小的弹塑性椭圆钢管,对初始缺陷则很敏感。

近年来,Chan和Gardner等<sup>[15-18]</sup>进行了椭圆钢管轴压性能的研究,分析了椭圆钢管在轴压作用下的弹塑性性能,并提出了椭圆钢管截面的分类方法及不同截面类别的椭圆钢管受压承载力的计算方法。Zhu等<sup>[19]</sup>进行了椭圆钢管轴压短柱受力性能的有限元分析,分析中考虑了椭圆钢管的初始缺陷和材料的非线性性质,将有限元分析结果与已有试验结果进行比较,发现有限元计算得到的椭圆钢管的极限承载力低于试验得到的极限承载力。文献[4]中进行了8根截面长宽比为2的椭圆钢管及椭圆钢管混凝土柱的轴压试验,得到了不同径厚比和长度下的椭圆钢管的屈曲模态和临界荷载,发现椭圆钢管的屈曲模态更接近于板的屈曲,提出了用矩形钢管截面等效椭圆钢管截面的计算方法。

此后,对于椭圆钢管的研究范围又进一步扩展,文献[20]~[25]中进行了椭圆钢管在压弯荷载共同作用下的屈曲性能研究,并且研究了弯矩平面内应力呈线性分布时的弹性屈曲性能,提出了椭圆钢管在压弯荷载共同作用下各类别截面的径厚比限值。Lam等<sup>[26]</sup>进行了工字形钢梁-椭圆钢管混凝土柱连接节点性能的有限元分析,Shen等<sup>[27-28]</sup>进行了椭圆钢管X形节点在轴向荷载作用下的受力性能研究,提出了椭圆钢管节点承载力的计算公式,扩大了椭圆钢管的应用范围。

### 3 受压柱性能的分析

#### 3.1 截面特性

图2为一个典型的椭圆钢管截面,其中, $t$ 为椭圆钢管壁厚, $\theta$ 为每个积分单元相对 $x$ 轴转过的角度。与普通圆钢管截面不同,其截面曲率半径沿周长不断变化。

椭圆方程可由下式表示

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

椭圆钢管的截面面积 $A$ 可按式计算

$$A = P_m t \quad (2)$$

式中: $P_m$ 为椭圆钢管的周长。

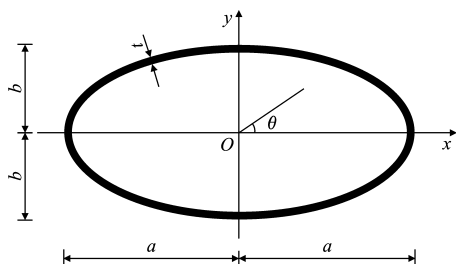


图2 椭圆钢管截面

Fig. 2 Cross Section of EHS

$P_m$  的精确值可按式得到

$$P_m = 4a_m \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\sin^2(\theta) + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cos^2(\theta)} d\theta \quad (3)$$

式中: $a_m, b_m$ 分别为从椭圆钢管壁厚中点算起的半长轴和半短轴的长度, $a_m = (2a - t)/2, b_m = (2b - t)/2$ 。

式(3)的计算比较复杂,不便于工程应用,Almkvist等<sup>[29]</sup>提出了以下近似计算公式

$$P_m = \pi(a_m + b_m) \left[ 1 + \frac{3(a_m - b_m)^2 / (a_m + b_m)^2}{10 + \sqrt{4 - 3(a_m - b_m)^2 / (a_m + b_m)^2}} \right] \quad (4)$$

研究表明,通过式(4)求得的椭圆钢管周长与真实值相差不大,相对误差只有-0.04%,故通常可采用式(4)计算椭圆钢管的周长。 $P_m$ 还可根据EN 10210-2:2006中给出的下述公式进行计算

$$P_m = \pi(a_m + b_m) \left[ 1 + 0.25(a_m - b_m)^2 / (a_m + b_m)^2 \right] \quad (5)$$

当 $a/b=2$ 时,式(5)计算的椭圆钢管周长与真实值的相对误差为-0.02%,但是随着截面长宽比的增大,相对误差逐渐增大,最大可达到-1.8%。

此外,EN 10210-2:2006中还给出了以下直接计算椭圆钢管截面面积的近似方法,即

$$A = \frac{\pi}{4} [(2a \times 2b) - (2a - 2t)(2b - 2t)] \quad (6)$$

式(6)计算的椭圆钢管截面面积偏小,通常采用式(2),(4)来计算椭圆钢管的截面面积。

考虑椭圆钢管截面的2种极端情况,当半长轴长度与半短轴长度相等,即 $a=b$ 时,截面长宽比为1,椭圆钢管变为半径为 $a$ 的圆钢管;当半短轴长度为0时,截面长宽比为无穷大,椭圆钢管变为2块等厚钢板叠合而成的厚度为 $2t$ 的平板。由于2种极端情况之间包含了所有可能的长宽比的椭圆钢管截面,所以椭圆钢管的截面特性可以认为介于圆钢管与厚度为 $2t$ 的平板之间,许多椭圆钢管截面的承载力计算公式也是根据截面长宽比的不同,由圆钢管

或平板承载力的计算公式得到的。

### 3.2 轴压性能

#### 3.2.1 弹性屈曲

椭圆钢管在轴向荷载作用下的弹性屈曲性能主要取决于截面的长宽比  $a/b$  和相对厚度  $t/(2a)$ 。文献[5]中的研究表明, Kempner 提出的用半径等于椭圆钢管最大曲率半径的圆钢管的弹性屈曲荷载, 作为椭圆钢管的弹性屈曲荷载是可行的。但是随后的研究表明, 对于很多截面, 这种方法过于保守, 不适于直接计算椭圆钢管的屈曲荷载。

Silvestre<sup>[30]</sup> 采用广义梁理论分析了非圆钢管的弹性屈曲, 然后引入椭圆钢管截面的长宽比, 拓展到椭圆钢管, 分析了椭圆钢管的弹性屈曲行为, 得到了椭圆钢管不同的屈曲模态。椭圆钢管的屈曲模态可分为 2 类: 壳局部屈曲模态和壳屈曲模态。当椭圆钢管长度较小时, 发生壳局部屈曲, 表现为管的横向变形。当椭圆钢管长度较大时, 发生壳屈曲。壳屈曲模态又可分为 2 类: 整体屈曲模态和畸变屈曲模态, 整体屈曲表现为绕主轴的弯曲变形, 截面形状不发生变化; 畸变屈曲既有绕主轴的弯曲变形, 又有截面形状的变化。

#### 3.2.2 弹塑性破坏

一般钢构件丧失稳定承载力时已经进入弹塑性阶段, 所以, 更需要研究椭圆钢管弹塑性稳定承载力, 文献[18]中进行了这方面的理论与有限元分析工作。

由于椭圆钢管的轴压性能介于圆钢管和平板之间, 所以文献[18]中以圆钢管和平板的塑性破坏模式为背景, 进一步分析了椭圆钢管的塑性破坏模式。根据已有研究, 平板常见的塑性破坏模式为 flip-disc 破坏模式和 roof-type 破坏模式, 受压圆钢管常见的局部塑性模式为 elephant-foot 破坏模式和 Yoshimura 破坏模式。

文献[18]中采用有限元软件 ABAQUS 建立了一批椭圆钢管模型, 分析了椭圆钢管在轴压力作用下的塑性破坏特性。当初始缺陷程度较小时, 得到了类似平板破坏的 flip-disc 破坏模式和 split-flip-disc 破坏模式以及类似于圆钢管破坏的 elephant-foot 破坏模式; 当初始缺陷程度较大时, 可以得到类似于圆钢管破坏的 Yoshimura 破坏模式。通过试验和有限元分析发现, split-flip-disc 破坏模式是最常出现的塑性破坏模式。文献[18]在有限元分析中得到的椭圆钢管的各种塑性破坏模式如图 3 所示。

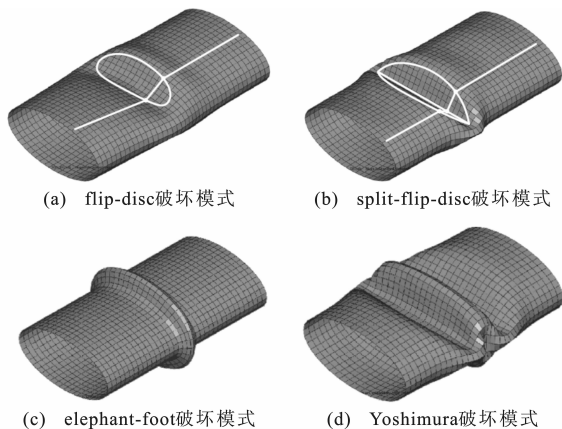


图 3 椭圆钢管的塑性破坏模式

Fig. 3 Plastic Collapse Modes of EHS

#### 3.2.3 截面分类

大多数钢结构设计规范, 包括欧洲规范 EN 1993-1-1:2006<sup>[31]</sup> (以下简称 Eurocode 3) 在内, 根据截面抵抗局部屈曲的能力, 把截面分为 4 类, 分别命名为第 1~4 类截面, 椭圆钢管截面也可采用此分类方法。文献[16]中通过试验研究和有限元分析, 根据椭圆钢管是否在材料弹性阶段出现局部屈曲, 进一步把椭圆钢管截面分为 2 类: ①能达到材料的屈服荷载而不发生局部屈曲的截面为第 1~3 类截面; ②由于板件宽厚比大而在达到屈服荷载前发生局部屈曲的为第 4 类截面, 第 4 类截面通过采用有效面积代替截面面积来考虑局部屈曲对承载力的影响。各类截面的承载力  $N_{c,Rd}$  可由下式计算得到

$$N_{c,Rd} = \begin{cases} A f_y / \gamma_{M0} & \text{第 1~3 类截面} \\ A_{eff} f_y / \gamma_{M0} & \text{第 4 类截面} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $A_{eff}$  为有效截面面积;  $f_y$  为材料屈服强度;  $\gamma_{M0}$  为截面抗力分项系数, 通常取 1。

由分析可知, 截面分类取决于板件宽厚比。对椭圆钢管, 截面管壁的宽厚比由截面径厚比来表示。对于仅受轴压作用的椭圆钢管, 截面径厚比可由下式计算

$$\frac{D_e}{t\epsilon^2} = 2 \frac{a^2/b}{t\epsilon^2} \quad (8)$$

式中:  $D_e$  为截面等效直径, 可取椭圆钢管周长上首先发生局部屈曲的点的直径, 该点一般为最大曲率半径的点, 可近似取  $D_e = a^2/b$ ;  $\epsilon$  为用于考虑不同钢材屈服强度差异的参数,  $\epsilon^2 = 235/f_y$ 。

图 4 中给出了文献[16]中有关椭圆钢管轴压试验的极限荷载与截面径厚比的关系, 其中,  $F_u$  为轴压试验极限荷载,  $F_y$  为屈服荷载。作为比较, 已有的部分圆钢管轴压试验的数据也列在了图 4 中。

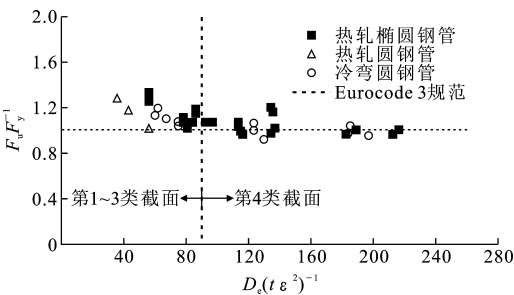


图 4 轴压承载力与截面径厚比的关系

Fig. 4 Relation of Axial Compression Capacity and Radius-thickness Ratio of Cross Section

Eurocode 3 中规定,圆钢管第 3 类截面径厚的上限值为 90。从图 4 可以看出,根据式(8)对于椭圆钢管截面径厚的定义,椭圆钢管第 3 类截面的上限值也可以偏保守地取 90。英国规范 BS 5950-1:2000<sup>[32]</sup> 及美国规范 ANSI/AISC 360-05:2005<sup>[33]</sup> 中给出的等效半紧凑截面与非紧凑截面径厚的限值为 94,澳大利亚规范 AS 4100:1998<sup>[34]</sup> 中给出的相应的径厚比限值为 87,均与式(8)给出的椭圆钢管截面径厚的限值相近。

3.3 压弯性能

2011 年,文献[23]中进行了椭圆钢管在偏心荷载作用下的试验研究及有限元分析,共进行 12 个截面长宽比为 2 的试件受压试验,包括 4 个轴压短柱试验及 8 个偏压短柱试验,偏压短柱试验绕长轴弯曲和绕短轴弯曲各有 4 个。试验结果表明,4 个轴压短柱发生了局部屈曲破坏,其中管壁较薄的试件和管壁较厚的试件分别呈现弹性屈曲和弹塑性屈曲。相比轴压柱,当压弯柱的荷载偏心距为 25 mm 时,极限荷载变化不大,甚至有所提高,而当偏心距增大到 75 mm 时,极限荷载显著降低,且绕长轴弯曲时下降的幅度大于绕短轴弯曲。文献[16]中提出了椭圆钢管压弯作用下的等效直径及截面径厚比的限值。

绕长轴弯曲的压弯椭圆钢管的等效直径  $D_{e,mi}$  按下式计算

$$D_{e,mi}=2a^2/b \tag{9}$$

绕短轴弯曲的压弯椭圆钢管的等效直径  $D_{e,ma}$  分弹性和弹塑性 2 种情况,并按下式计算:

当截面保持弹性时

$$D_{e,ma}=D_{e,b}+(D_{e,c}-D_{e,b})(\Psi+1)/2 \tag{10}$$

式中: $D_{e,b}$  为椭圆钢管纯弯作用下的等效直径; $D_{e,c}$  为椭圆钢管轴压作用下的等效直径; $\Psi$  为椭圆钢管压弯作用下的边缘应力比。

当截面进入弹塑性时

$$D_{e,ma}=D_{e,b}+(D_{e,c}-D_{e,b})(2\alpha-1) \tag{11}$$

式中: $\alpha$  为截面受压区高度与截面整个高度的比值。

按照椭圆钢管截面抵抗局部屈曲的能力,可以划分为 4 类截面,分别命名为第 1~4 类截面。文献[23]中根据试验得出了各椭圆钢管的应力-径厚比关系曲线,提出了压弯荷载作用下不同类型截面的径厚比限值,如表 1 所示。

表 1 压弯荷载作用下各类截面径厚比限值

Tab. 1 Limit Values of Radius-thickness Ratios of Cross Sections Under Combined Compression and Bending Load	
截面类型	径厚比限值
第 1 类	$D_e/(t\epsilon^2)\leq 50\epsilon^2$
第 2 类	$50\epsilon^2 < D_e/(t\epsilon^2) \leq 70\epsilon^2$
第 3 类	$70\epsilon^2 < D_e/(t\epsilon^2) \leq 2\,520\epsilon^2/(5\Psi+23)$
第 4 类	$D_e/(t\epsilon^2) > 2\,520\epsilon^2/(5\Psi+23)$

4 结 语

(1)目前,椭圆钢管在结构上的应用和研究成果主要出现在欧洲,但还处于初始阶段,主要的研究是椭圆钢管构件层面的静力性能问题。未来若干年椭圆钢管柱静力性能将得到更加深入系统的研究。与此同时,研究将拓展到椭圆钢管与椭圆钢管的连接节点、椭圆钢管与工字形钢截面的连接节点、椭圆钢管混凝土柱及其连接节点、椭圆钢管桁架及其连接节点等方面的静力性能,以及椭圆钢管与鹅卵形管(OHS)性能异同性的比较,并进一步拓展到抗震滞回性能与高周疲劳性能,研究成果也将在一些设计规范中体现。

(2)随着研究的深入和设计规范的形成,建筑美观和结构效率高的椭圆钢管在工程中的应用将日趋增多,同时带动椭圆钢管制造业的发展,促进椭圆钢管制造工艺的改进和技术水平的提高以及椭圆钢管截面规格的增多。

(3)中国土木建筑工程历来追求建筑与结构的互补、赏心悦目的视觉效果,椭圆钢管必将具有潜在的应用需求,因此,中国工业界开发生产椭圆钢管,研究机构和设计院开展椭圆钢管结构性能和技术标准的研究具有现实意义和应用价值。

参考文献:

References:

[1] WARDENIER J. Hollow Sections in Structural Applications[R]. Paris: CIDECT, 2002.

[2] EN 10210-1:2006, Hot Finished Structural Hollow

- Sections of Non-alloy and Fine Grain Steel—Part 1; Technical Delivery Conditions[S].
- [3] EN 10210-2; 2006, Hot Finished Structural Hollow Sections of Non-alloy and Fine Grain Steel—Part 2; Tolerances, Dimensions and Sectional Properties[S].
- [4] ZHAO X L, PACKER J A. Tests and Design of Concrete-filled Elliptical Hollow Section Stub Columns[J]. *Thin-walled Structures*, 2009, 47(6/7): 617-628.
- [5] RUIZ-TERAN A M, GARDNER L. Elastic Buckling of Elliptical Tubes[J]. *Thin-walled Structures*, 2008, 46(11): 1304-1318.
- [6] PACKER J A. Going Elliptical[J]. *Modern Steel Construction*, 2008, 48(3): 65-67.
- [7] MARGUERRE K. Stability of the Cylindrical Shell of Variable Curvature [R]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1951.
- [8] KEMPNER J. Some Results on Buckling and Post-buckling of Cylindrical Shells [R]. Brooklyn: Polytechnic Institute of Brooklyn, 1962.
- [9] KEMPNER J, CHEN Y N. Large Deflections of an Axially Compressed Oval Cylindrical Shell [C]// GORTLER H. Proceedings of the 11th International Congress of Applied Mechanics. Berlin: Springer, 1966: 299-305.
- [10] KEMPNER J, CHEN Y N. Buckling and Post-buckling of an Axially Compressed Oval Cylindrical Shell [R]. Brooklyn: Polytechnic Institute of Brooklyn, 1966.
- [11] HUTCHINSON J W. Buckling and Initial Postbuckling Behavior of Oval Cylindrical Shells Under Axial Compression [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35(1): 66-72.
- [12] FEINSTEIN G, CHEN Y N, KEMPNER J. Buckling of Clamped Oval Cylindrical Shells Under Axial Loads[J]. *AIAA Journal*, 1971, 9(9): 1733-1738.
- [13] TENNYSON R C, BOOTON M, CASWELL R D. Buckling of Imperfect Elliptical Cylindrical Shells Under Axial Compression[J]. *AIAA Journal*, 1971, 9(2): 250-255.
- [14] TVERGAARD V. Buckling of Elastic-plastic Oval Cylindrical Shells Under Axial Compression[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1976, 12(9/10): 683-691.
- [15] CHAN T M, GARDNER L. Compressive Resistance of Hot-rolled Elliptical Hollow Sections [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(2): 522-532.
- [16] GARDNER L, CHAN T M. Cross-section Classification of Elliptical Hollow Sections[J]. *Steel and Composite Structures*, 2007, 7(3): 185-200.
- [17] SILVESTRE N, GARDNER L. Elastic Local Postbuckling of Elliptical Tubes[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(3): 281-292.
- [18] INSAUSTI A, GARDNER L. Analytical Modeling of Plastic Collapse in Compressed Elliptical Hollow Sections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(4): 678-689.
- [19] ZHU Y, WILKINSON T. Finite Element Analysis of Structural Steel Elliptical Hollow Section in Pure Compression [C]// PACKER J A, WILLIBALD S. *Tubular Structures XI*. London: Taylor & Francis, 2006: 179-186.
- [20] CHAN T M, GARDNER L. Bending Strength of Hot-rolled Elliptical Hollow Sections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(9): 971-986.
- [21] CHAN T M, GARDNER L. Flexural Buckling of Elliptical Hollow Section Columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(5): 546-557.
- [22] LAW K H, GARDNER L. Lateral Instability of Elliptical Hollow Section Beams[J]. *Engineering Structures*, 2012, 37: 152-166.
- [23] GARDNER L, CHAN T M, ABELA J M. Structural Behavior of Elliptical Hollow Sections Under Combined Compression and Uniaxial Bending [J]. *Advanced Steel Structures*, 2011, 7(3): 185-200.
- [24] ABELA J M, GARDNER L. Elastic Buckling of Elliptical Hollow Sections Under Linearly Varying In-Plane Stress Distributions [C]// GARDNER L. *Tubular Structures XIV*. London: Taylor & Francis, 2012: 297-303.
- [25] LAW K H, GARDNER L. Elliptical Hollow Section Beam-column [C]// GARDNER L. *Tubular Structures XIV*. London: Taylor & Francis, 2012: 305-312.
- [26] LAM D, DAI X H. Finite Element Modeling of Beam to Concrete Filled Elliptical Steel Column Connection [C]// GARDNER L. *Tubular Structures XIV*. London: Taylor & Francis, 2012: 289-296.
- [27] SHEN W, CHOO Y S, WARDENIER J, et al. Axially Loaded Elliptical Hollow Section X Joints, Part I: Experiments and Numerical Calibration [C]// GARDNER L. *Tubular Structures XIV*. London: Taylor & Francis, 2012: 257-264.
- [28] SHEN W, WARDENIER J, PACKER J A, et al. Axially Loaded Elliptical Hollow Section X Joints, Part II: Results and Analysis [C]// GARDNER L. *Tubular Structures XIV*. London: Taylor & Francis, 2012: 265-281.

- [10] TOBIAS D H, ANDERSON R E, HODEL C E, et al. Overview of Earthquake Resisting System Design and Retrofit Strategy for Bridges in Illinois[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(3): 147-157.
- [11] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]. JTJ/T B02-01—2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S].
- [12] 王克海, 李刚, 韦韩, 等. 关于抗震设计规范与地震动区划图的有关探讨[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(4): 413-420.  
WANG Ke-hai, LI Gang, WEI Han, et al. Study on Seismic Design Code and Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(4): 413-420.
- [13] 王克海, 李悦, 颜文晖, 等. 关于在基础设施抗震规范中规定最低设防要求的一点建议[J]. 震灾防御技术, 2012, 7(2): 137-143.  
WANG Ke-hai, LI Yue, YEN W P, et al. Suggestion of Adding Foundational Seismic Fortification Criterion in Seismic Specification of Infrastructure[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2012, 7(2): 137-143.
- [14] 谢礼立, 马玉宏, 翟长海. 基于性态的抗震设防与设计地震动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
XIE Li-li, MA Yu-hong, ZHAI Chang-hai. Performance-based Seismic Design and Design Ground Motion[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] 许金良, 贾兴利, 杨宏志. 公路震害空间数据库的设计[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(5): 29-33.  
XU Jin-liang, JIA Xing-li, YANG Hong-zhi. Design of Spatial Database on Earthquake Disaster for Highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(5): 29-33.
- [16] 刘鸣, 陆本燕, 刘伯权. 钢筋混凝土桥墩破坏模式识别方法[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3): 58-63, 79.  
LIU Ming, LU Ben-yan, LIU Bo-quan. Failure Mode Identification Method of Reinforced Concrete Bridge Pier[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3): 58-63, 79.
- [17] 尚维波, 张春宁. 高墩刚构桥系梁抗震分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 62-65.  
SHANG Wei-bo, ZHANG Chun-ning. Seismic Analysis of Tie Beam of Rigid Frame Bridge with High Pier[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(1): 62-65.
- [18] 刘健新, 张伟, 张茜. 洛河特大桥抗震性能计算[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 57-62.  
LIU Jian-xin, ZHANG Wei, ZHANG Qian. Anti-Seismic Performance Calculation of Luohe Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 57-62.
- [19] 赵珺, 牛涛涛. 大跨径在役桥梁随机地震动模拟方法[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(1): 27-35.  
ZHAO Jun, NIU Di-tao. Simulation Method of Random Ground Motion for Large-span Bridge in Service[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(1): 27-35.
- [20] 王克海, 韦韩, 李茜. 双层组合抗震挡块: 中国, CN201952721 U[P]. 2011-08-31.  
WANG Ke-hai, WEI Han, LI Qian. Seismic Double-layer Stopper: China, CN201952721 U[P]. 2011-08-31.
- [21] 王克海, 韦韩, 李茜. 双层钢筋混凝土抗震挡块: 中国, CN201952720 U[P]. 2011-08-31.  
WANG Ke-hai, WEI Han, LI Qian. Seismic Double-concrete-layer Stopper: China, CN201952720 U[P]. 2011-08-31.
- [22] 王克海, 韦韩, 李茜. 双层钢板抗震挡块: 中国, CN201952722 U[P]. 2011-08-31.  
WANG Ke-hai, WEI Han, LI Qian. Seismic Double-steel-layer Stopper: China, CN201952722 U[P]. 2011-08-31.

(上接第 81 页)

- [29] ALMKVIST G, BERNDT B. Gauss, Landen, Ramanujan, the Arithmetic-geometric Mean, Ellipses,  $\pi$ , and the Ladies Diary[J]. The American Mathematical Monthly, 1988, 95(7): 585-608.
- [30] SILVESTRE N. Buckling Behavior of Elliptical Cylindrical Shells and Tubes Under Compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(16): 4427-4447.
- [31] EN 1993-1-1: 2006, Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3: General Rules—Supplementary Rules for Cold-formed Members and Sheeting[S].
- [32] BS 5950-1: 2000, Structural Use of Steelwork in Building. Part 1: Code of Practice for Design-rolled and Welded Sections[S].
- [33] ANSI/AISC 360-05: 2005, Specification for Structural Steel Buildings[S].
- [34] AS 4100: 1998, Steel Structures[S].