DOI:10.11918/201908076

仿竹设计在高耸薄壁脱硫塔结构中的应用

王希慧[1,2], 宋 波[1,2],徐明磊[3]

(1.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;2.强震区轨道交通工程抗震研究北京市国际科技合作基地, 北京 100083;3.北京国电龙源环保工程有限公司,北京 100039)

摘 要: 为提高钢制脱硫塔结构的稳定性,从结构特征与受力性能关系角度阐明了竹子结构抗倒塌机制,并将其应用于钢制脱硫塔结构的仿竹设计,通过缩尺模型振动台试验,考察了仿竹型脱硫塔的抗震性能.根据刚度渐变的原则,提出脱硫塔截面的分段变壁厚设计方法,使仿竹型脱硫塔与竹身截面刚度变化趋势一致;通过特征值屈曲分析方法对加劲肋的设置进行了探讨,加劲肋可明显改善结构屈曲模态,加劲肋间距以4 m作为基数较为合理.试验表明,仿竹型脱硫塔在7、8度地震作用下塔体的最大位移及应力均未超过规范最大允许值,结构处于弹性状态,未发生破坏;在9度地震作用下,塔体的最大应力超过工作温度下材料许用应力,同时塔体产生局部轻度弯曲,但仍未倒塌.

关键词: 高耸薄壁;钢制脱硫塔;仿竹设计;振动台试验;抗震性能

中图分类号: TU317 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)08-0055-07

Application of imitation bamboo design in high-rise thin-walled desulfurization tower structures

WANG Xihui[1,2], SONG Bo[1,2], XU Minglei[3]

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology-Aseismic Research of the Rail Transit Engineering in the Strong Motion Area, Beijing 100083, China; 3. Beijing Guodian Longyuan Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: To improve the stability of steel desulfurization tower, the anti-collapse mechanism of bamboo structure was clarified considering the relationship between structural characteristics and mechanical behavior, and it was applied to the imitation bamboo design of steel desulfurization tower structures. The seismic performance of bamboo-like desulfurization tower was analyzed by scale model shaking table tests. Based on the principle of stiffness gradual change, a design method of sectional variable wall thickness for desulfurization tower was proposed to ensure that the changing trend of section stiffness of bamboo-like desulfurization tower was consistent with that of the bamboo body. Stiffener setting was discussed through the eigenvalue buckling method. Stiffener could improve the buckling mode of the structure distinctly, and it is reasonable to set the stiffener spacing of 4 m as the base number. Test results show that the maximum displacement and stress of the structure did not exceed the allowable value under the action of 7 or 8-degree earthquake. The structure was in an elastic state without damage. Under the action of 9-degree earthquake, the maximum stress of the tower exceeded the material allowable stress at working temperature, and local mild bending occurred on the tower, but the structure still did not collapse.

Keywords: high-rise thin-walled; steel desulfurization tower; imitation bamboo design; shaking table test; seismic performance

发电厂中采用的钢制脱硫塔属于典型的高耸薄壁结构,近年来随着环保力度的增大,脱硫工艺逐步改进,促使结构高度不断提升,同时塔体顶部有质量较大的除尘设备,底部进烟口的存在也削弱了刚度,导致结构在地震作用下极易发生倒塌破坏.同为高耸薄壁的竹子在外界荷载作用下即使产生较大位移也不易倒塌,说明竹结构具有优越的力学性能[1],为了提高钢制脱硫塔结构的稳定性,可参照竹结构进行仿生设计.在仿竹设计方面,付为刚等[2]仿照竹子的结构特点,提出合理的加劲肋布置方法.贺拥军等[3]将竹子结构仿生概念应用于立体车库结构设计,提出等稳等侧移的仿竹原则,使结构的抗侧刚度与层间位移得到明显改善.

钢制脱硫塔由于高耸薄壁的特点,容易发生屈曲破坏[4].Pham等[5]基于经典壳理论对薄壁圆柱壳进行建模,得到壳体临界屈曲载荷.宋波等[6]采用数值方法研究了带有矩形开孔薄壁圆柱壳在轴压

收稿日期: 2019-08-15
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0205003)
作者简介: 王希慧(1990—),男,博士研究生;
宋 波(1962—),男,教授,博士生导师
通信作者: 宋 波,songbocesustb@126.com

作用下的屈曲性能,分析表明径厚比是影响圆柱壳轴压稳定性的主要因素,临界屈曲荷载随径厚比的增大迅速下降. 牛奔[7]在对薄壁加劲钢管受弯性能进行大量参数分析的基础上,提出加劲塔筒的设计建议,为工程设计提供一定的参考. 宋波等[8]对钢制脱硫塔结构的抗震性能进行了系统研究,并分析了地震波类型、输入角度和内部浆液高度对结构动力响应的影响.

本文从竹子结构特征与受力性能关系的角度阐明了竹结构的抗倒塌机制,并将其应用于高耸薄壁钢制脱硫塔结构仿竹设计,通过缩尺模型振动台试验,考察了仿竹型脱硫塔结构的抗震性能.

1 竹子结构特征与受力性能分析

1.1 竹子结构特征分析

竹子是天然的高耸结构,其主要的结构特征是沿高度方向直径和壁厚是变化的,并且沿竹身高度方向每隔一段距离都有竹节的存在,见图 1.

图 1 竹子结构

Fig. 1 Bamboo structure

通过对多组具有代表性的竹子结构几何参数进行实测与文献对比[1],得出竹身直径、壁厚和竹节间距的平均值沿高度方向的变化,见图 2. 基于最小二乘法原理回归分析得出各参数在任意高度的计算式:

$$D(x) = -0.007x + 0.074\ 1, \tag{1}$$

$$t(x) = -0.000\ 7x + 0.008\ 6, \tag{2}$$

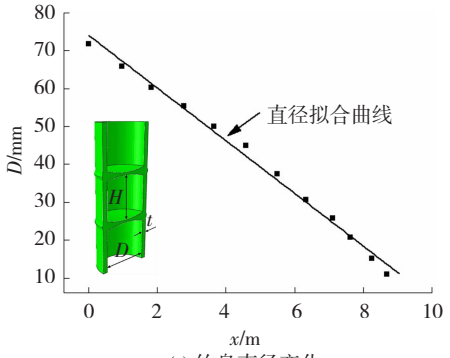
$$H(x) = -0.008\ 4x^2 + 0.083\ 7x + 0.101\ 1. \tag{3}$$

式中:D 为竹子直径,t 为壁厚,H 为竹节间距,x 为高度,单位均为 m.

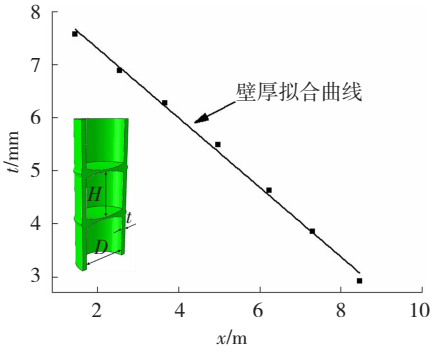
1.2 竹身截面刚度分析

本文主要是参照竹子的几何结构进行仿生设计,因此忽略其材料属性的影响,假设竹身为均质材料,根据 1.1 节竹身截面尺寸的变化规律,竹身可简化为变壁厚圆锥壳计算模型,见图 3.

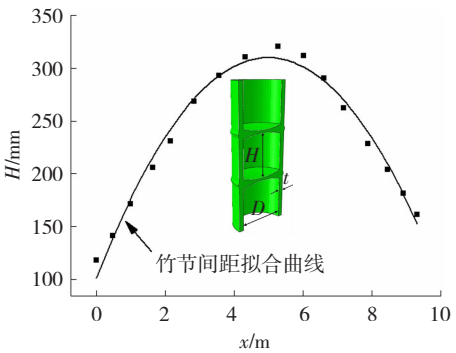
由材料力学推导出任意高度 x 处竹身截面抗弯刚度 S(未考虑竹节影响):



(a) 竹身直径变化



(b) 竹身壁厚变化



(c) 竹节间距变化

图 2 竹子结构几何特性

Fig. 2 Geometric characteristics of bamboo structure

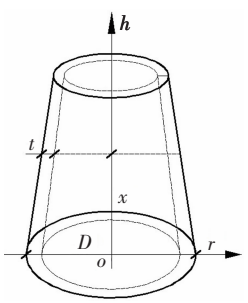


图 3 计算模型

Fig. 3 Computational model

$$S = \frac{E\pi}{64}\{D^4(x) - [D(x) - 2 \times t(x)]^4\}, \tag{4}$$

$$S = \frac{Ex}{8}[D^3(x)t(x) - 3D^2(x)t^2(x) + 4D(x)t^3(x) - 2t^4(x)]. \tag{5}$$

式中:E 为材料的弹性模量. 忽略竹子材料特性的影响,假定与钢材一致,将式(1)、(2)代入式(5),可得竹身截面抗弯刚度沿高度变化规律,见图 4.

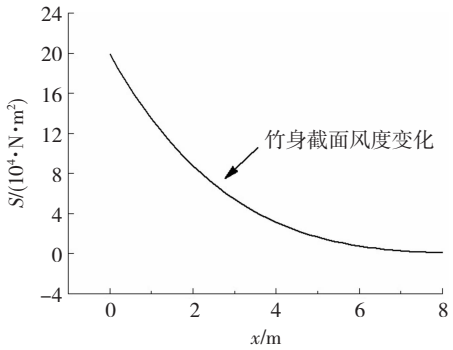


图 4　竹身沿高度方向刚度变化

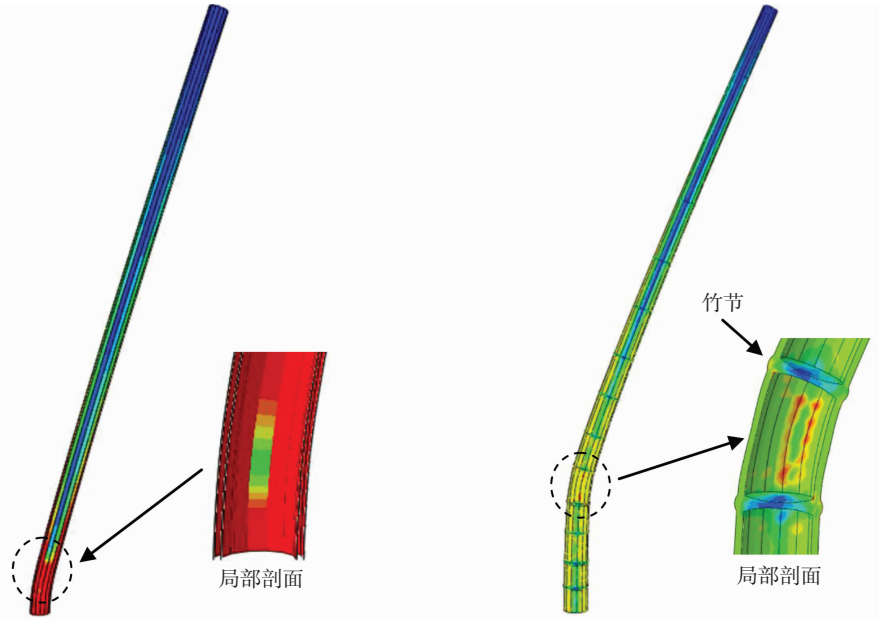
Fig. 4　Variation of section stiffness of bamboo along height direction

从图 4 可看出,竹身截面抗弯面刚度总体上沿着高度方向递减,越靠近顶部刚度变化率越小. 竹身在外部水平荷载作用下产生的弯矩沿高度方向也是逐渐减小,所以说竹子构造特征极其符合力学原理.

1.3　竹结构倾覆破坏分析

根据 1.1 节得出的竹子各部位几何参数之间的相互关系,建立竹子结构数值分析模型(有竹节),外壁采用壳单元,竹节采用实体单元,材料采用与脱硫塔一致的 Q235,模型底部完全固结,同时按照材料用量相等的原则,建立相同高度的普通等截面圆柱壳(无竹节)作为对比. 采用 Pushover 方法对两模型进行推覆分析,对比两者的倾覆破坏情况,见图 5.

从图 5 可看出,在水平荷载作用下,竹子结构整体应力分布比较均匀,普通结构在根部产生应力集中,竹节中部位置应力远小于竹节边缘部位的应力,说明竹节边缘部位主要参与受力,所以竹节可看作加劲环,竹子结构塑性铰发生在两竹节中间位置,而不是在竹节部位,说明竹节的存在起到了加固作用,提高了局部稳定性.



(a) 普通结构　　(b) 仿竹结构

图 5　倾覆破坏应力云图

Fig. 5　Overturning failure stress nephogram

采用通用屈服弯矩法确定两模型的极限荷载 P_m、屈服荷载 P_y、屈服位移 δ_y、极限荷载 P_μ、和极限位移 δ_μ(曲线下降段 0.85 倍峰值荷载对应的位移)[9],见图 6. 从图 6 可看出,在位移较小的情况下,竹子结构与普通结构曲线比较接近,在进入塑性状态后,竹子结构在承载力与延性方面的优势逐渐凸显出来,结构的位移延性系数为

$$\mu = \frac{\delta_\mu}{\delta_y}, \tag{6}$$

式中:μ 为位移延性系数,δ_μ 为极限位移,δ_y 为屈服位移. 通过式(6)得出竹子结构的延性系数为 4.0,普通结构的延性系数为 2.3. 综上所述,对于质量等效的竹子结构与普通结构,仿竹型结构不但极限承载力高,而且延性系数也大大提高,所以说仿竹型结构在抵抗大变形方面具有很大的潜力.

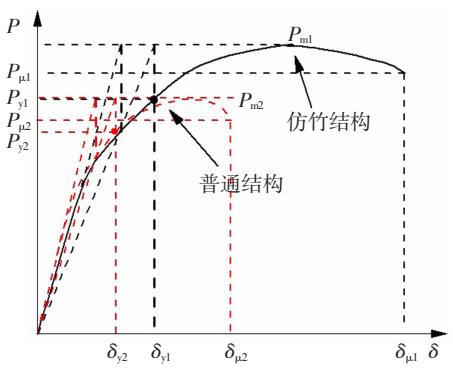


图 6　通用屈服弯矩法确定 *p-δ*

Fig. 6　*p-δ* determined by general yield moment method

2　钢制脱硫塔仿竹设计

2.1　塔体截面设计

以某电厂典型钢制脱硫塔结构为背景，见图 7. 塔身材料类型为 Q235，密度为 7 850 kg/m^3，泊松比为 0.3，弹性模量为 2.06×10^{11} Pa，底部筒体段半径 $r=9.7$ m，塔体总高度为 74 m，场地类别为Ⅱ类场地，抗震设防烈度为 6 度.

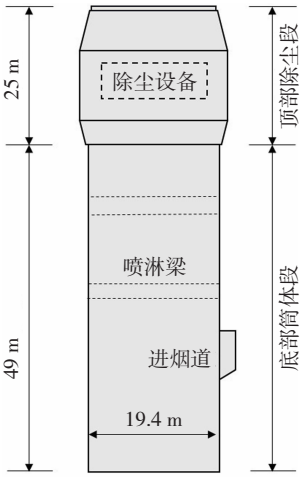


图 7 脱硫塔结构示意

Fig. 7　Schematic of desulfurization tower structure

受脱硫塔内部设备的限制，脱硫塔的截面直径不能同竹身一样变化幅度较大，根据图 4 竹身的刚度变化规律，基于刚度渐变的原则，脱硫塔壁厚由从底部往顶部壁厚逐渐减小，可通过分段变壁厚来调整刚度，通过式(5)可得到仿竹脱硫塔结构沿高度方向截面抗弯刚度变化，见图 8. 对比图 4 与图 8 可以看出，仿竹型脱硫塔截面刚度变化趋势与竹身截面刚度变化趋势是一致的，沿高度方向递减.

2.2　加劲肋设置

根据竹节分布特点，同时结合脱硫塔结构的实际情况，在脱硫塔外部设置环向加劲肋，通过特征值屈曲分析方法[6]，研究加劲肋间距对塔体稳定性的

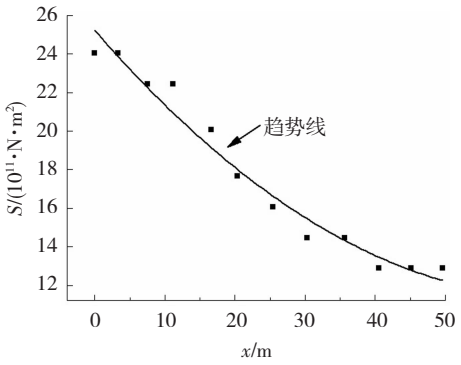


图 8　仿竹型脱硫塔截面刚度变化

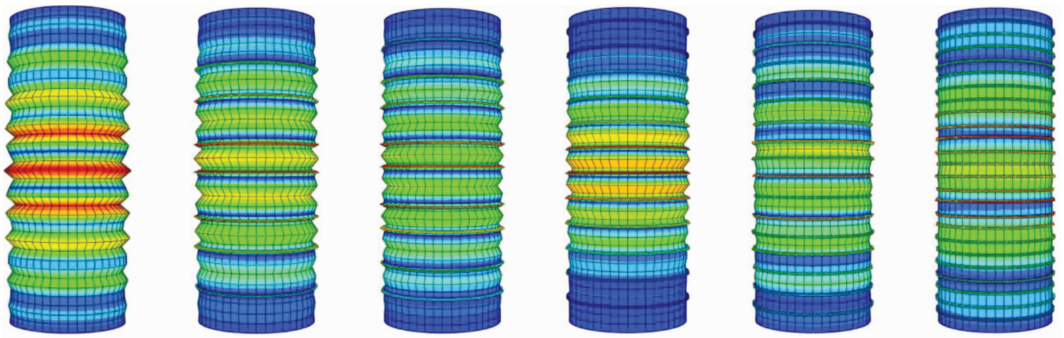
Fig. 8　Variation of section stiffness of bamboo-like desulfurization tower

影响，并对加劲肋间距的合理布置方法进行探究. 结构的加强或减弱可以从结构的应力刚度矩阵反应出来，对结构进行特征值屈曲分析时，通常取结构的一阶屈曲特征值作为荷载系数. 加劲肋主要应用于塔体下部的筒体部分，为了尽量减小其他因素的影响，统一采用 T 型加劲肋，加劲肋间距分别取 2、3、4、5 和 6 m. 利用 ABAQUS 有限元软件建立不同加劲肋间距的筒体有限元分析模型，并设置无加劲肋情况作为对比，单元类型采用适用于薄壁结构的壳单元，模型底部固结，在顶部分别施加轴向与水平向荷载，分别提取不同加劲肋间距数值模型的一阶屈曲模态见图 9、10.

从图 9 可看出，轴向荷载作用下，当无加劲肋时，塔体变形较大，发生灯笼式屈曲破坏，随着加劲肋间距的减小，塔体变形降低明显，稳定性大大提高. 从图 10 可看出，水平荷载作用下，当无加劲肋时，塔体发生整体的径向屈曲，当设置加劲肋后，主要在底部受压侧发生局部屈曲，加劲肋间距越小，结构的整体性越好.

为了便于比较，通过无量纲化处理，定义临界屈曲荷载增大系数 δ：

$$\delta=\frac{P_s}{P_0},\tag{7}$$



(a) 无加劲肋　(b) 6 m 间距　(c) 5 m 间距　(d) 4 m 间距　(e) 3 m 间距　(f) 2 m 间距

图 9　轴向荷载作用下不同间距加劲肋筒体屈曲模态

Fig. 9　Buckling modes of models with different stiffening spacing under axial load

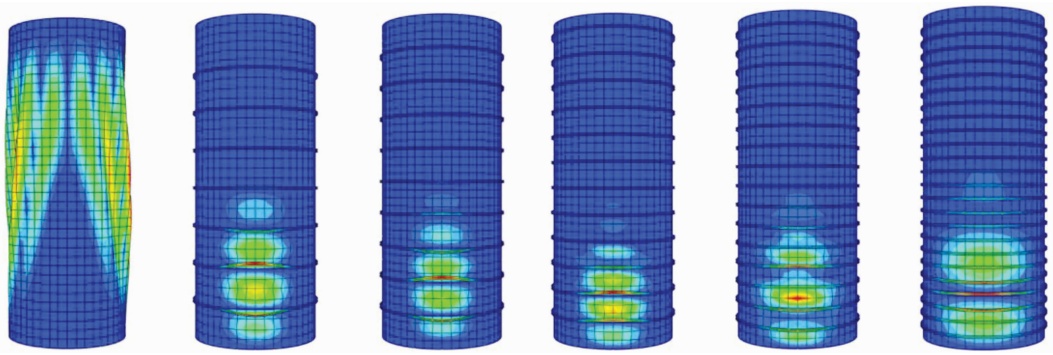


图 10　水平荷载作用下不同间距加劲肋筒体屈曲模态(受压侧)

Fig. 10　Buckling modes of models with different stiffening spacing under horizontal load (compressed side)

式中:δ 为临界屈曲荷载增大系数,P_s 为有加劲肋筒体临界屈曲荷载,P_0 为无加劲肋筒体临界屈曲荷载. 提取各模型在轴向与水平荷载作用下临界屈曲荷载,并根据式(7)计算水平向与轴向临界屈曲荷载增大系数随间距的变化曲线,见图 11. 从图 11 可看出,轴向临界屈曲荷载增大系数曲线始终位于水平向临界屈曲荷载增大系数曲线的下方,说明环向加劲肋对该类薄壁圆柱壳抗弯屈曲承载力的提高贡献较大.

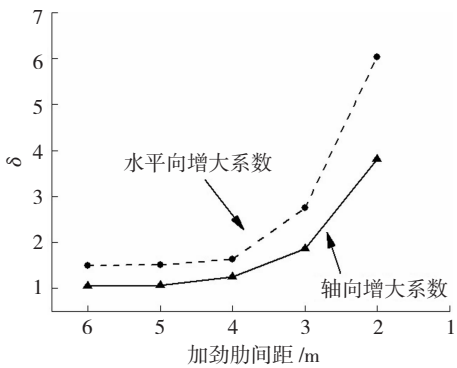


图 11　临界屈曲荷载增大系数

Fig. 11　Increasing coefficient of critical buckling load

从临界屈曲荷载的变化趋势来看,无论是轴向还是水平向屈曲荷载都随着加劲肋间距的减小而增大,当加劲肋间距大于 4 m 时,屈曲荷载随着加劲肋间距的减小增长较慢;当加劲肋间距小于 4 m 时,屈曲荷载随着加劲肋间距的减小增长较快,因此,综合考虑安全性与经济性,该类脱硫塔以 4 m 作为基数,塔体底部适当减小加劲肋间距,顶部适当增大加劲肋间距,根据各部分的受力情况自动调整最为合理.

3　仿竹型脱硫塔振动台试验

目前,对于该类脱硫塔结构的设计主要依赖于工程经验,缺乏必要的理论指导和适用的规范. 因此,对于仿竹型脱硫塔结构而言,开展模型试验可以预测结构在地震中的安全性能,判定结构的合理性.

3.1　模型设计与固定

试验依托 ES-15 液压振动台进行,为了最大化的提高相似比[10-11],结合振动台的台面尺寸,模型几何相似系数定为 1/20,模型整体高度为 3.75 m. 模型采用与实际结构力学性能一致的不锈钢材料,即可认为模型与原型的材料无量纲系数相等,试验模型见图 12. 在模型底部设置底座,底座与塔体焊接,然后将模型底座与振动台通过螺栓连接,螺栓参数为 M16 ×8.

图 12　试验模型

Fig. 12　Test model

3.2　数据采集与地震波调整

主要数据采集传感装置有压电式加速度传感器、应变片和拉线式位移计,32 通道数据采集系统和振动测试分析系统. 在试验模型不同高度处布置加速度传感器、应变片和位移计,采集结构在地震动作用下的动力响应,传感器固定见图 13.

选取适用于Ⅱ类场地的 El-Centro 地震波进行加载[12],El-Centro 地震波一面具有对低频结构影响较大的特点,另一方面具有加速度反应谱卓越周期短的特点[8]. 根据《建筑工程抗震设防分类标准》[13]规定,脱硫塔结构属于电力生产建筑,属于重点设防类,该类结构的抗震措施应比本地区抗震设

防烈度高一度考虑,因此调整地震波的加速度峰值分别为 220、400 和 620 cm/s^2,对应实际地震烈度为 7 度、8 度和 9 度[14].

(a) 加速度传感器 (b) 应变片

图 13 传感器固定

Fig. 13 Sensor fixing

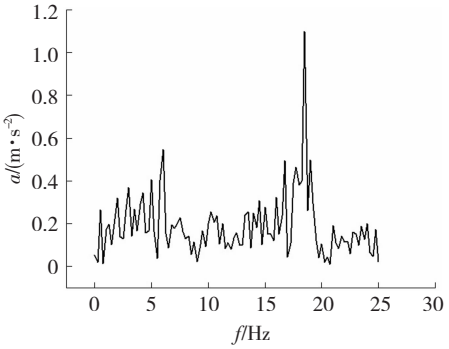


图 14 自振频谱曲线

Fig. 14 Natural vibration spectrum curve

4 试验结果与分析

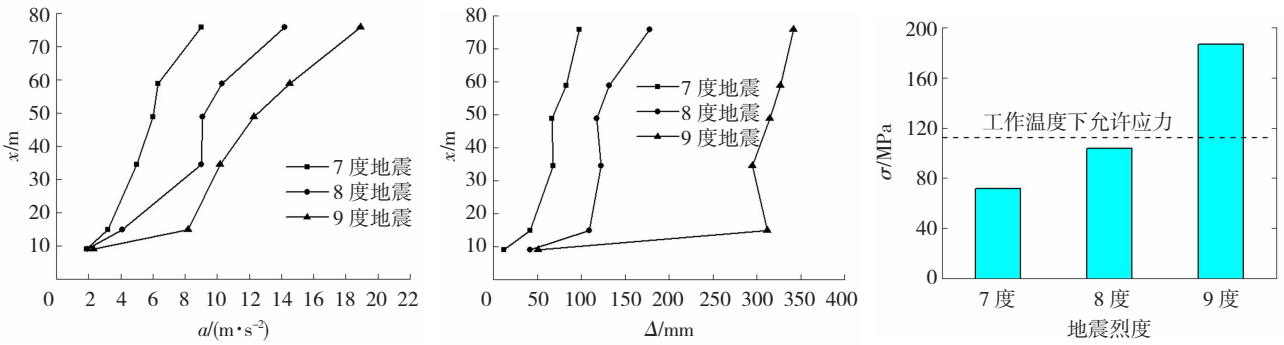
4.1 结构自振特性分析

采用白噪声激振法对结构自振特性进行研究,提取结构上部的加速度响应结果,继而通过傅里叶变换方法得到自振频谱曲线,见图 14.

从图 14 自振频谱曲线可以看出,最大幅值对应的频率为 18.5 Hz,即在该频率时结构产生共振,则结构的自振频率为 18.5 Hz,自振周期为 0.054 s,根据相似比换算,原型结构的自振频率为 0.925 Hz,自振周期为 1.08 s.

4.2 结构抗震性能分析

为了进一步考察仿竹型脱硫塔结构的抗震性能,研究在塔体最不利工况下即内部浆液高度为零、地震波输入角度与开口方向一致情况下 7 度及以上地震作用下结构的动力响应[8]. 依次输入不同强度地震波,提取结构沿高度方向的动力响应,并换算成实际结构的响应,见图 15.



(a) 加速度响应峰值包络线 (b) 位移响应峰值包络线 (c) 结构应力极值

图 15 不同强度地震作用下动力响应

Fig. 15 Dynamic response under action of earthquake with different intensities

从图 15(a)、(b)可看出,不同烈度地震作用下结构的加速度与位移响应沿结构的高度变化基本趋势一致,沿高度方向逐渐递增,在底部开口位置与上部湿除扩大部位发生突变. 位移响应是评价结构受力性能的重要指标之一,根据《高耸结构设计规范》[15], 脱硫塔结构的最大允许位移为结构高度的 1/100, 该仿竹型脱硫塔结构规范最大允许位移约 740 mm. 从位移幅值来看,不同烈度地震作用下结构最大位移均未超过规范允许值.

从图 15(c)结构的应力水平来看,7 度地震作用下为 71.6 MPa,8 度地震作用下为 104 MPa,均未超过脱硫塔结构在工作温度下的材料许用应力值 113 MPa,说明 7、8 度地震作用下,该仿竹型脱硫塔处于弹性状态,未产生破坏;在 9 度地震作用下,结构最大应力为 187 MPa,超过材料许用应力值,同时结合试验现象图 16 可看出,结构在经历 9 度地震后,塔体出现局部轻度弯曲的现象,但仍未倒塌.

图 16 局部轻度弯曲

Fig. 16 Local mild bending

5 结 论

1)阐明了竹子结构特征与其优越力学性能的关系,基于最小二乘法拟合得到竹身参数沿高度方

向的计算公式,竹子结构塑性铰发生在竹节之间,而不是在竹节部位,竹节的存在起到了加固作用,提高了局部稳定性.

2)在位移较小的情况下,竹子结构与等效普通结构 P-δ 曲线比较接近,但在进入塑性状态后,竹子结构的优势逐渐凸显出来,极限承载力与延性大大提高,表明仿竹结构在抵抗大变形方面具有很大的潜力.

3)基于刚度渐变的原则,提出分段变壁厚设计方法,使仿竹型脱硫塔塔身截面刚度与竹身截面刚度变化趋势一致.加劲肋的存在可明显改善结构的屈曲模态,加劲肋间距以 4 m 作为基数,结合不同部位的受力情况,自动调整间距最为合理.

4)该仿竹型脱硫塔在 7、8 度地震作用下的最大位移及应力均未超过规范允许的最大位移与材料许用应力,结构处于弹性状态,未产生破坏;在 9 度地震作用下,塔体最大应力超过工作温度下材料许用应力,塔体产生局部轻度弯曲,但仍未倒塌.

参考文献

[1] 佐藤太裕,谷垣俊行,佐藤諭佳,等. 竹の節・組織構造が織り成す円筒体としての合理的な構造特性の理論的解明[J]. 土木学会論文集 A2(応用力学), 2016, 72(2): I_25
MOTOHIRO S, TOSHIYUKI T, YUKA S, et al. Optimal structural properties of cylindrical structures learning from morphology of wild bamboos with peculiar nodes and vascular bundles[J]. Transactions of the Japan Society of Civil Engineers A2 (Applied Mechanics), 2016,72(2): I_25. DOI: 10.2208/jscejam.72.I_25

[2] 付为刚,程文明,于兰峰,等. 正轨箱梁横向肋的竹子结构仿生学设计[J]. 西南交通大学学报,2013,48(2):211
FU Weigang, CHENG Wenmig, YU Lanfeng, et al. Bionics design of transverse stiffener in the upright rail box girder based on bamboo structure[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(2):211. DOI:10.3969/j.issn.0258-2724.2013.02.004

[3] 贺拥军,刘小华,周绪红. 仿竹型筒式立体停车结构的环箍层布置研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2013,40(4):1
HE Yongjun, LIU Xiaohua, ZHOU Xuhong. Research on arrangement of hoop-layers of imitating bamboo drum type tridimensional parking structure[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013,40(4):1

[4] AKRAMI V, ERFANI S. An analytical and numerical study on the buckling of cracked cylindrical shells[J]. Thin-Walled Structures, 2017,119:457. DOI:10.1016/j.tws.2017.06.023

[5] PHAM T T, NGUYEN D D, NGUYEN T. Thermomechanical buckling and post-buckling of cylindrical shell with functionally graded coatings and reinforced by stringers[J]. Aerospace Science and Technology,2017,66:392. DOI:10.1016/j.ast.2017.03.023

[6] 宋波,吴琳,孙北东. 矩形大开孔圆柱壳轴压作用下的屈曲性能[J]. 北京科技大学学报,2009,31(2):149
SONG Bo, WU Lin, SUN Beidong. Buckling behavior of thin-walled cylindrical shells with large rectangular opening[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2009,31(2):149. DOI:10.13374/j.issn1001-053x.2009.02.022

[7] 牛奔. 薄壁加劲圆钢管抗弯性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012
NIU Ben. Analysis of thin-walled circular stiffened steel tubes subjected to bending[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2012

[8] 宋波,殷炳帅,劳俊,等. 大尺度开口的钢制脱硫吸收塔结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(增刊 1):177
SONG Bo, YIN Bingshuai, LAO Jun, et al. Study on seismic performance of steel desulfurizing tower structure with large opening [J]. Journal of Building Structures,2016,37(S1):177. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.S1.026

[9] 陈宗平,周春恒,蒋香山. 螺旋筋约束增强空腹式型钢混凝土柱滞回性能试验研究[J]. 土木工程学报,2019, 52(7):69
CHEN Zongping, ZHOU Chunheng, JIANG Xiangshan. Experimental study on hysteretic behavior of spiral confined lattice steel reinforced concrete columns [J]. China Civil Engineering Journal,2019,52(7):69. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2019.07.007

[10] 迟世春,林少书. 结构动力模型试验相似理论及其验证[J]. 世界地震工程,2004,20(4):11
CHI Shichun, LIN Shaoshu. Validation of similitude laws for dynamic structural model test[J]. World Earthquake Engineering, 2004,20(4):11

[11] 黄明,付俊杰,陈福全,等. 桩端岩溶顶板地震动力特性的振动台试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019, 51(2):126
HUANG Ming, FU Junjie, CHEN Fuquan, et al. Shaking table test of seismic dynamic characteristics of karst roof under pile load[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2019,51(2):126. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201712163

[12] 张宗敏,曹万林,刘岩,等. 装配式轻钢框架-轻钢桁架结构振动台试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019, 51(5):67
ZHANG Zongmin, CAO Wanlin, LIU Yan, et al. Shaking table test on prefabricated light steel frame with light steel truss structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2019,51(5):67. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201809068

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程抗震设防分类标准:GB 50223—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD). Standard for classification of seismic protection of building constructions: GB 50223—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2008

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD). Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高耸结构设计规范:GB 50135—2006[S]. 北京: 中国计划出版社,2006
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD). Code for design of high-rise structures: GB 50135—2006[S]. Beijing: China Planning Press,2006

(编辑　赵丽莹)