

文章编号: 1006-4710(2015)02-0207-07

玻璃纤维复合材料构件抗压性能研究

胡东晋, 王振山, 刘云贺, 王乾峰

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 玻璃纤维复合材料已被广泛应用于输电杆塔结构,但决定其性能和质量的复杂因素,目前缺乏相关结构性能的研究,给玻璃纤维复合材料的工程应用带来一定的影响。本文通过玻璃纤维复合材料与钢套管组合构件的轴心抗压试验,研究了玻璃纤维复合材料构件轴心抗压力学性能和破坏模式;基于正交各向异性材料强度理论,采用有限元方法分析了偏心率和径厚比对玻璃纤维复合材料构件的影响。结果表明:轴压破坏时,玻璃纤维复合材料构件发生脆性断裂,破坏形式为GFRP管节点处斜向断裂,其最大应力小于材料的抗压强度,在工程设计中应考虑折减;钢套管始终处于弹性应力状态。偏心受压时,构件的极限承载力随偏心率的增大而减小,减小幅度逐渐降低;减小径厚比能提高构件极限承载力,径厚比减小20%,极限承载力增大20%。

关键词: 玻璃纤维复合材料;有限元;偏心率;径厚比

中图分类号: TU599

文献标志码: A

Research on compression performance of glass fiber composite material

HU Dongjin, WANG Zhenshan, LIU Yunhe, WANG Qianfeng

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Glass fiber reinforced plastic material is widely used in the transmission line tower structure, but the factors in determining its performance and quality are complex, and the lack of related structure research brings certain influence. Through the axial compressive test of glass fiber reinforced plastic material and steel casing composite member, the axial compressive mechanical properties and failure mode of glass fiber composite component are studied in this paper; Based on the strength theory of transversely orthotropic material, finite element method is used to analyze the influence of eccentricity ratio and diameter-thickness ratio on glass fiber composite component. Results show that brittle failure occurs in glass fiber composite component, and the failure mode is oblique fracture in the node, and the maximum stress of glass fiber composite component is less than the compressive strength of material, so that reduction should be considered in engineering design; Steel casing remains in the state of elastic stress. The ultimate bearing capacity of eccentric compression member decreases with an increase in eccentricity ratio, and the decrease extent reduces gradually; The reduction of diameter-thickness ratio can improve the ultimate bearing capacity of components; when diameter-thickness ratio decreases by 20%, ultimate bearing capacity will increase by 20%.

Key words: glass fiber reinforced plastic material; finite element; eccentricity ratio; diameter-thickness ratio

随着我国智能电网的建设以及同塔多回线路、特高压线路等输电新技术的应用,输电杆塔的高度

不断增加,荷载不断增大,输电走廊不断扩张^[1]。传统的输电铁塔在强度等级、防腐耐污性能和电绝缘

收稿日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179154)。

作者简介: 胡东晋,男,硕士生,研究方向为结构抗震、防震减灾。E-mail: hudongjin7@163.com。

通讯作者: 刘云贺,男,教授,博导,博士,研究方向为结构抗震、防震减灾。E-mail: liuyunhe1968@163.com。

性能等方面都无法适应新的要求,正逐渐被环保、高强的新型材料取代^[2]。玻璃纤维复合材料(GFRP)具有轻质高强、经济环保、绝缘性能好等优点^[3],是建设绿色电网的理想材料,拥有巨大的市场前景。开展相关的研究具有重要的理论和工程应用价值。国内外学者对 GFRP 材料性能及其破坏机理开展了具体的研究^[4-12]。GFRP 通常由各不相同的组分构成,存在各向异性,并存在明显的相界面,其性能是复合材料中各组分性能的综合体现,因此决定复合材料性能和质量的因素十分复杂。目前,关于玻璃纤维复合材料构件受力性能的研究成果较少,由于缺乏试验研究,给 GFRP 的工程应用带来一定的影响。

本文对玻璃纤维复合材料构件进行了轴心抗压性能试验,探讨了其力学性能和破坏模式,并采用数值模拟方法,分析了偏心率和径厚比等因素对玻璃纤维复合材料构件承载力的影响,为玻璃纤维复合材料在输电杆塔结构中的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 构件设计

构件由 GFRP 管和钢套管组成,具体尺寸见图 1,钢套管采用 Q345B 钢材,GFRP 管采用湿法缠绕技术加工,其抗压强度为 400 MPa。

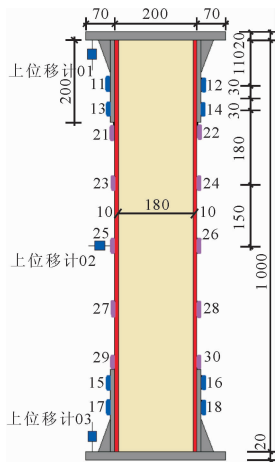


图 1 测点布置图

Fig. 1 Test point arrangement

1.2 加载装置及测点布置

采用 5 000 kN 长柱试验机对 $\Phi 200 \times 10$ 构件进行 3 组轴压试验,如图 2 所示,在构件端部设计加载端使构件受力均匀。采用 TDS-630 数据采集仪与扩展箱采集试验数据,测点布置见图 2,构件共布置 18 个应变片(钢套管编号 11~18,GFRP 管编号 21~30),6 个位移计。

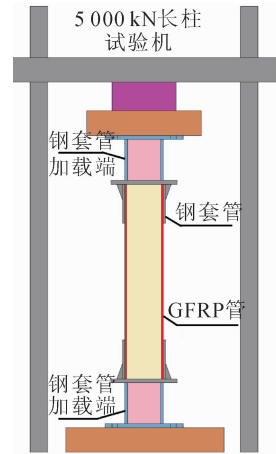


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Loading device

1.3 加载方案

预加载分三级进行,每级加载取标准荷载的 20%,使构件各部分接触良好,荷载与变形关系趋于稳定。

正式加载采用荷载控制。按 50 kN/min 载荷速率加载,至 1 000 kN 后按 30 kN/min 加载,达到 1 300 kN 后(极限荷载理论值的 80%)改为 10 kN/min 继续加载,直至破坏。

1.4 试验结果

加载至 1 000 kN 前构件无明显变化,随荷载的增大,构件轴向变形不断增大,伴随数次纤维断裂声响;加载至 1 700 kN 前,构件无声响,无明显位移突变;加载至 1 700 kN 时,突然发出一声巨响,构件破坏。

构件破坏形式为距钢套管与 GFRP 管交界面 2 cm 处,GFRP 管斜向剪切断裂。构件破坏前无明显征兆,属脆性破坏。构件破坏情况见图 3。

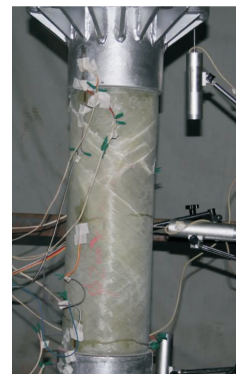


图 3 $\Phi 200 \times 10$ 构件破坏情况

Fig. 3 Specimens failure of $\Phi 200 \times 10$

由于 GFRP 纵向强度为横向强度的 8 倍以上,横纵力学性能差异较大,在轴向压力的作用下,钢套管对 GFRP 管的横向变形具有一定的横向约束作用,导致 GFRP 管斜向剪切断裂。

根据试验测得的极限荷载和各测点的变形情况,选择具有代表性的测点进行受力分析,构件的荷载-位移曲线见图4,钢套管应力-应变曲线(选择距钢套管内侧边缘2 cm 轴向应变)见图5。

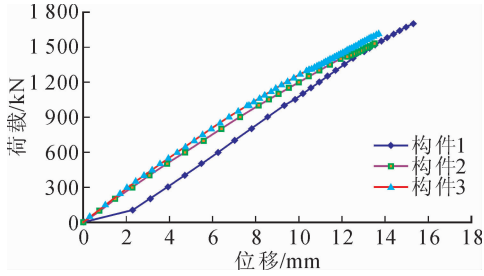


图4 $\Phi 200 \times 10$ 荷载-位移曲线

Fig. 4 $\Phi 200 \times 10$ Load-displacement curves

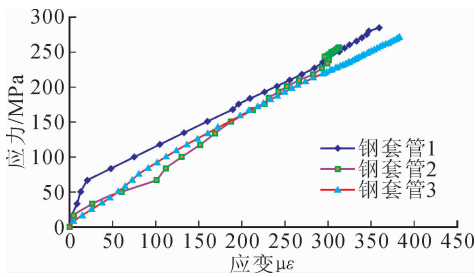


图5 钢套管应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of steel casing

由图4可知,构件的荷载位移呈线性关系,构件的极限承载力平均值为1 616.67 kN,破坏位移14.17 mm,最大应力为274.50 MPa,小于材性试验测得的GFRP抗压强度400 MPa。因此在轴压作用时,构件承载能力低于材性试验结果,建议工程设计时考虑承载力折减。

GFRP管的上端截面应力应变呈线性关系,符合线弹性模型。由于钢套管的应力应变基本呈线性关系(见图5),表明钢材始终处于弹性状态,其最大应力78.6 MPa,远未达到屈服强度,因此构件极限承载力按GFRP管取值。

2 有限元验证分析

2.1 模型的建立

利用有限元软件对玻璃纤维复合材料构件抗压性能试验进行数值模拟。

GFRP采用线弹性模型和最大应变强度准则,充分考虑了复合材料的横观各向同性,其材性指标取轴压试验结果,沿主轴方向的材料弹性常数为: $E_1 = E_2 = 10 \text{ GPa}$, $E_3 = 18 \text{ GPa}$, $\mu = 0.25$, $G = 6 \text{ GPa}$ 。Q345B钢套管采用双线性等向强化模型,屈服强度310 MPa,弹性模量206 GPa。钢套管与GFRP管的连接采用面面接触关系模拟,定义了法

向行为和切向行为。

GFRP管和钢套管均采用8节点缩减积分格式的三维实体单元C3D8R,并通过结构优化网格划分技术进行网格划分,钢套管共计18 704个单元,GFRP管39 336个单元,网格划分结果见图6。

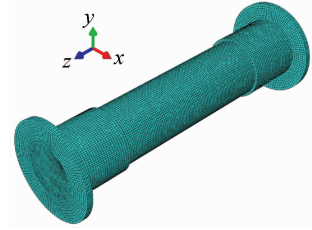


图6 模型网格划分图

Fig. 6 Mesh generation

边界条件参照试验情况,一端铰支(放松各向转角变形),另一端放松 z 向(纵向)位移约束,其余自由度约束。在构件上端施加 z 向轴心压力,采用位移控制等幅加载直至破坏,位移增量0.001。根据试验结果,当应变达到0.016,构件发生破坏。试验模拟结果见图7、图8。

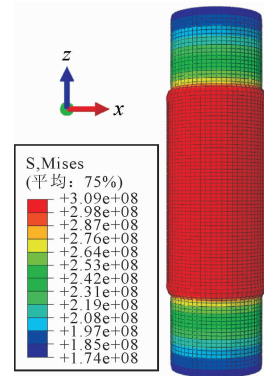


图7 GFRP管应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of GFRP pipe

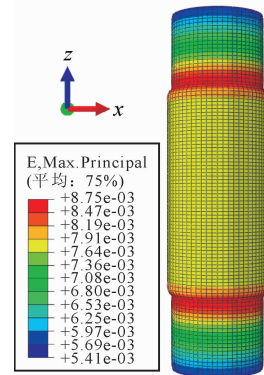


图8 GFRP管应变云图

Fig. 8 Strain nephogram of GFRP pipe

2.2 试验模型验证

对比试验结果与数值模拟结果(见表1)发现,随着荷载的增加,构件端部位移逐渐增大,荷载位移呈线性关系,试验值与模拟值吻合较好。构件极限承载力的试验值小于模拟值,误差10.91%,这是由于数值模拟未考虑初始缺陷引起的。

表1 $\Phi 200 \times 10$ 极限承载力对比

Tab.1 Ultimate bearing capacity comparison of $\Phi 200 \times 10$

构件极限承载力	极限荷载/kN	破坏位移/mm	最大应变/ 10^{-3}	最大应力/MPa
试验值	1 616.67	14.17	12.99	274.50
模拟值	1 793.00	14.14	14.82	270.58
相对误差	10.91%	0.20%	14.06%	1.43%

构件破坏位置和变形特征与试验结果基本相符。分析图7、图8发现,GFRP管应力、应变分布由GFRP管外边缘向GFRP管与钢套管交界处逐渐增大,管身应变分布比较均匀。在钢套管和GFRP管交界处应力集中,应变值最大,当达到极限荷载时,构件在此处发生强度破坏,与试验破坏位置相同。

由图9可知,GFRP管上端的应力应变呈线性关系,符合线弹性模型,试验曲线在模拟曲线附近波动,误差较小。GFRP管跨中和下端应变与上端基本一致。数值模拟结果小于试验结果是由于试验中两端为固结,但压力机盖板有一定的转动能力,边界条件对结果有一定影响。

钢套管的应力应变也呈线性关系,钢套管应变分布由端板向构件中部逐渐减小,最大应力82.4 MPa,远未达到屈服强度,表明钢材始终处于弹性状态,与试验结果相差16.87%。

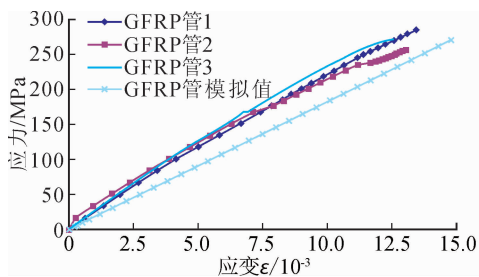


图9 GFRP管应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of GFRP pipe

构件的承载能力、破坏位置和变形特征与试验结果相符,证明了有限元模型的正确性和有效性,可以在此基础上进行参数分析。

3 参数分析

在实际工程中,由于玻璃纤维复合材料构件

存在安装偏差等问题,构件经常遭受偏心荷载作用^[13];而且在工程设计时需要选用多种截面形式的构件。本次试验未能全面考虑偏心率和径厚比对构件抗压性能的影响,因此有必要对偏心荷载作用下不同径厚比的构件进行数值模拟,以供工程参考。

3.1 偏心率影响

共设计了三种径厚比不同的构件进行数值模拟,对每种构件分别施加六种不同偏心距的荷载进行对比。构件尺寸见表2(构件编号P10-0代表 $\Phi 200 \times 10$ 的轴压构件,P10-0.025代表 $\Phi 200 \times 10$ 偏心率为0.025的构件,以此类推)。

表2 构件尺寸

Tab.2 Specimen size

序号	截面尺寸/ mm	杆件长度/ mm	杆件净长/ mm	套管长度/ mm	径厚比
1	$\Phi 200 \times 8$	1 000	600	200	25.0
2	$\Phi 200 \times 10$	1 000	600	200	20.0
3	$\Phi 200 \times 12$	1 000	600	200	16.7

数值模拟结果见图10(以 $\Phi 200 \times 10$ 的构件为例)。通过对试验历程的模拟发现,偏心荷载作用下,构件受轴力和弯矩共同作用,产生轴向缩短和侧向弯曲变形。随荷载的增大,构件弯曲曲率和侧向变形逐渐增大,截面的偏心和弯矩不断变化。GFRP的最小应变范围从端板连接处向受拉区延伸,最大应变出现在GFRP管的受压侧与钢套管交界处。

表3和图11给出了不同偏心率下 $\Phi 200 \times 10$ 构件的极限承载力和荷载-位移曲线。构件的荷载位移呈线性关系,随着偏心率的增大,构件的刚度和极限承载力减小,减小幅度逐渐降低,构件的极限位移也逐渐减小。偏心率为0.025时,构件极限承载力降低10%,偏心率对构件承载力影响显著,设计时应考虑相应的承载力折减系数。GFRP构件在安装时应严格对中,对中误差应控制在3%以内。

表3 不同偏心率下 $\Phi 200 \times 10$ 构件极限承载力对比

Tab.3 Ultimate capacity under different eccentricity ratio of $\Phi 200 \times 10$

构件编号	偏心率	承载力/kN	承载力折减系数
P10-0	0	1 709.90	1.00
P10-0.025	0.025	1 546.24	0.90
P10-0.05	0.05	1 409.85	0.83
P10-0.10	0.10	1 201.12	0.70
P10-0.15	0.15	1 045.25	0.61
P10-0.20	0.20	924.71	0.54
P10-0.25	0.25	829.90	0.49

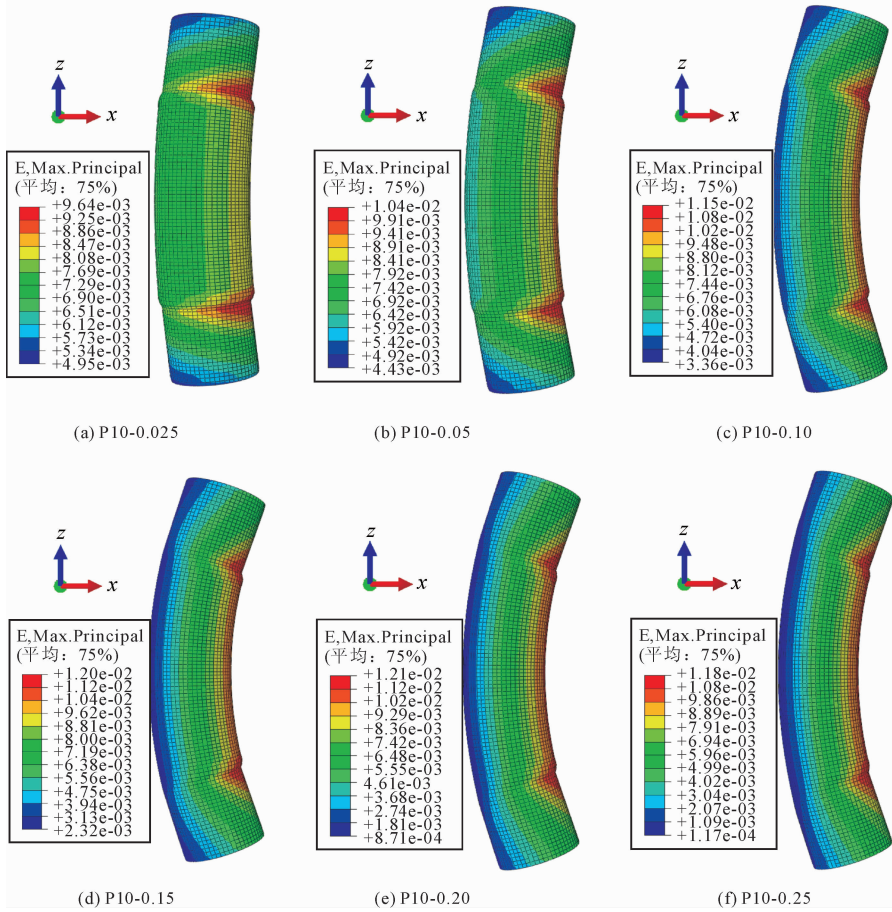


图 10 不同偏心率下 $\Phi 200 \times 10$ 构件 GFRP 管的应变云图

Fig. 10 Strain nephogram of $\Phi 200 \times 10$ GFRP pipe under different eccentricity ratio

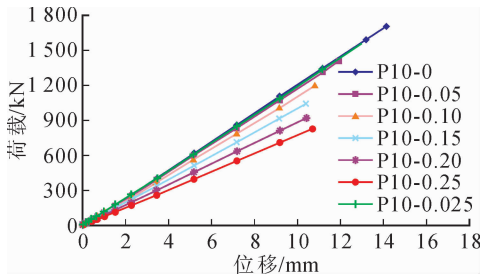


图 11 不同偏心率下 $\Phi 200 \times 10$ 构件的荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves under different eccentricity ratio of $\Phi 200 \times 10$

3.2 径厚比影响

对表 2 给出的 3 种截面形式的构件进行对比分析,构件的应力应变云图见图 12、图 13。构件的破坏形式与试验相同,均为 GFRP 管端部剪切破坏。

图 14 表示不同径厚比构件的荷载位移关系,当荷载偏心率、GFRP 管外径等因素相同时,GFRP 管径厚比减小,极限承载力提高,当径厚比减小 20%,相应极限承载力增大 20%。因此在输电杆塔结构设计时,应选择合理的截面尺寸,满足承载能力的要求。

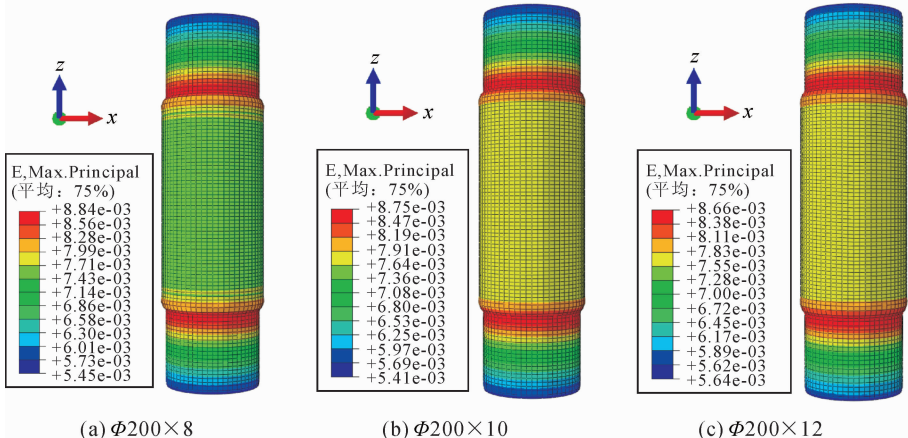


图 12 不同径厚比构件的应变云图

Fig. 12 Strain nephogram under different diameter-thick ratio

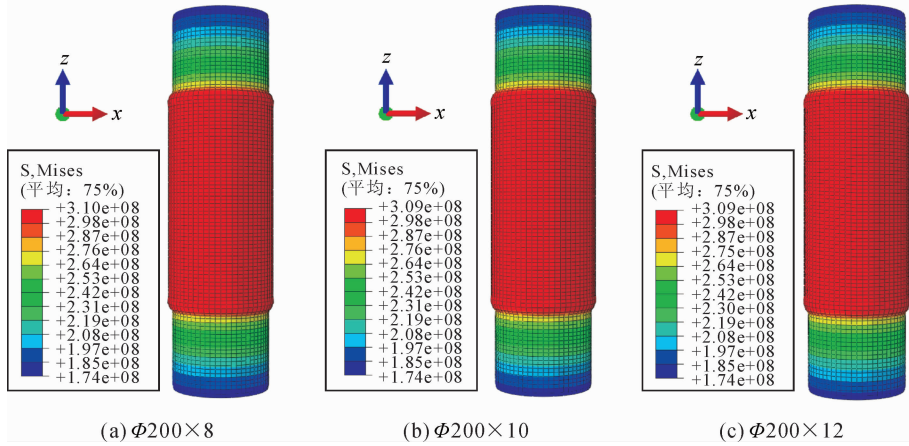


图13 不同径厚比构件的应力云图

Fig. 13 Stress nephogram under different diameter-thick ratio

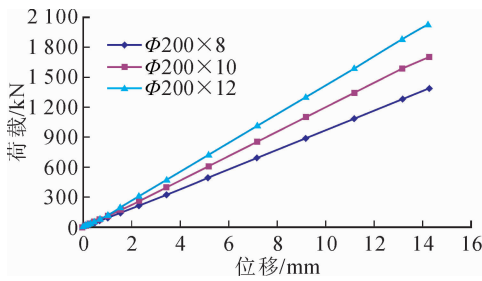
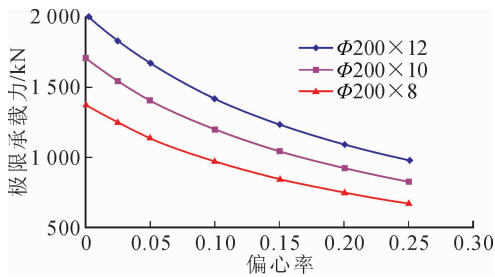


图14 不同径厚比构件的荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves under different diameter-thick ratio

图15给出了不同径厚比的构件在不同偏心率荷载下的极限承载力关系。随着径厚比的减小,曲线的曲率逐渐增大,表明构件径厚比越小,偏心率对构件承载力的影响越大,构件越容易发生破坏。因此,在工程设计时,对于不同径厚比的试件,应当考虑不同的偏心率影响系数。

图15 不同径厚比构件的极限承载力-偏心率曲线
Fig. 15 Ultimate bearing capacity-eccentricity ratio curves under different diameter-thick ratio

4 结论

1) 在GFRP构件的轴压试验中,构件的荷载与位移呈线性关系,强度破坏前无明显征兆,属脆性破坏;钢套管始终处于弹性阶段。构件破坏时的最大应力小于GFRP的抗压强度,表明玻璃纤维复合材

料用于套管构件时,其力学性能低于GFRP材性试验结果,在构件设计中应对其折减。

2) GFRP构件的数值模拟表明,偏心受压构件的极限承载力随偏心率的增大而减小,减小幅度逐渐降低,建议偏心率不宜大于0.025。

3) 对截面径厚比的分析表明,减小径厚比能提高构件极限承载力,径厚比减小20%,极限承载力增大20%。

4) 径厚比越小,偏心率对构件承载力的影响越大,对径厚比不同的构件应考虑不同的偏心率影响系数。

参考文献:

- [1] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):1-10,25.
Liu Zhenya, Zhang Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Journal of Chinese Electrical Engineering Science, 2013, 33(7): 1-10, 25.
- [2] 李茂华,杨靖波,刘思远. 输电杆塔结构用材料最新进展[J]. 武汉大学学报:工学版,2011,44(S1):191-195.
Li Maohua, Yang Jingbo, Liu Siyuan. Development of structural steel materials for transmission tower[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(S1): 191-195.
- [3] 倪礼忠,周权著. 高性能树脂基复合材料[M]. 上海:华东理工大学出版社,2010.
- [4] 师俊平,刘协会,肖华. 复合材料扁壳的层间应力分析[J]. 西安理工大学学报,2001,17(2):127-132.
Shi Junping, Liu Xiehui, Xiao Hua. An analysis of inter-laminar stresses in composite partial shell[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17(2): 127-132.
- [5] 张磊,孙清,王虎长,等. E玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料力学性能试验研究[J]. 电力建设,2010,31(9):118-121.
Zhang Lei, Sun Qing, Wang Huchang, et al. Experimental study on the mechanical properties of E-glass fiber/epoxy[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(9): 118-121.

- 118-121.
- [6] 吴斌峰,孙清,李亮,等. E 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料剪切性能[J]. 电力建设,2014,35(11):79-84.
Wu Bin feng, Sun Qing, Li Liang, et al. Shear property of E-Glass fiber reinforced polymer [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(11): 79-84.
- [7] 张平,龙玉成,孙清,等. 输电杆塔玻璃钢纤维增强复合材料抗老化性试验研究[J]. 电力建设, 2012, 33(9): 67-71.
Zhang Ping, Long Yucheng, Sun Qing, et al. Experimental study on ageing resistance of glass fiber reinforced polymer in transmission tower[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(9): 67-71.
- [8] 张平,龙玉成,孙清,等. E 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料输电杆塔拉杆的疲劳性能试验[J]. 电力建设, 2012, 33(8): 88-91.
Zhang Ping, Long Yucheng, Sun Qing, et al. Experimental study of fatigue performance of E-glass fiber /epoxy reinforced polymer in transmission tower bars[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(8): 88-91.
- [9] 钱鹏,冯鹏,叶列平. GFRP 管轴心受压性能的试验研究[J]. 天津大学学报, 2007, 40(1): 19-23.
Qian Peng, Feng Peng, Ye Lieping. Experimental study on GFRP pipes under axial compression[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(1): 19-23.
- [10] 薛晓敏,孙清,王虎长,等. 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料受压管件稳定性试验及理论研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 251-258.
Xue Xiaomin, Sun Qing, Wang Huchang, et al. Experimental and theoretical study on stability of slender components made from glass fibre/epoxy composite material [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 251-258.
- [11] 侯炜,张兴虎,冯海潮. GFRP 轴心受压构件的稳定性能[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 441-445.
Hou Wei, Zhang Xinghu, Feng Haichao. Stability of axial compression members of glass fiber-reinforced plastic(GFRP) [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4): 441-445.
- [12] 胡毅,刘庭,刘凯,等. 110 kV 输电线路复合材料杆塔特性试验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 801-808.
Hu Yi, Liu Ting, Liu Kai, et al. Experimental research on performance of composite materials pole of 110 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 801-808.
- [13] 陈绍蕃. 塔架交叉斜杆考虑屈曲相关性的稳定承载力[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 19-28.
Chen Shaofan. Stability capacity of tower cross-bracing staking account of interaction in buckling [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 19-28.

(责任编辑 周蓓)

(上接第 179 页)

- [2] Terrón J M, Sánchez-lavega A, Salazar A. Multiple scattering effects of thermal waves by two subsurface cylinders[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87: 2600-2607.
- [3] Fang X Q, Hu C W, Huang H. Scattering of elastic waves and dynamic stress in two-particle reinforced composite system[J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(6): 538-547.
- [4] Lakhtakia A, Varadan V V, Varadan V K. Reflection characteristics of an elastic slab containing a periodic array of circular elastic cylinders: P and SV wave analysis [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1988, 83(4): 1267-1275.
- [5] Twersky V. Multiple scattering of radiation by an arbitrary configuration of parallel cylinders[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1952, 24: 42-46.
- [6] Wang X, Sudak, L J. Scattering of elastic waves by multiple elastic circular cylinders with imperfect interface[J]. Waves in Random and Complex Media, 2007, 17(2): 159-187.
- [7] Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure[J]. Acta Materialia, 2000, 48(1): 1-29.
- [8] Wong E, Sheehan, P E, Lieber C M. Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes[J]. Science, 1997, 277(5334): 1971-1975.
- [9] Davies J H. Elastic and piezoelectric fields around a buried quantum dot[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84: 1358-1365.
- [10] Gurtin M E, Murdoch A I. A continuum theory of elastic material surfaces[J]. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1975, 57(4): 291-323.
- [11] Gurtin M E, Weisssmuller J, Larche F. A general theory of curved deformable interfaces in solids at equilibrium[J]. Philosophical Magazine A, 78(5): 1093-1109.
- [12] Gao W, Yu S W, Huang G Y. Finite element characterization of the size-dependent mechanical behaviour in nanosystems[J]. Nanotechnology, 2006, 17: 1118-1122.
- [13] Wang G F, Wang T J, Feng X Q. Surface effects on the diffraction of plane compressional waves by a nano-sized circular hole[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(23): 231923.
- [14] Ru Y, Wang G F, Wang T J. Diffractions of elastic waves and stress concentration near a cylindrical nano-inclusion incorporating surface effect[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2009, 131(6): 061011.
- [15] Wang G F. Multiple diffraction of plane compressional waves by two circular cylindrical holes with surface effects[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(1): 013507.
- [16] Zhang Q F, Wang G F, Schiavone P. Diffraction of plane compressional waves by an array of nanosized cylindrical holes[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(2): 021003.

(责任编辑 杨小丽)