

GFRP管轴心受压性能的试验研究

钱鹏^{1,2}, 冯鹏^{1,2}, 叶列平^{1,2}

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 纤维增强复合材料(FRP)具有高强轻质和耐腐蚀的优点, 适合于腐蚀环境和大跨轻质结构. 针对大跨度空间网格结构中的杆件, 对拉挤玻璃纤维增强复合材料(GFRP)圆管的轴心受力性能进行了试验研究. 首先通过短管受压试验得到了GFRP管的基本力学性能参数; 然后进行了4组不同长细比共12根GFRP长管的轴心受压试验, 研究了其稳定性能. 最后根据文献和试验结果, 提出了基于Perry公式的GFRP管轴心受压屈曲破坏承载力的计算公式, 能较好地预测GFRP长管的轴压屈曲破坏.

关键词: 稳定; 屈曲; 耐腐蚀; 大跨结构; 轻质结构

中图分类号: TU38 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2007)01-0019-05

Experimental Study on GFRP Pipes Under Axial Compression

QIAN Peng^{1,2}, FENG Peng^{1,2}, YE Lie-ping^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Fiber reinforced polymer (FRP) is suitable for structures in corrosive environment and long-span light-weight structures due to its high-strength, light-weight, and anti-corrosive qualities. The behavior of pultruded glass fiber reinforced polymer (GFRP) pipes, which are the members of long-span lattice structures, under axial compression was investigated by tests. Short GFRP pipes were first tested to determine the basic mechanical properties. Then the stability of long GFRP pipes was studied by axially compressive tests in four groups with different slenderness ratios, 12 specimens totally. Based on results of the tests and literature, the formula of the buckling load of composite pipes under axially compressive load was presented based on Perry formula. It can well predict the buckling failure load of long GFRP pipe under axial compression.

Keywords: stability; buckling; corrosion resistance; long-span structure; light-weight structure

自20世纪40年代以来,纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)因其比强度高、比模量大和耐腐蚀的特点,逐渐在现代工程的各个领域得到推广和应用,并且随着制造工艺与产业化水平的提高,FRP的价格逐步下降,到20世纪70年代FRP开始较多地应用于土木工程结构中^[1-2].常用的FRP主要有GFRP(glass FRP)、CFRP(carbon FRP)和AFRP(aramid FRP),其中GFRP因价格相对合理,且延伸率较大,是目前工程中应用最多的^[2-4].

轻质高强的FRP是建造大跨空间结构的理想材料,可用FRP构件形成网架、网壳等空间网格结构.其适应性强,可制作成任意空间曲面,运输安装便利,适用于大跨度空间的屋架,可避免因雨水、结露引起的锈蚀,维护费用低,耐久性好,施工周期短.笔者对空间网格结构中的拉挤GFRP圆管的轴心受力性能进行试验研究.首先通过短管受压试验获得GFRP管的轴心抗压承载力和基本材料参数;再进行长管轴心受压的试验研究,分析其稳定性能与长细比的关系以及失稳破

收稿日期:2006-05-19; 修回日期:2006-10-09.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50238030).

作者简介:钱鹏(1980—),男,博士研究生.

联系人:叶列平(1960—),男,教授,博士生导师, ylp@tsinghua.edu.cn.

坏模式;在此基础上对试验结果和已有文献研究资料进行分析总结,提出了 GFRP 管轴心受压屈曲破坏承载力的计算方法。

1 短管强度试验

试验所用 GFRP 管采用拉挤工艺生产,由 E 玻璃纤维和乙烯基树脂制成,圆环截面,外径 41.2 mm,管壁厚 3.6 mm. 为了获得其轴心受压承载力和材料参数,进行了长度为 120 mm 的短管的轴心受压试验. 短管试样取自于不同批次的 GFRP 管,共 5 根. 将 GFRP 短管在压力试验机对中后施加轴向压力,试验装置见图 1. 试件中部管外壁相对位置上布置两组应变片,每组 2 个,分别测量 GFRP 管的轴向和环向应变。

试验过程中,量测的荷载与应变基本呈线性关系. 当纵向应变到达 5 000 $\mu\epsilon$,开始听见“噼啪”响声,并一直持续至试件破坏. 破坏时试件的纵向应变达到 6 200 ~ 7 800 $\mu\epsilon$. 试件破坏较突然,并伴有巨大响声. 图 2 为各试件的破坏照片,可以看出,在 GFRP 管表面有许多条纵向裂缝。

表 1 为 GFRP 短管轴心受压试验结果,取各试件的平均值作为材料的力学性能参数,其中 SCGP-4 的试验结果因与其余 4 个试件差异过大,不予采用. 由试验结果可知,拉挤 FRP 管的弹性参数差异较小,变异系数为 5.5%;强度参数的离散度较大,极限荷载、纵

向极限应力和纵向极限应变的变异系数分别为 10.9% 和 10.5%;环向极限应变的离散度更大,为 20.3%,这是因为试件接近破坏时裂缝数量与分布的不确定性所致。

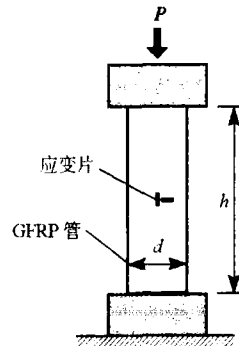


图 1 GFRP 短管的轴心受压试验装置
Fig.1 Testing setup for short GFRP pipes under axial compression

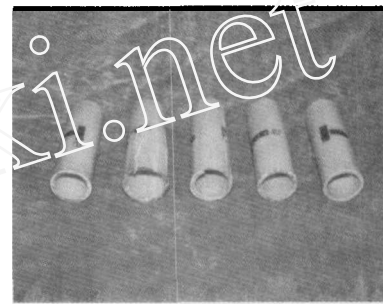


图 2 GFRP 短管的破坏模式
Fig.2 Failure mode of short GFRP pipes

表 1 GFRP 短管轴心受压试验结果

Tab.1 Experimental results of short GFRP pipes under axial compression

构件编号	P_u/kN	$\epsilon_{u,L}/10^{-6}$	$\epsilon_{u,T}/10^{-6}$	$\sigma_{u,L}/MPa$	E_L/MPa	ν_{LT}
SCGP-1	92.0	7 819	2 936	216.4	27 682	0.39
SCGP-2	71.0	6 192	2 178	166.8	27 054	0.35
SCGP-3	87.0	7 284	3 463	204.4	28 347	0.38
SCGP-4	73.0	6 331	1 709	171.6	21 626	0.27
SCGP-5	87.0	7 820	2 480	204.4	26 404	0.35
平均值	84.3	7 279	2 764	198.4	27 372	0.37
变异系数	10.9%	10.5%	20.3%	10.9%	3.0%	5.5%

注: P_u 为试件破坏荷载; $\epsilon_{u,L}$ 和 $\epsilon_{u,T}$ 分别为试件破坏时的轴向与环向平均应变值; $\sigma_{u,L}$ 为试件破坏时的轴向平均应力,即极限强度; E_L 与 ν_{LT} 分别为轴向弹性模量和纵横泊松比。

2 长管的稳定性试验

为研究 GFRP 管的轴压稳定性,共进行了 4 组不同长细比的 GFRP 管试验,每组 3 根试件,共 12 根,杆件截面与短管试验的相同,其余参数见表 2. 试验时 GFRP 管放置在夹具中(杆件的有效计算长度包括两

端夹具的高度 214 mm),对中后施加轴向压力,测量试件的纵向应变、横向位移和加载端竖向位移,试验装置以及应变片和位移计的布置见图 3 和图 4.

各试件的试验现象基本相同:开始加载时,试件变形很小;接近屈曲荷载时,杆件中部的横向位移迅速发展,试件整体失稳. 试件失稳时,其横向变形呈半波正弦曲线形状,属于整体屈曲破坏。

表2 GFRP长管试件的几何参数

Tab.2 Geometrical parameters of tested long GFRP pipes

试件编号	构件长度(mm)	构件长细比	支座类型
LCGP35	700	35	两端固支
LCGP45	1 000	45	两端固支
LCGP55	1 300	55	两端固支
LCGP90	1 500	90	一端固支、一端铰接

注:LCGP35意为long compressive GFRP pipes 35,其中35表示GFRP试件的长细比。

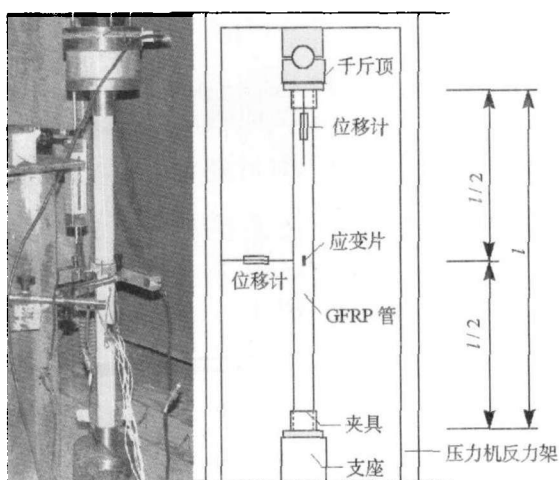


图3 GFRP长管受压试验装置

Fig.3 Testing setup for long GFRP pipes under axial compression

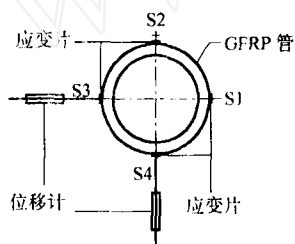


图4 中部截面测点平面布置

Fig.4 Location of measured points in the middle section

图5~图8分别为各组试件的轴力与中点横向位移的关系曲线。可以看到,由于存在初始缺陷,在加载初始,横向位移就不断地增加;当试件屈曲时,曲线出现一个明显的拐点,此后竖向荷载基本保持不变,而横向变形迅速增大直到试件破坏。

图5为LCGP35组各试件的轴力-横向位移曲线。由于该组试件在支座处存在空隙,其加载初始阶段的轴力-横向位移曲线有一拐点。LCGP35-1和LCGP35-3失稳后,横向位移迅速增大,当达到10mm时试件受压达到极限强度而发生破坏;LCGP35-2失稳后,由于端部集中应力过大很快发生破坏,此时横向位移仅4mm。

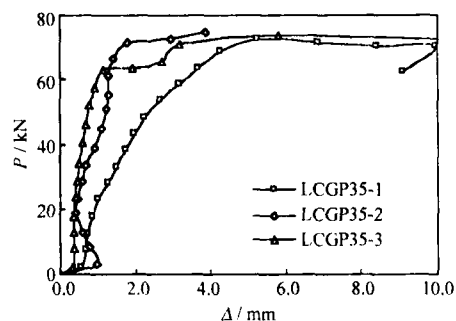


图5 LCGP35轴力-横向位移曲线

Fig.5 Axial force-lateral displacement curves of LCGP35

图6为LCGP45组各试件的轴力-横向位移曲线。LCGP45-3在加载到10kN时由于杆端接触不好,试件横向刚度发生了突变;此外,3根试件的刚度基本保持相同直至试件发生失稳。其中LCGP45-1因固定端约束不够充分而出现一定转动,所以屈曲荷载较小,为44kN,其余2根构件的屈曲荷载值均在60kN左右。

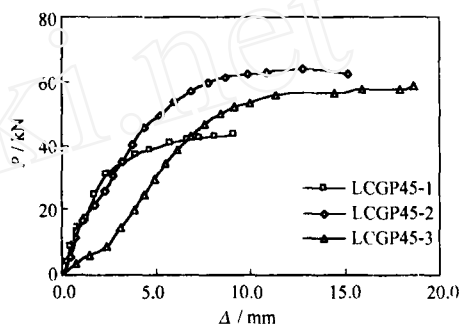


图6 LCGP45轴力-横向位移曲线

Fig.6 Axial force-lateral displacement curves of LCGP45

图7为LCGP55组各试件的轴力-横向位移曲线。LCGP55-3在屈曲之前横向位移发展缓慢,并且屈曲荷载也是3根试件中最大的,说明此试件的初始缺陷较小。可见,初始缺陷的大小是影响试件屈曲荷载的一个重要因素。

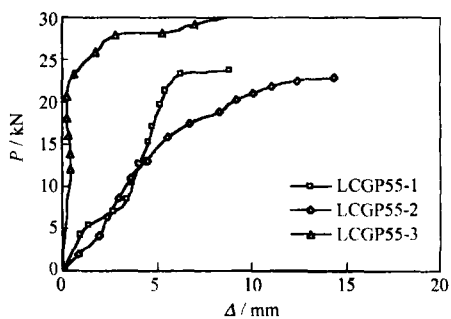


图7 LCGP55轴力-横向位移曲线

Fig.7 Axial force-lateral displacement curves of LCGP55

图 8 为 LCGP90 组各试件的轴力-横向位移曲线. LCGP90-1 在加载到 8 kN 时,杆件两端局部被压密实,刚度发生了突变,横向位移基本不变,轴向荷载迅速增加到 13 kN,试件的横向位移开始增加,很快进入失稳状态. 与 LCGP90-1 相比,其他 2 个构件在加载过程中的刚度变化不大.

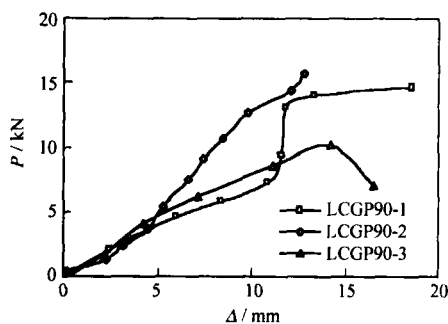


图 8 LCGP90 轴力-横向位移曲线

Fig. 8 Axial force-lateral displacement curves of LCGP90

3 GFRP 管整体稳定分析

对于 GFRP 杆件的整体稳定问题,国内相关研究较少,在国外已有一些研究.

Goodman 等人^[5]对 3 根长 2 410 mm,直径 81 mm,厚 0.53 mm 的硼/环氧 FRP 圆管进行了轴心受压试验研究. 试验结果与 Euler 公式计算结果的比值分别为 0.81, 0.97 和 1.06,其中弹性模量 E 通过短柱轴压试验确定. Euler 公式为

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

Hewson^[6]研究了拉挤 GFRP 槽形构件在轴压作用下的弯曲屈曲、扭转屈曲及弯扭耦合屈曲. 仍用 Euler 公式计算构件的弯曲屈曲荷载,计算时用纵向弹性模量 E_L 和纵横剪切模量 G_{LT} 来代替 E 与 G , E_L 由弯曲试验测得, G_{LT} 由扭转试验测得. 屈曲荷载试验值与理论计算值的误差为 5%~11%. 1979 年 Lee 和 Hewson^[7]研究了轴压作用下 CFRP 槽形构件的屈曲性能. 发现当 E_L/G_{LT} 较大时,必须考虑剪切变形,并建议细长 FRP 构件的屈曲荷载采用修正后的 Euler 公式计算,即

$$P_t = \frac{P_E}{1 + (P_E/K_s A_g G_{LT})} \quad (2)$$

式中: P_E 为 Euler 屈曲荷载,按式(1)计算; A_g 为构件净截面积; K_s 是与截面形状相关的剪切参数,矩形截面和圆形截面可分别取为 0.83 和 0.9.

1992 年, Zureick 等人^[10-11]对 GFRP 方管进行了轴心受压试验研究. 杆件截面尺寸为 76.2 mm × 76.2 mm,壁厚 6.3 mm,长细比分别为 89、87、76 和 66,采用

修正 Euler 公式(2)的计算结果与试验值吻合较好. 1997 年, Zureick 和 Scott^[9]又对 2 种宽翼缘 H 形截面和 2 种箱形截面 GFRP 构件进行了轴心受压试验. 每种截面形式有 6 根,共 24 根试件,有效长细比为 36~103. 试验结果与式(1)、(2)计算结果的比值分别为 0.85~0.97 和 0.88~1.01,据此,他们在公式(2)的基础上考虑 0.85 的折减系数作为轴心受压 GFRP 构件屈曲荷载的设计公式.

此外, Barbero 等人^[10-11]还通过试验研究过 FRP 构件在整体屈曲与局部屈曲交错作用下的屈曲性能.

不难看出,上述轴心受压 FRP 构件的屈曲荷载计算公式中对构件初始几何缺陷和初始偏心的影响考虑较少,而实际构件由于各种原因,必定会存在一定程度的初始几何缺陷和初始偏心. 笔者建议先拟合试验数据得到构件的等效相对初弯曲 ε_0 , 然后根据修正的 Perry 公式^[12]来计算 GFRP 杆件的屈曲荷载值.

$$\varphi = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[(1 + \varepsilon_0 + \bar{\lambda}^2) - \sqrt{(1 + \varepsilon_0 + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2} \right] \quad (3)$$

$$P_{cr} = \varphi f_L A$$

式中: φ 为杆件的稳定系数; P_{cr} 为屈曲荷载; f_L 为杆件纵向压缩强度,对于本文的 GFRP 管,根据试验按表 1 取为 198.4 MPa; $\bar{\lambda}$ 为正则化长细比. $\bar{\lambda}$ 的定义如下:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_L}{E_L}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\mu L}{r} \quad r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

式中: E_L 为 GFRP 构件的纵向弹性模量; I 为构件截面惯性矩; A 为构件截面面积; r 为构件截面回转半径; μ 为构件计算长度系数.

参考我国冷弯薄壁型钢结构技术规范^[13],取初始相对偏心率的表达式为

$$\varepsilon_0 = a + b\bar{\lambda}^2 \quad (5)$$

采用最小二乘法对文献[9]和本文试验数据进行拟合,得 a 为 -0.04, b 为 0.09,代入式(3)和(5)得

$$\varphi = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[(0.96 + 1.09\bar{\lambda}^2) - \sqrt{(0.96 + 1.09\bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2} \right] \quad (6)$$

用式(2)和式(6)分别计算文献[9]和本文各试件的稳定系数,计算结果与试验结果的对比如图 9 所示,统计分析结果见表 3. 可以看到,两种方法计算结果的平均值分别为 1.04 和 1.11,离散度分别为 13.5%和 15.7%,本文建议的式(6)的计算结果相对较好. 考虑到实际结构的安全度,建议在式(6)基础上乘以折减

系数 φ_c 。根据前述统计结果,取 $\varphi_c = 1/(m + 2\sigma) = 0.75$,则有 97.72% 的保证率。

表3 稳定系数的计算值与试验值比较

Tab.3 Comparison of stability factor between calculation and experimental results

方法	$(\varphi_c/\varphi_E)_{\max}$	$(\varphi_c/\varphi_E)_{\min}$	平均值 m	均方差 σ	离散度/%
式(2)	1.60	0.87	1.11	0.17	15.1
式(6)	1.43	0.76	1.04	0.14	13.5

注: φ_c 为计算值; φ_E 为试验值; $(\varphi_c/\varphi_E)_{\max}$ 和 $(\varphi_c/\varphi_E)_{\min}$ 分别表示两者比值的最大值和最小值。

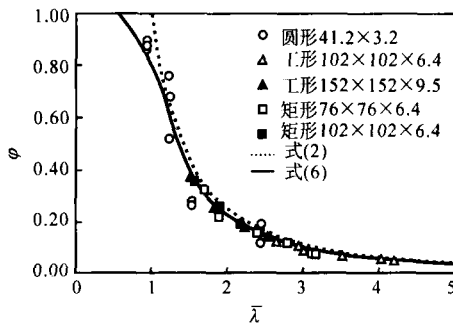


图9 FRP轴心受压构件的稳定系数曲线

Fig.9 Stability factor curve of FRP member under axial compression

4 结论

(1) 5根GFRP短管的轴心受力性能试验表明,GFRP管在整个受力过程呈现良好的线弹性,强度破坏呈脆性。GFRP材料的强度离散度较大,变异系数最大达20%;弹性常数的离散度较小,变异系数在6%之内。

(2) 通过对不同长细比GFRP长管的试验研究,得到了轴向压力与横向位移、竖向位移和应变之间的关系。GFRP长管的稳定破坏是一种极值点屈曲破坏。长细比较小时,杆件屈曲后会因为横向变形过大而使受压应变达到极限值而破坏;长细比较大时,杆件则会因为变形过大而使构件不能继续承载。GFRP长管的屈曲荷载值的离散度也较大。

(3) 根据本文和文献中的试验结果,采用修正Perry公式,提出了考虑初始缺陷和偏心的GFRP构件轴心受压屈曲荷载的计算公式,公式的计算结果与试验结果吻合较好。在此基础上,提出了GFRP构件轴心受压屈曲承载力的设计计算方法。

参考文献:

[1] 叶列平,冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3):24-36.

Ye Lieping, Feng Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006,39(3):24-36 (in Chinese).

[2] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,1996.

Shen Guanlin. *Composites Mechanics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996 (in Chinese).

[3] 张玉龙. 先进复合材料制造技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

Zhang Yulong. *Handbook of Advanced Composites Manufacturing Technologies* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003 (in Chinese).

[4] Berthelot J M. *Composite Materials; Mechanical Behavior and Structural Analysis* [M]. Cole J M Trans. New York: Springer-Verlag, 1999.

[5] Goodman J W, Gisksman J A. Structural evaluation of long boron composite column [J]. *Composite Materials; Testing and Designing*, 1969, ASTM STP 460: 460-469.

[6] Hewson P J. Buckling of pultruded glass fibre-reinforced channel section [J]. *Composites*, 1978,9(17):56-60.

[7] Lee D J, Hewson P J. The use of fiber-reinforced plastics in thin-walled structures [C] // Richards T H, Stanley P. *Stability Problems in Engineering Structures and Components*. New York: Elsevier Applied Science, 1978:23-55.

[8] Zureick A, Yoon S, Scott D. Experimental investigation on concentrically loaded pultruded columns [C] // Hamlin P, Verchery D. *Proceedings of 2nd International Symposium of Textile Composites in Building Construction*. Paris, France, 1992:207-215.

[9] Zureick A, Scott D. Short-term behavior and design of fiber-reinforced polymeric slender members under axial compression [J]. *Journal of Composites for Construction*, 1997, 1(4):140-149.

[10] Barbero E J, Raftoyiannis I G. Euler buckling of pultruded composite columns [J]. *Composite Structures*, 1993, 24(2):139-147.

[11] Barbero E J, Tomblin J. A phenomenological design equation for FRP columns with interaction between local and global buckling [J]. *Thin-Walled Structures*, 1994,18(2):117-131.

[12] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 2版. 北京:科学出版社,2003.

Chen Ji. *Stability of Steel Structures: Theory and Design* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese).

[13] GB50018-2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 2002. GB50018-2002 Technical Code of Cold-Formed Thin-Wall Steel Structures [S]. 2002 (in Chinese).