

GFRP 筋抗压力学性能试验研究

周继凯,杜钦庆,袁明亮,李根鑫

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:设计了 GFRP 筋抗压试验方案,通过试验研究了不同柔度 GFRP 筋的抗压力学性能.结果表明:GFRP 筋的抗压破坏可以划分为 3 种,即强度破坏、非弹性失稳破坏和弹性失稳破坏;GFRP 筋极限抗压强度小于极限抗拉强度,约为极限抗拉强度的 55%;GFRP 筋抗压弹性模量比抗拉弹性模量大.在进行 GFRP 筋抗压力学性能试验时,为防止局部破坏,试件端部应有良好的约束;为确定极限抗压强度设计曲线,应进行试件柔度对临界应力的影响试验.

关键词:玻璃纤维增强塑料(GFRP);抗压试验;力学性能;柔度;失稳

中图分类号: TU377.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2008)04-0542-04

以纤维质和树脂合成的新材料(FRP),具有非磁性、抗腐蚀性、高抗拉强度和低密度等优点,可以解决电磁影响和钢材的锈蚀问题,是钢筋混凝土结构中钢筋的理想替代品.

FRP 筋是各向异性材料,只在加强纤维方向具有高抗拉强度.这种各向异性的特点与普通钢筋不同,因此,当用 FRP 筋替代钢筋时,设计理念也应随之而变^[1].研究表明,FRP 筋的抗压强度均比抗拉强度低.但对受压弹性模量和受拉弹性模量来讲,有的结论是前者低,有的结论则相反^[2-4].由于 FRP 的弹性模量低于钢筋,在受压破坏的计算中,FRP 对混凝土结构的抗压贡献很小,因此 FRP 筋不宜当作柱或其他抗压构件的钢筋使用,也不宜当作受弯构件的抗压钢筋使用.但是,随着新材料、新结构的推广,采用 FRP 筋的混凝土结构越来越多,结构中 FRP 筋会不可避免地承受压力,FRP 的抗压能力应该受到重视,但常常被忽略^[3-4].

玻璃纤维增强塑料(GFRP)是一种由树脂和玻璃纤维复合而成的新型材料,同碳纤维增强复合材料(CFRP)和芳纶纤维增强复合材料(AFRP)相比,它具有价格低廉的显著特点. GFRP 筋在混凝土结构方面具有广阔的应用前景^[5-8],并已应用于煤巷临时加固和永久边坡加固工程^[9-10].

FRP 筋抗压力学性能的研究难点是没有标准的试验方法.本文在对试验方法进行研究的基础上,对 GFRP 筋的抗压力学性能进行了研究.

1 试验方法

GFRP 筋抗压加载设备采用普通液压材料试验机,手动控制加载.加载采用力加载方式,加载率约为 10 kN/min.试件安装后,加载直至破坏.试验记录破坏荷载及试件破坏形式.

GFRP 筋由南京奥沃科技发展有限公司生产提供,为全螺纹玻璃纤维增强塑料筋.试验用 GFRP 筋直径为 17 mm,树脂含量为 25%,玻璃纤维含量为 75%.

试件分端部加套管和不加套管 2 种形式,部分试件见图 1.

对比试验结果表明,不加套管试件在较大的长度范围受压破坏时总是在端部发生局部破坏,承载力与试件长度无关,趋于一定值;而加套管试件,因端部受到保护,试验结果合理.最后确定, GFRP 筋抗压试验试件采用端部加套管方案.

正式试验试件的长度从 50 mm 到 550 mm,以约 50 mm 递进,共计 35 个试件.试件端部套管采用镀锌钢管,根据 GFRP 筋的直径选择其规格,内径比 GFRP 筋的直径大 1~2 mm,壁厚 2.5 mm,长度取 20 mm.

收稿日期:2007-08-17

基金项目:广东省交通科技项目(2004-17)

作者简介:周继凯(1970—),男,安徽全椒人,副教授,博士,主要从事结构工程研究.



图 1 受压试件类型

Fig.1 Type of compression specimens

2 试验结果与分析

2.1 破坏形式

GFRP 筋试件抗压试验破坏形式与试件长度有关,可分为纵向裂开、压碎、弯折和弯曲 4 种,如图 2 所示.试件在破坏过程中会发出响声.

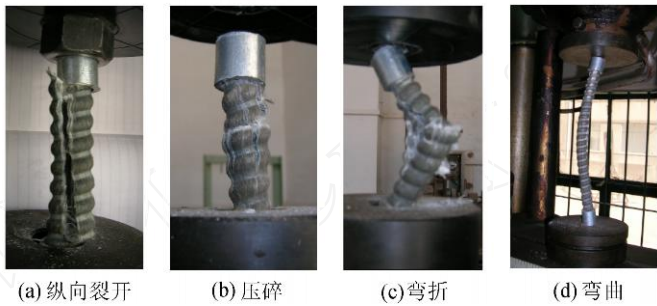


图 2 GFRP 筋受压破坏形式

Fig.2 Failure modes of compression GFRP rebars

2.2 破坏荷载

对不同长度的 GFRP 筋进行了抗压试验,得出了其破坏荷载和极限抗压强度,见表 1.

表 1 抗压试验结果

Table 1 Results of compression tests									
试件编号	试件长度/ cm	破坏形式	破坏荷载/ kN	破坏应力/ MPa	试件编号	试件长度/ cm	破坏形式	破坏荷载/ kN	破坏应力/ MPa
Gl706-1	5.7	压碎	50.70	223.35	Gl730-2	30.0	弯曲	15.93	70.18
Gl706-2	6.0	裂开	51.60	227.31	Gl730-3	30.8	弯曲	17.40	76.65
Gl706-3	6.1	压碎	49.00	215.86	Gl735-1	35.1	弯曲	14.10	62.12
Gl706-4	6.3	裂开	48.60	214.10	Gl735-2	35.2	弯曲	13.40	59.03
Gl710-1	9.8	压碎	44.00	193.83	Gl735-3	35.0	弯曲	16.20	71.37
Gl710-2	10.4	压碎	39.80	175.33	Gl740-1	40.2	弯曲	9.20	40.53
Gl710-3	10.7	压碎	40.00	176.21	Gl740-2	40.9	弯曲	11.10	48.90
Gl715-1	14.9	弯折	32.82	144.58	Gl740-3	40.8	弯曲	8.40	37.00
Gl715-2	15.0	弯折	34.10	150.22	Gl745-1	45.1	弯曲	6.20	27.31
Gl715-3	15.3	弯折	39.59	174.41	Gl745-2	45.4	弯曲	6.10	26.87
Gl720-1	19.5	弯曲	26.00	114.54	Gl745-3	45.3	弯曲	6.40	28.19
Gl720-2	19.7	弯曲	29.75	131.06	Gl750-1	50.3	弯曲	4.10	18.06
Gl720-3	20.1	弯曲	32.00	140.97	Gl750-2	50.1	弯曲	4.40	19.38
Gl720-4	20.9	弯曲	27.30	120.26	Gl750-3	49.9	弯曲	4.20	18.50
Gl725-1	24.4	弯曲	22.80	100.44	Gl755-1	55.1	弯曲	4.10	18.06
Gl725-2	24.9	弯曲	26.75	117.84	Gl755-2	55.3	弯曲	5.20	22.91
Gl725-3	25.3	弯曲	27.00	118.94	Gl755-3	55.0	弯曲	2.40	10.57
Gl730-1	29.5	弯曲	19.10	84.14					

极限抗压强度计算公式为

$$\sigma_c = \frac{4 P_c}{\pi D^2}$$
 (1)

式中： σ_c ——极限抗压强度； P_c ——试件破坏时的最大荷载； D ——试件工作段公称直径。

2.3 结果分析

大量试验表明,压杆因柔度(长细比) λ 不同会发生 3 种破坏:强度破坏、非弹性失稳破坏和弹性失稳破坏^[11]。

2.3.1 强度破坏

当压杆柔度 $\lambda <$ 临界柔度 λ_u 时,此压杆为小柔度杆,即短杆.发生的破坏实际上是强度破坏.

2.3.2 弹性失稳破坏

当压杆柔度 $\lambda \geq$ 临界柔度 λ_p 时,此压杆为大柔度杆,即细长杆.发生的破坏实际上是弹性失稳破坏.可用欧拉公式计算临界应力.

2.3.3 非弹性失稳破坏

当 $\lambda_p > \lambda > \lambda_u$ 时,此压杆为中柔度杆,即中长杆.发生的破坏实际上是非弹性失稳破坏.失稳时的临界应力 σ_{cr} 大于比例极限应力 σ_p ,临界力和临界应力均不能用欧拉公式计算.

对于这种非弹性失稳的压杆,已有一些理论分析的结果.但工程中一般采用以试验结果为依据的经验公式来计算这类压杆的临界应力 σ_{cr} ,并由此求得临界力.

为了便于数据处理,将各组试验结果取平均后列于表 2.

确定 GFRP 筋极限抗压强度,需要清楚地了解各类压杆的 σ_{cr} 与 λ 之间的关系.通过试验数据的分析,可以绘制抗压极限强度设计曲线,如图 3 所示.

由图 3 可知,GFRP 筋受压破坏形式也可以划分为 3 种,即强度破坏、非弹性失稳破坏和弹性失稳破坏.试验得出的 GFRP 筋的 $\lambda_p = 70, \lambda_u = 11, \sigma_{cr} = 220 \text{ MPa}, \sigma_p = 76 \text{ MPa}$.

在强度破坏阶段,本次试验材料 GFRP 筋的轴心极限抗压强度为 220 MPa,适用于 GFRP 筋受到混凝土良好约束后的强度特征值的取用.

在非弹性失稳破坏阶段,拟合得直线方程,方程中的 σ_{cr} 与 λ 呈直线关系,其表达式为

$$\sigma_{cr} = a - b\lambda$$
 (2)

式中 a, b 为与材料有关的常数,由试验确定.对于本试验结果,GFRP 筋 $a = 246.23 \text{ MPa}, b = 2.42 \text{ MPa}$.

式(2)只能在下述范围内使用:

$$\sigma_p < \sigma_{cr} < \sigma_u$$
 (3)

在弹性失稳破坏阶段,其临界应力符合欧拉公式

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$
 (4)

式中： E ——抗压弹性模量,拟合数据得 $E = 38.78 \text{ GPa}$,相关系数为 0.985 4.

相同条件下该 GFRP 筋的极限抗拉强度为 402.03 MPa,抗拉弹性模量为 33.35 GPa.抗压试验中,GFRP 筋极限抗压强度为 220 MPa,约为极限抗拉强度的 55 %;抗压弹性模量为 38.78 GPa,比抗拉弹性模量大.

表 2 抗压试验结果的均值

Table 2 Mean results of compression tests

试件组	平均长度/ cm	平均柔度	平均破坏 应力/MPa
Gl706	6.0	14.18	220.16
Gl710	10.3	24.24	181.79
Gl715	15.1	35.45	156.40
Gl720	20.1	47.18	126.71
Gl725	24.9	58.51	112.41
Gl730	30.1	70.83	76.99
Gl735	35.1	82.59	64.17
Gl740	40.6	95.61	42.14
Gl745	45.3	106.51	27.46
Gl750	50.1	117.88	18.65
Gl755	55.1	129.73	17.18

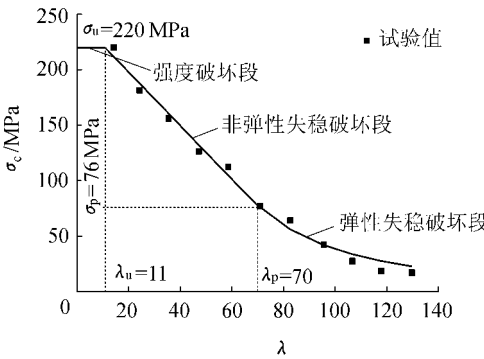


图 3 GFRP 筋抗压极限强度设计曲线

Fig.3 Design curve of ultimate compressive strength of GFRP rebars

3 结 论

通过试验研究了 GFRP 筋受压时的力学性能,并得到如下结论:

- a. GFRP 筋抗压极限强度设计曲线可划分为 3 段,即强度破坏段、非弹性失稳破坏段和弹性失稳破坏段;
- b. GFRP 筋极限抗压强度小于极限抗拉强度,约为极限抗拉强度的 55 %;
- c. GFRP 筋抗压弹性模量比抗拉弹性模量大;
- d. 在进行 GFRP 筋抗压力学性能试验时,为防止局部破坏,试件端部应有良好的约束;
- e. 为确定极限抗压强度设计曲线,应进行试件柔度对临界应力的影响试验。

参考文献:

- [1] ACI Committee 440 ,Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars[S].
- [2] DEITZ D ,HARIK I E ,GESUND H. GFRP reinforced concrete bridge decks [R].Lexington : University of Kentucky ,2000.
- [3] 龚永智. FRP 筋混凝土柱的研究进展[J]. 建筑技术 ,2006 ,37(11) :836-838.
- [4] 张新越,欧进萍. FRP 加筋混凝土短柱受压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版 ,2006 ,38(4) :467-472.
- [5] 赵国藩. 混凝土及其增强材料的发展与应用[J]. 建筑材料学报 ,2000 ,3(1) :1-6.
- [6] 薛伟辰,康清梁. 纤维塑料筋在混凝土结构中的应用[J]. 工业建筑 ,1999 ,29(2) :19-21.
- [7] 周继凯,杜钦庆,吕娇云,等. 玻璃纤维增强复合材料筋材连接试验研究[J]. 玻璃钢/ 复合材料 ,2006(5) :24-27.
- [8] 周继凯,杜钦庆,陈礼和,等. GFRP 筋拉伸力学性能尺寸效应试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版 ,2008 ,36(2) :242-247.
- [9] 刘汉东,于新政,李国维. GFRP 锚杆拉伸力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 ,2005 ,24(20) :3719-3723.
- [10] 李国维,黄志怀,张丹,等. 玻璃纤维增强聚合物锚杆承载特征现场试验[J]. 岩石力学与工程学报 ,2006 ,25(11) :2240-2246.
- [11] 徐道远,朱为玄,王向东. 材料力学[M]. 南京:河海大学出版社 ,2006.

Experimental study on compressive mechanical properties of GFRP rebars

ZHOU Ji-kai, DU Qin-qing, YUAN Ming-liang, LI Gen-xin

(College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract: Compression experiments were performed on GFRP rebars , and the compressive mechanical properties of GFRP rebars with different slenderness ratios were investigated. The results show that compressive failure modes can be classified as strength failure , non-elastic buckling and elastic buckling. It is also concluded that the ultimate compressive strength of GFRP rebars is about 55 % of the ultimate tensile strength , and that the compressive elastic modulus is higher than the tensile elastic modulus. It is also indicated that the ends of the rebars should be well restricted during testing to prevent local failure , and additional studies should investigate the relationship between the slenderness ratio and critical stress in order to determine the design curve of ultimate compressive strength.

Key words: glass fiber reinforced plastic (GFRP) ; compression test ; mechanical properties ; slenderness ratio ; buckling