

GFRP 筋拉伸力学性能尺寸效应试验研究

周继凯 杜钦庆 陈礼和 马晓辉

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 通过试验研究不同直径玻璃纤维增强复合材料(GFRP)的力学性能,并采用基于材料强度 Weibull 分布的最弱链理论分析其尺寸效应.试验结果表明,GFRP 筋极限抗拉强度、抗拉弹性模量和极限延伸率随着直径增大而下降,而屈服应变变化规律则相反.通过试验分析,建立考虑直径变化的 GFRP 筋应力应变关系及其相关参数同直径的关系;提出了不同直径 GFRP 筋极限抗拉强度 f_{Du} 计算公式.基于最弱链理论分析,得出 GFRP 筋尺寸效应的主要影响因素是试件的有效区体积.研究表明,GFRP 筋拉伸力学性能具有明显的尺寸效应;采用最弱链理论进行尺寸效应分析是可行的,能够预测不同 GFRP 筋强度,确定其抗拉强度标准值,有助于统一 GFRP 筋试件的有效长度取用标准,并建议长度范围为试件直径的 30~40 倍.

关键词 玻璃纤维增强塑料;拉伸试验;力学性能;尺寸效应;最弱链理论;Weibull 分布

中图分类号 :TU377.9

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2008)02-0242-06

玻璃纤维增强复合材料(GFRP)是一种由树脂和玻璃纤维复合组成的新型材料,具有比强度高、抗冲击性能好、耐腐蚀、非磁性等优点.在混凝土结构中使用 GFRP 筋代替钢筋,是解决钢筋锈蚀行之有效的方法,已应用于桥梁、水工建筑物、海港码头、煤巷临时加固以及永久边坡加固工程中^[1-3].

尺寸效应是脆性和准脆性材料的基本特性^[4].对 GFRP 筋而言,尺寸效应主要表现为强度随构件尺寸的增大而减小,这与钢筋截然不同,已引起工程界的注意.由于 GFRP 筋应用时间较短,相关的尺寸效应研究较少,主要局限于试验结果的拟合,缺乏理论性分析^[5-6].

在设计时,针对不同直径的 GFRP 筋,通过试验测试其强度等力学特性.但因其强烈的尺寸效应,不同的试验方法得出的结果与实际应用可能差别较大.如试件的长度与直径的关系至今尚未形成统一的认识^[7].国内外关于 GFRP 筋拉伸试验标准很少,也没有得到公认.因此详细研究 GFRP 筋力学性能的尺寸效应十分必要,将为今后规范试验方法提供基础.本文采用不同直径 GFRP 筋,通过试验研究了其拉伸力学性能尺寸效应.

1 最弱链理论

统计强度理论或统计最弱链理论多年来为传统脆性断裂研究奠定了基础.最弱链概念由 Pierce 提出^[8],并用公式表达了最弱链模型.最弱链理论假定材料由许多小的单元组成,当材料中任一单元或“链”失效即认为破坏.每个“链”应力自 0 到 σ 失效的概率可以采用分布函数 $F(\sigma)$ 来描述:

$$F(\sigma) = 1 - \exp(-\varphi(\sigma)) \quad (1)$$

Weibull(1939)得出了一个至关重要的结论:具有极小概率的极小强度的尾分布(tail distribution)不能用现有的任何分布加以描述.这种分布后来在统计学中称为 Weibull 分布^[8-10]:

$$\varphi(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \quad (2)$$

式中: σ_u ——阈值应力,低于此应力不会发生破坏,显然不承受荷载构件就不会破坏, σ_u 取 0; σ_0 , m ——比例参数和形参数.

将试件体积内每个小单元体积看作为“链”,推导出试件破坏的概率:

$$F_V(\sigma) = 1 - \exp\left[-V\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$
 (3)

为了描述实验数据方便,将式(3)取 2 次对数后重新排列,表达成线性形式:

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F_V(\sigma)}\right)\right] = m\ln\sigma - m\ln\sigma_0 + \ln V$$
 (4)

σ_0 和 m 可以通过试验数据分析获得.对于已知体积的材料,如果其强度变化能够采用 Weibull 分布描述,式(4)右端可以绘制成直线, m 是直线的斜率, σ_0 是直线与 y 轴的交点.

当材料强度符合 Weibull 分布,其试件或构件的强度与尺寸大小存在相关性.假定比例参数 σ_0 和形参数 m 与试件尺寸及应力状态无关的材料常数,应用式(4),对于破坏概率相同的具有相同应力分布的 2 个试件有如下关系:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{m}}$$
 (5)

式(5)直接将强度与材料体积联系在一起,使尺寸效应得到量化.应力与体积的对数呈线性关系,斜率等于 $-1/m$,见图 1.

2 试验方案

本文试验目标是测试 GFRP 筋在 20℃下极限抗拉强度、弹性模量、极限伸长率等力学指标,从而获得 GFRP 筋在不同温度条件下的力学性能变化规律.

2.1 试验材料

GFRP 筋由南京奥沃公司生产提供,为全螺纹中强度玻璃纤维增强塑料筋.试验用 GFRP 筋直径分别为 10 mm 和 17 mm,树脂质量分数为 25%,玻璃纤维质量分数为 75%,其成型工艺及控制措施相同.

黏结剂为双组分冷固化触变环氧树脂类黏结剂,强度高,对多数材料黏合力良好,防水和抗化学腐蚀能力强,收缩率小,常用于混凝土结构的加固工程.

钢管规格根据 GFRP 筋的直径选择,要求内径比其直径大 3~6 mm,壁厚不小于 2.5 mm.

2.2 试验设备

试验加载设备采用 MTS322 电液伺服静动万能试验机,如图 2 所示.

采集系统由 2 部分组成:MTS 实验系统和计算机测量应变系统.计算机测量应变系统采用 TS 3890 型静态应变测量处理仪.

试件的轴向拉伸采用 NCS-YYU-10/200 型电子引伸计来量测.应用电阻应变式原理的简支梁结构制作,标距 200 mm,最大变形量为 10 mm,误差为 0.104%.

2.3 试验步骤

2.3.1 制备试件

采用环氧树脂黏结剂将钢管和 GFRP 筋连接.试件取直径为 10 mm 和 17 mm 2 种,长度分别为 1 000 mm 和 1 200 mm.两端外包钢管,每端钢管长 300 mm,采用环氧树脂填充养护一定时间后进行试验^[1].由于黏结剂灌注质量不易保证,直径 17 mm 的试件易发生滑移破坏,后来采用剖开钢管以提高黏结质量.钢管沿长度方向被分为两部分,用环氧树脂剖开钢管和 GFRP 筋胶结起来.

2.3.2 拉伸试验

加载采用位移加载方式,加载应变率约为 $5 \times 10^{-5} s^{-1}$.试验测定极限抗拉强度、弹性模量和极限延伸率等力学指标.

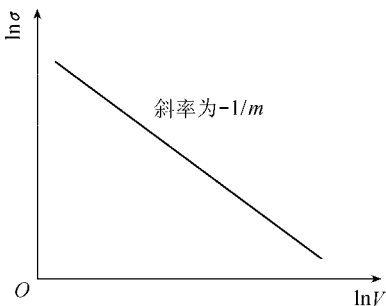


图 1 强度尺寸效应对数
Fig.1 Logarithmic plot
of size effect of strength



图 2 试验设备
Fig.2 The test equipment

3 试验结果与分析

3.1 破坏形态

试件的破坏形态有 2 种 (a)试件断裂,是有效破坏形态 (b)试件端部锚具与试件的黏结强度不足,试件滑移出锚具,是无效破坏形态。

试件在加载过程中,当加载到极限荷载的 20% ~ 30% 时,试件会因损伤而持续发出清脆响声;当加载到极限荷载的 60% ~ 70% 时,响声增大而渐密,最后突然发出很大的断裂声,试件陡然破坏。试件在加载到极限荷载约 50% 时,表面出现白斑状裂纹。试件有效破坏也分 2 种形态,常见的是试件在较大范围内发生片状裂开,失去承载能力;另一种为试件在某一断面断裂而失去承载能力,这种破坏形态比较少见。



图 3 试件破坏形式
Fig.3 The failure mode of specimen

试件破坏均表现为脆性破坏,如图 3 所示。

3.2 应力应变关系

不同直径 GFRP 筋拉伸应力应变试验结果见表 1。根据实测结果,绘制 GFRP 筋试验应力应变曲线。直径为 10mm 和 17mm 的 GFRP 筋应力应变曲线见图 4。应力应变曲线呈现双折线特征,有明显的屈服点。试验结果显示,随着直径的增大,GFRP 筋的抗拉弹性模量和延伸率均在降低,屈服应变却增加。

表 1 试件的 E_0 、 E_1 、 ϵ_y 、 ϵ_u 值
Table 1 E_0 、 E_1 、 ϵ_y 、 ϵ_u of specimens

试件组	E_0 /GPa	E_1 /GPa	ϵ_y	ϵ_u
G10I20	37.57	25.37	0.0068	0.016
G17I20	34.10	21.42	0.0075	0.014

经拟合得到 GFRP 筋受拉试验双折线应力应变关系,见式 (6),其参数见表 1。

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \epsilon & (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_y) \\ E_1 \epsilon & (\epsilon_u > \epsilon > \epsilon_y) \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_0 ——GFRP 筋屈服前抗拉弹性模量, GPa;
 E_1 ——GFRP 筋屈服后抗拉切线弹性模量, GPa。

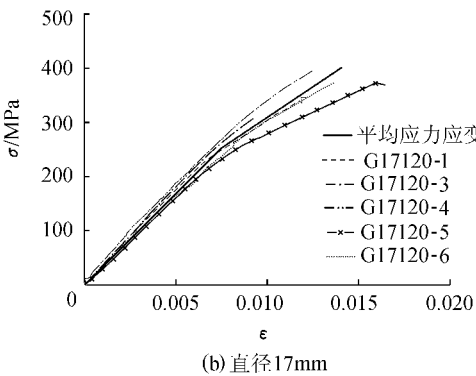
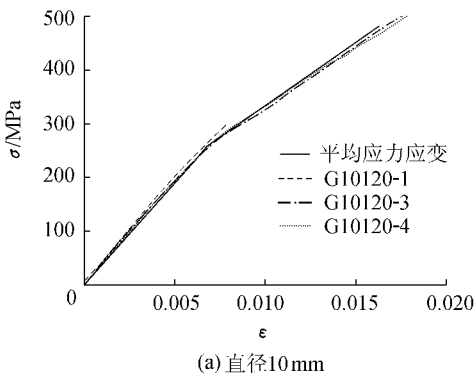


图 4 GFRP 试件应力应变曲线
Fig.4 The stress-strain relationships of GFRP specimens

试件的直径与抗拉弹性模量、屈服应变、极限延伸率的变化规律为幂函数形式,对其进行回归分析,得出其抗拉弹性模量、屈服应变、极限延伸率和直径的关系式如下:

$$E_{D0} = 58.83 D^{-0.20} \quad (7)$$

$$E_{D1} = 52.88 D^{-0.32} \quad (8)$$

$$\epsilon_{Dy} = 0.004445 D^{0.1846} \quad (9)$$

$$\delta_D = 3.15 D^{-0.29} \quad (10)$$

式中: E_D ——抗拉弹性模量; ϵ_{Dy} ——屈服应变; δ_D ——极限延伸率; D ——GFRP 筋试件直径, mm。

考虑直径影响的应力应变关系.试验结果表明 GFRP 筋的应力应变关系因直径不同而变化.通过本文的拟合分析,建立了考虑直径影响的应力应变关系:

$$\sigma_D = \begin{cases} E_{D0}\varepsilon_D & 0 \leq \varepsilon_D \leq \varepsilon_{Dy} \\ E_{D1}\varepsilon_D & \varepsilon_{Du} > \varepsilon_D > \varepsilon_{Dy} \end{cases} \tag{11}$$

3.3 极限抗拉强度

不同直径的 GFRP 筋极限抗拉强度见表 2.对直径和极限抗拉强度关系进行回归分析,并得出考虑直径影响的试件极限抗拉强度 f_{Du} 拟合公式,变化规律为幂函数形式:

$$f_{Du} = 1047.89D^{-0.34} \tag{12}$$

利用式(12)预测直径为 15 mm 和 22 mm GFRP 筋的极限抗拉强度分别为 417.30 MPa 和 366.35 MPa.

4 GFRP 筋强度尺寸效应分析

GFRP 筋是一种复合材料,其极限抗拉强度由于受工艺、环境等因素的影响,在材料表面和内部不可避免地存在许多缺陷(微裂缝、刻痕等),材料的极限抗拉强度往往取决于这些随机分布的缺陷中最薄弱的环节^[12].随着试件直径的增大,其随机分布的缺陷也会增多,相应的强度有所下降.这种材料特性与最弱链理论假定非常相符.假定 GFRP 筋强度分布符合 Weibull 分布律,就能够进行 GFRP 筋强度尺寸效应分析.

4.1 确定参数 σ_0 和 m

试验采用的直径 10 mm GFRP 筋试件有效区长度为 400 mm,是直径的 40 倍,体积为 31 416 mm³,极限抗拉强度为 481.04 MPa.直径 17 mm GFRP 筋试件有效区长度分别为 600 mm,为直径的 35.3 倍,体积为 136 188 mm³,极限抗拉强度为 402.03 MPa.绘制体积-极限抗拉强度对数关系见图 5.拟合直线方程为

$$\ln \sigma = 7.4427 - 0.1223 \ln V \tag{13}$$

由式(13)得到 $\sigma_0 = 1\,707.4$ MPa, $m = 8.18$.

4.2 预测 GFRP 筋强度

假定 GFRP 筋试件长度是其直径的 40 倍,将 m 和体积代入式(5),就能够预测出极限抗拉强度.

直径 15 mm GFRP 筋极限抗拉强度为

$$\sigma_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{m}} \sigma_1 = \left(\frac{31\,416\,\text{mm}^3}{106\,029\,\text{mm}^3}\right)^{0.1223} 481.04\,\text{MPa} = 414.55\,\text{MPa}$$

直径 22 mm GFRP 筋极限抗拉强度为

$$\sigma_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{m}} \sigma_1 = \left(\frac{31\,416\,\text{mm}^3}{334\,517\,\text{mm}^3}\right)^{0.1223} 481.04\,\text{MPa} = 360.20\,\text{MPa}$$

计算结果与式(12)拟合得出的强度几乎相等,可见基于强度符合 Weibull 分布律的最弱链理论分析 GFRP 筋强度尺寸效应是可行的.

4.3 确定 GFRP 筋强度标准值

基于最弱链理论,由试验数据得出参数 σ_0 和 m ,能够计算试件在某种应力水平破坏的概率.将 σ_0 和 m 计算数值代入式(3),得

$$F_1(\sigma) = 1 - \exp\left[-V\left(\frac{\sigma}{1\,707.4\,\text{MPa}}\right)^{8.18}\right] \tag{14}$$

当前试验的 2 种直径试件破坏的概率相等,均为 63%.

表 2 试件极限抗拉强度

Table 2 The tensile ultimate strength of specimens

试件编号	直径/mm	极限抗拉强度/MPa	极限抗拉强度平均值/MPa	变异系数
G10120-1	10	413.66	481.04	0.1241
G10120-3		502.11		
G10120-4		527.35		
G17120-1	17	379.69	402.03	0.0749
G17120-3		416.66		
G17120-4		394.80		
G17120-5		372.38		
G17120-6		446.60		

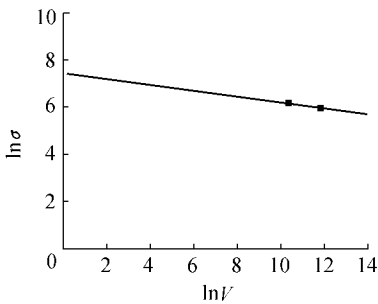


图 5 强度和体积对数关系
Fig.5 Logarithmic plot of strength and volume

如果取强度保证率为 95% ,按式(14)计算出直径 10 mm 和 17 mm GFRP 筋抗拉强度标准值分别为 334.64 MPa 和 279.69 MPa ,相当于其极限抗拉强度的 70% .

4.4 试件合理长度的讨论

由最弱链理论分析 GFRP 筋尺寸效应的影响因素主要是试件的有效区体积 ,不仅包含 GFRP 筋的直径 ,还有试件的长度 .为了设计取用的 GFRP 筋抗拉强度保证率在同一水准上 ,必须统一试件的长度取用标准 .建议试件长度是 GFRP 筋直径的倍数 ,这样 ,GFRP 筋尺寸效应的影响因素归一为直径 .

按本文试验水准 ,利用式(5)分别计算出长度为直径(10 mm)不同倍数的极限抗拉强度 ,结果如表 3 所示 .

表 3 不同长度 GFRP 筋极限抗拉强度
Table 3 The tensile ultimate strength of GFRP rebars of different length

试件有效长度	10D	20D	30D	40D	50D	60D	70D	80D
极限抗拉强度/MPa	570	524	498	481	468	458	449	442

由表 3 可看出 ,随着长度的增加强度在减少 ,且差值也越小 .长度 30D 时强度与 20D 和 40D 时强度相比 ,强度差值分别达到 5.1% 和 3.5% .而长度 40D 时强度与 30D 和 50D 时强度相比 ,强度差值分别达到 3.6% 和 2.7% .当长度不小于 30D 时 ,试件制作长度相差不大则对实测强度影响不大 .为了符合实际情况 ,尽可能设计试件的有效长度大一些 ,还要考虑试验的可行性 .限于设备的空间 ,试件长度不能过大 .试件长度由有效长度和两端锚固长度组成 .两端锚固总长度大约可取 35D .建议试件有效长度为 30D ~ 40D .

5 结 语

- GFRP 筋拉伸试验尺寸效应研究主要成果有 :
- a. GFRP 筋力学性能具有明显的尺寸效应 ;
 - b. 试验获得了 GFRP 筋极限抗拉强度、应力应变关系与直径的相关性公式 ;
 - c. 基于 GFRP 筋强度符合 Weibull 分布律的最弱链理论进行尺寸效应分析是可行的 ;
 - d. 基于最弱链理论能够预测不同 GFRP 筋强度 ,确定其抗拉强度标准值 ;
 - e. GFRP 筋尺寸效应的主要影响因素是试件的有效区体积 ;
 - f. 建议统一 GFRP 筋试件的有效长度取用标准 ,范围为试件直径的 30 ~ 40 倍 .

本文讨论的是实验室试件尺度范围的尺寸效应 ,GFRP 筋在结构大构件上应用时材料力学性能尺寸效应应引起关注 .

参考文献 :

[1] 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 ,2(1) :1-6.
[2] 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.
[3] 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.
[4] 李勇 ,郑建军 ,金贤玉 . Bazant 尺寸效应律分析及其应用[J]. 混凝土 ,2003(2) :35-36.
[5] 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.
[6] 郑乐怡 ,罗毅 ,黄培彦 . 玻璃纤维筋断裂强度的理论和实验研究[J]. 机械强度 ,2004 ,26(5) :104-106.
[7] ACI Committee 440 ,Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bar[S].
[8] SUTHERLAND L S ,SHENOI R A ,LEWIS S M . Size and scale effects in composites .1. Literature review[J]. Composites Science and Technology ,1999 ,59 :209-220.
[9] BAZANT Z P ,CHEN Er-ping . Scaling of structural failure[J]. Applied Mechanics Reviews ,1997 ,50(10) :593-627.
[10] WISNOM M R .Size effects in the testing of fiber-composite material[J]. Composites Science and Technology ,1999 ,59 :1937-1957.
[11] 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.
[12] 曾庆敦 . 复合材料的细观破坏机制与强度[M]. 北京 :科学出版社 ,2002.

Experimental study on size effect in tensile mechanical properties of GFRP rebar

ZHOU Ji-kai , DU Qin-qing , CHEN Li-he , MA Xiao-hui

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

Abstract : The mechanical properties of GFRP rebars with different diameters were studied experimentally , and the weakest link theory , which is based on the Weibull distribution of material strength , was used to analyze the size effect . The experimental results indicate that the ultimate tensile strength , tensile modulus of elasticity and ultimate elongation percentage decrease as the diameter increases , while the change of the yield strain is the reverse . According to the experimental analysis , the stress-strain relationship of GFRP rebars , taking the diameter variety into account , and the relationship between relevant parameters and diameter were developed . Simultaneously , a formula to calculate the ultimate tensile strength f_{Du} of GFRP rebars with different diameters was presented . Based on the analysis using weakest link theory , it is presented that the main contributing factor of the size effect of GFRP rebar is the volume of effective region . The size effect on tensile mechanical properties of GFRP rebar is obvious and can be analyzed using weakest link theory . The strength of different GFRP rebars can be predicted as well as the standard value of strength , which will help standardize the effective length of GFRP specimens . The recommended effective length of specimen was 30 to 40 times the diameter of GFRP rebar .

Key words : GFRP ; tensile test ; mechanical properties ; size effect ; weakest-link theory ; Weibull distribution

.....

《河海大学学报(哲学社会科学版) 》征订启事

(CN32 - 1521/C , ISSN1671 - 4970 , 季刊 , 自办发行)

《河海大学学报(哲学社会科学版) 》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导 , 坚持实事求是的思想路线 , 贯彻“双百”方针 , 弘扬时代主旋律 , 理论联系实际 , 为社会主义物质文明与精神文明建设服务 .

《河海大学学报(哲学社会科学版) 》为哲学与社会科学类学术期刊 , 主要刊登哲学、政治学、文学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章 . 本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考 . 《河海大学学报(哲学社会科学版) 》为中国学术期刊(光盘版) 入编期刊与中国学术期刊网入编期刊 .

《河海大学学报(哲学社会科学版) 》由河海大学主办 , 每季末出版 , 国内外公开发行 . 2008 年每本定价 5 元 , 每本邮费 1 元 , 全年订费 24 元 . 欢迎广大读者直接向编辑部订阅 . 联系地址 : 南京市西康路 1 号《河海大学学报(哲学社会科学版) 》编辑部 , 邮政编码 210098 . 联系电话 025-83786376 .