

GFRP 锚杆拉伸力学性能试验研究

刘汉东¹, 于新政¹, 李国维²

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450008; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 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材料, 具有较好的力学和耐腐蚀性能, 在钢筋混凝土中用其代替钢筋可以解决耐久性问题。由于材料容易脆断, 对于大直径的 GFRP 锚杆, 试验机夹头夹持不住, 导致直接拉伸试验很难成功, 常用的方法是加工成小直径试件。采用 $\phi 10$, $\phi 13$, $\phi 15$ 几种不同直径的 GFRP 锚杆试件进行试验, 然后用回归方法预测大直径 $\phi 32$ 试件力学指标, 从而试图避免试件加工造成的影响。通过拉伸试验, 研究了 GFRP 锚杆基本力学指标, 画出了应力-应变关系曲线, 讨论了其基本破坏形态。与普通钢材比较具有强度高、脆性破坏的特征, 应力-应变曲线呈直线型。同时, 与螺纹钢的力学性能指标和经济指标进行了比较, GFRP 锚杆显示了优越的力学性能和良好的性价比。通过试验证实, GFRP 锚杆具有强度高、与混凝土变形协调性好等力学性能, 如果替代钢材锚杆应用于边坡永久加固工程, 将具有广阔的应用前景。

关键词: 岩石力学; 玻璃纤维增强塑料锚杆; 拉伸试验; 力学性能; 性价比

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)20-3719-05

EXPERIMENTAL STUDY ON TENSILE MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC REBAR

LIU Han-dong¹, YU Xin-zheng¹, LI Guo-wei²

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, China;

2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The glass fiber reinforced plastic(GFRP) rebar is a kind of material formed with resin and glass fiber compound, with good mechanical properties and excellent corrosion resistance. The problem of durability of concrete can be solved if steel bars are substituted with GFRP rebar. Because GFRP rebar is easy to fracture, the chuck of testing machine can not hold big diameter sample, and the direct tensile test is difficult to perform. The commonly used method is processing into the small diameter sample and carrying on the test. Different diameter samples $\phi 10$, $\phi 13$, $\phi 15$ are tested; then the regression analysis for forecasting the mechanical properties of big diameter sample $\phi 32$ is implemented to avoid the influence caused by processed samples. The tensile test of the GFRP rebar is carried out; and the stress-strain curve and the failure modes of GFRP rebar are discussed. High strength and brittle failure are the most characters of GFRP rebar; and the stress-strain curve of GFRP rebar is found to be linear. Compared with the mechanical properties and prices between GFRP rebar and ribbed steel bars, the good mechanical properties and high performance/cost ratio of GFRP rebar can be testified. Meanwhile, the high strength of GFRP rebar and the good distortion coordination with concrete are testified. GFRP rebar can be used for slope engineering reinforcement in practice.

Key words: rock mechanics; glass fiber reinforced plastic(GFRP) rebar; tensile test; mechanical properties; performance/cost ratio

收稿日期: 2005-06-14; **修回日期:** 2005-07-19

基金项目: 河南省创新人才基金资助项目(HNCX2001-08); 广东省交通科技项目(2004-17)

作者简介: 刘汉东(1963-), 男, 博士, 1993年毕业于中国科学院地质研究所地质工程专业, 现任教授, 主要从事地质工程、岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: lhd@ncwu.edu.cn.

1 引言

随着建筑物的老化和环境污染的加重,钢筋混凝土结构的耐久性问题越来越引起国内外学者的关注。在第二届国际混凝土耐久性会议上,文[1]指出,当今世界混凝土破坏原因,按递减顺序是:钢筋腐蚀、冻害、物理化学作用。钢筋腐蚀是影响混凝土耐久性的首要因素。美国1984年报道,仅就桥梁而言,57.5万座钢筋混凝土桥,一半以上出现钢筋腐蚀破坏,40%承载力不足,需要修复与加固处理,年修复费为54亿美元;1988年报道,钢筋混凝土腐蚀破坏的年修复费达2500亿美元,其中桥梁修复费为1550亿美元,是这些桥梁初建费用的4倍。在我国,已经发现许多海港码头的混凝土梁、板使用不到10a就已普遍出现顺筋锈胀开裂、剥落。特别是近年来,大气污染加重,许多地区酸雨降雨量加大,使得相当一部分建筑物在设计基准期内的安全受到威胁,需要花费大量的人力、物力去养护维修。

针对上述情况,人们提出了采用增强纤维材料(FRP)替代钢筋的思路。国外对FRP的研究已近半个世纪,日本、德国、美国、加拿大等国在该领域的研究和应用处于领先地位,对FRP及其加强混凝土进行了大量的试验研究,并在许多工程中推广使用,发挥了预期的优良性能。国内在这方面的研究工作刚刚起步,用纤维和胶结材所形成的树脂基复合材料在其他领域应用广泛。玻璃纤维增强螺旋筋材(GFRP rebar)是一种复合增强材料新产品,它采用纤维纱浸渍含有固化剂、促进剂等多种辅助剂的不饱和聚酯树脂等树脂胶液后,在拉挤机的牵引下,通过预成型模进入加热模具,在高温高压下固化成型。经表面处理缠绕螺旋状的浸渍,含有多种助剂的树脂胶液的玻璃纤维束,固化成型为全螺旋纤维增强塑料筋材。玻璃纤维增强塑料(GFRP)作为一种新型材料,具有良好的抗腐蚀性、耐久性好、抗拉强度高,等于甚至优于预应力钢筋;自重轻,只有预应力钢筋重量的15%~20%;低松弛性,荷载损失小;优良的抗疲劳特性等优点。目前已应用于桥梁、公路、混凝土加固中^[2, 3]。纤维增强塑料筋材的抗拉强度高,抗腐蚀,可以将GFRP筋材作为岩土锚杆,在岩土工程加固中使用。目前,国内已有厂家生产GFRP锚杆^[3],并用于煤巷临时加固中。但是,用于永久边坡加固工程还没有见到相关

报道,本文对国内生产的GFRP锚杆进行了基本力学性能试验研究,为其应用于赣粤高速公路K100段永久边坡加固工程可行性进行论证。

对大直径GFRP锚杆的拉伸力学性能试验,由于材料容易脆断,很容易在夹头部分破坏,国内现有的试验设备一般难以直接进行拉伸试验。目前,国内这种试验做的不多,相关规范都只适用于板材,而相关参考文献也较少。文[4]对 $\phi 25$ 的GFRP材料进行拉伸试验时,采用的方法是把试件加工成“哑铃”形状的小直径试件,然后进行拉伸,通过试验结果直接换算成原材料的力学性能。复合材料不同于金属材料那么均质,在产品加工过程或原材料本身的缺陷,在锚杆内部会形成“弱”纤维,在试验过程中,往往是其最终强度取决于这些“弱”纤维^[5]。在试件的加工过程中也会造成一些“弱”纤维,影响试件的强度。因此,单纯采用把试件加工成“哑铃”状,用小直径试件试验不太符合GFRP锚杆的实际情况。本文采用不同的直径进行分别试验,然后,用回归方法预测大直径锚杆的力学指标,从而试图减少试件的加工对其强度的影响。

2 试验方案

本次试验主要是测试GFRP锚杆的破坏荷载、极限抗拉强度、弹性模量、伸长率等基本力学指标。由于GFRP锚杆材料本身容易脆断,对大直径GFRP锚杆的常规拉伸试验一般很难成功。本次试验采用的试件分别为 $\phi 10$, $\phi 13$, $\phi 15$ 的GFRP锚杆试件,通过对不同直径的GFRP锚杆进行拉伸试验,并测出相应的力学指标,然后用回归方法预测 $\phi 32$ 大直径GFRP锚杆的力学指标。

2.1 试验材料

本次试验所采用的材料为南京沃奥有限公司生产的 $\phi 32$ GFRP螺旋状筋材,其中,树脂含量为28%,玻璃纤维含量为72%,密度为 2.2 g/cm^3 。

2.2 试件形状

GFRP筋材由于树脂抗压强度较小,试验机夹头与构件并非全面接触,构件拉伸时夹具压应力很大,如果直接夹持端头进行拉伸,往往会在受拉破坏之前发生端头压坏现象。所以,必须采取相应的措施,保证试件在拉伸试验时不会发生端头压坏现象。经过多次探索性试验,本次试验采用了把试件加工成哑铃形状。同时,试验过程中发现由于GFRP筋材螺旋纹的本身的硬度太低,加工成哑铃形状,

只能保证试件能够拉伸破坏。在拉伸过程中，端头夹持部分也容易遭到表层破坏产生滑移，使试验数据摆动较大，很难采集到有效数据。经过多次尝试性试验，发现对 GFRP 试件端部夹持部分粘贴 2 mm 厚铝板或者螺纹凹槽用铜丝缠绕的方法，能有效避免试件端头部分表层破坏滑移，使试验能够顺利进行。用铜丝缠绕相对较方便，本次试验采用铜丝缠绕的方法。试件具体形状如图 1 所示。

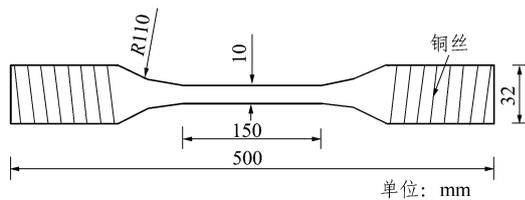


图 1 GFRP 锚杆拉伸试验试件示意图

Fig.1 Scheme of specimen size of GFRP rebar

2.3 试验器材及方法

试验采用液压万能试验机对试件进行拉伸试验，在试件标距中间对称粘贴 2 个应变片，外接静态电阻应变仪。然后，对试件稳定施加连续荷载，直至试件破坏，加载后每隔 2 kN 读应变值。

3 试验结果及分析

3.1 试验过程及试件破坏形态

试件的破坏形态分为 3 种：(1) 试件树脂拉裂，纤维部分拉断，整个试件破坏断面呈现“劈裂”破坏形式；(2) 试件端部夹持部位局部被夹断，试件滑移出夹头；(3) 试件从变截面处脱层，小直径部分直接从大直径部分中抽出，使大直径部分成为一个空心圆筒，呈现“层剪”破坏。其中，第 1 种破坏形态是有效破坏，第 2, 3 种破坏形态为无效破坏，在试验过程中，应避免出现这样的破坏，如果出现第 2, 3 种破坏形式应重做试验。

试件在破坏过程中，荷载值一直平稳在增大，到加载后期，开始能听到纤维剥离树脂的响声，加载到极限荷载的 80% 时，纤维剥离树脂的响声开始连续增大，此时，试件表面出现白斑状裂纹。随着荷载的继续施加，声音逐步连续增大，开始有纤维片断裂，但荷载能够继续增大，一直到试件完全破坏。

3.2 应力 - 应变曲线

根据试件 10-4 全过程的实测结果，绘出 GFRP 典型荷载 - 应变曲线(图 2)和应力 - 应变曲线(图 3)。

荷载 - 应变曲线在加载初期为一条通过原点的斜直线，后期稍微有一些波动，稍微偏离直线。对照其加载期间各级荷载作用下应变增量，在荷载值 $P \geq 80\%P_u$ 时，应变增量明显变大，开始发出声音，玻璃纤维的变形开始与环氧树脂基体的变形不一致，玻璃纤维开始脱离环氧树脂基体，部分纤维开始断裂，所承受的荷载由其临近的纤维承受，试件并没有破坏，直到纤维断裂较多，临近纤维不能再承受断裂纤维传递的荷载，试件破坏。这个过程表明，部分玻璃纤维的断裂对其强度的影响较小，也是其试件破坏后呈现“劈裂”式样的原因。

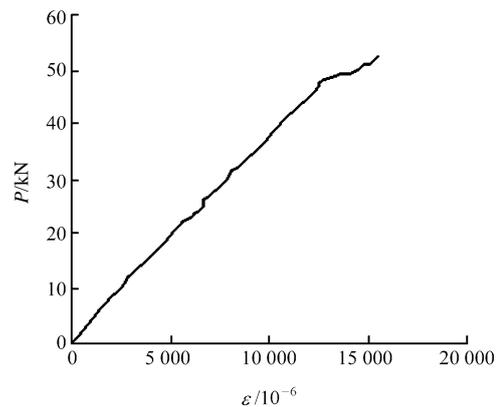


图 2 典型荷载 - 应变曲线

Fig.2 Relationship curve of load and strain

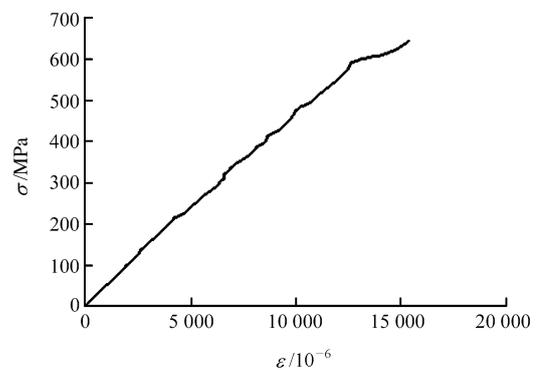


图 3 典型应力 - 应变曲线

Fig.3 Typical stress-strain curve

GFRP 锚杆的应力 - 应变曲线也没有明显的屈服点，整个试验过程基本是弹性变形，试件破坏是一种脆性破坏。分析试件破坏过程中的表现现象，发现其破坏过程中，没有“缩颈”现象，试件的破坏也不是突然断裂，而是部分纤维先断裂，随着荷载的施加，断裂的纤维逐渐增多，试件最终破坏。

3.3 强度

表 1 是拉伸试验得出的 GFRP 锚杆的主要力学

表 1 GFRP 锚杆拉伸试验结果

Table 1 Results of the tensile test of GFRP rebar

试件 标号	试件直径 D/mm	极限荷载 P _u /kN	极限抗拉强度 f _{pk} /MPa	弹性模量 E/GPa	延伸率 δ/%
10-1	10.17	54.0	694.27	50.14	1.51
10-2	10.26	57.2	691.30	48.64	1.43
10-3	10.23	53.2	647.58	46.23	1.62
10-4	9.99	61.2	790.17	47.78	1.65
10-5	10.15	52.0	643.41	47.02	1.54
13-1	13.08	84.0	626.87	47.83	1.45
13-2	13.11	92.0	681.48	45.02	1.56
13-3	13.03	94.0	706.77	47.86	1.48
13-4	13.25	88.0	710.14	47.59	1.91
13-5	13.17	90.0	661.76	49.85	1.47
15-1	15.22	122.0	670.33	47.91	1.56
15-2	15.23	132.2	725.27	47.71	1.40
15-3	15.40	122.0	655.91	47.02	1.52
15-4	15.12	125.4	650.00	47.82	1.34
15-5	14.97	120.0	681.82	47.87	1.42

指标, 为了探讨试件直径与力学指标之间的关系, 预测大直径试件的力学指标, 对试件的直径和极限荷载进行了回归分析, 得出其极限荷载和直径的关系式为

$$P_u = 558.24D^{1.98} \quad (1)$$

由上式可得回归相关系数 $R = 0.9737$ 。根据式(1)可预测 $\phi 32$ (实际直径为 $\phi 31$ mm)GFRP 锚杆的极限荷载为 504 kN, 其计算极限抗拉强度值为 $f = 668$ MPa。

同时, 对 GFRP 锚杆直径与其极限抗拉强度进行回归分析, 得出其极限抗拉强度与直径的关系式为

$$f_{pk} = 803.73D^{-0.06} \quad (2)$$

由上式可得回归相关系数 $R = 0.9802$, $p = 0.05$ 为显著性概率。

根据式(2)可以预测 $\phi 32$ 的大直径 GFRP 锚杆极限抗拉强度为 654 MPa。与通过式(1)计算的极限抗拉强度值 668 MPa 十分相近。GFRP 材料是一种复合材料, 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的存在许多缺陷(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^[5]。随着试件直径的增大, 其随机分布的缺陷也会增多, 所以相应的强度有所下降。

3.4 弹性模量

根据应力 - 应变曲线, GFRP 材料在整个受力过程中大部分阶段是线弹性材料, 因此, 弹性模量

为原点弹性模量。取加载初期弹性范围内 10 级荷载增量的应变增量, 原点弹性模量就可以由相应的应力除以应变增量得到。本次试验得到的原点弹性模量结果如表 1。为了得到大直径锚杆的弹性模量, 对试件的直径和弹性模量做一元回归分析, 得出其弹性模量和直径之间的关系为

$$E = 49.74D^{-0.016} \quad (3)$$

由上式可得回归相关系数 $R = 0.9912$ 。则可预测 $\phi 32$ 的大直径 GFRP 锚杆弹性模量为 47.08 GPa。

3.5 伸长率

伸长率是材料塑性的具体表征指标, 本次试验量测的伸长率如表 1 所示。为了得到大直径锚杆的伸长率, 对试件的直径和伸长率做一元回归分析, 得出其伸长率和直径之间的关系为

$$\delta = 2.17D^{-0.14} \quad (4)$$

由上式可得回归相关系数 $R = 0.9918$ 。则 $\phi 32$ 的试件伸长率为 1.34。通过回归预测得到的 $\phi 32$ GFRP 锚杆的主要力学性能如表 2 所示。

表 2 $\phi 32$ GFRP 锚杆的力学指标预测值

Table 2 Mechanical properties of $\phi 32$ GFRP rebar

试件直径 D/mm	极限荷载 P _u /kN	极限抗拉强度 f _{pk} /MPa	弹性模量 E/GPa	延伸率 δ/%
31	504	654	47.08	1.34

4 与钢材力学性能及经济性比较

根据试验结果, 将 GFRP 锚杆基本力学性能与普通碳素钢的基本力学性能进行对比分析, 为 GFRP 锚杆用于边坡加固工程进行可行性论证。

4.1 力学性能对比

边坡加固实际工程中经常使用钢材为热轧钢筋, 表 3 列出了 GFRP 锚杆试验结果与热轧钢筋力学性质的比较。GFRP 锚杆抗拉强度超过了热轧钢筋; 伸长率较热轧钢筋小, 塑性差; 弹性模量较热轧钢筋低, 比混凝土的弹性模量($E_s = 14.5 \sim 36.0$ GPa)大 2~3 倍, 因此, 其与混凝土的变形与钢筋相

表 3 GFRP 锚杆与热轧钢筋力学性质对比表

Table 3 Mechanical properties of GFRP rebar and steel

类别	屈服强度 f/MPa	弹性模量 E/GPa	伸长率 δ/%
GFRP	600	46.58	1.5
HPB235(I 级钢筋)	235	210.00	16.0
HRB335(II 级钢筋)	335	200.00	16.0
HRB400(III 级钢筋)	400	200.00	14.0
IV 级钢筋	540	200.00	10.0

比协调性较好。从两者的对比中, 可以看到 GFRP 锚杆具有较高的力学强度, 但是弹性模量低, 延伸率小, 塑性差, 并不适合在预应力很大的混凝土结构中使用。但是, 在小预应力或无预应力混凝土结构中是能够代替钢筋发挥作用的。

4.2 经济性对比

按照同截面尺寸的 GFRP 锚杆和钢筋的现行的市场价进行对比, 其中热轧钢取用 III 级螺纹钢, $\phi 32$ 的 GFRP 锚杆价格为 30 元/m, 热轧钢价格为 3 500 元/t, 钢材密度取 7.8 g/cm^3 , 则 $\phi 32$ 的螺纹钢折算成价钱为 21.7 元/m, 这样, GFRP 锚杆的价格稍微大一点。但是, 同截面的 GFRP 锚杆的强度要比钢筋大的多。如果考虑强度问题, 假定使用过程中拉伸力相等情况来比较两者价格, 由于 GFRP 锚杆极限抗拉强度是 HRB335(II 级钢筋)的 2 倍, 则明显 GFRP 锚杆占优势。随着技术的发展, GFRP 材料的性能会更加完善、优越, 其性价比的优越性也会更加明显。

5 结 论

通过试验证实 GFRP 锚杆强度高、与混凝土变形协调性好等力学性能, 如果替代钢材锚杆应用在边坡永久加固中, 能够解决钢筋材料腐蚀问题, 具有广阔的应用前景。与螺纹钢的力学性能、性价比等指标进行对比, GFRP 材料不仅有良好的力学性能, 也有很好的性价比。

在试验中发现 GFRP 锚杆塑性较差, 其脆断现象明显。作为边坡锚固的锚杆, GFRP 锚杆的施工工艺, 锚杆的锚固方法, 夹头的设计都不能照搬常用的钢材锚杆, 在实际工程使用中如何扬长避短, 发挥高强度, 避免脆断就显得非常重要。GFRP 锚杆作为一种复合材料, 最大的优势就是具有可设计性, 文[6]提出并验证了 2 种纤维混杂 GFRP 棒可以改善材料的脆性, 实际使用中, 可以要求厂家采取相应的生产方法。

GFRP 锚杆破坏过程和普通钢材的破坏机理完全不同, 用于边坡加固时, 其破坏过程, 锚固机理以及荷载传递机理都将不同于普通钢锚杆, 应进行现场试验、监测等方面的研究。

作为一种边坡加固的新材料, 本文仅是通过其基本力学指标进行验证, GFRP 锚杆在长期荷载作用下蠕变特性, 不同季节温度的温度敏感性以及恶劣环境下抗腐蚀性等各种性能都会不同于金属材料, 都有待于进一步试验研究。

参考文献(References):

- [1] 仲伟秋, 王海超, 何世钦. 受腐蚀钢筋混凝土结构性能的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(1): 51 - 53.(Zhong Weiqiu, Wang Haichao, He Shiqin. Study on performance of corroding steel reinforced concrete structures[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(1): 51 - 53.(in Chinese))
- [2] Dong G, Hughes B. Commercialization of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Rebar[M]. [s. l.]: SEAOH Convention, 1999.
- [3] Roger H L, Chen J H. Effects of GFRP reinforcing rebars on shrinkage and thermal stresses in concrete[A]. In: The 15th ASCE Engineering Mechanics Conference[C]. [s. l.]: Columbia University, 2002.
- [4] 韩小平, 郑长卿, 李 华, 等. 复合材料在低温环境冲击拉伸性能的研究[J]. 机械科学与技术, 1998, 17(3): 434 - 436.(Han Xiaoping, Zheng Changqing, Li Hua, et al. Study on impact tensile properties of composites under low temperatures[J]. Mechanical Science and Technology, 1998, 17(3): 434 - 436.(in Chinese))
- [5] 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. 55 - 56.(Zeng Qingdun. The Micro Failure Mechanism and Strength of Composite Material[M]. Beijing: Science Press, 2002. 55 - 56.(in Chinese))
- [6] 杨正光, 郑百林, 贺鹏飞, 等. 结构混杂 GFRP 棒拉伸力学性能试验测试[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001, 5: 8 - 11.(Yang Zhengguang, Zheng Bailin, He Pengfei, et al. Experimental study on tensile properties of geometric hybrid glass fiber reinforced plastic bar[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2001, 5: 8 - 11.(in Chinese))