

全螺纹 GFRP 黏结型锚杆锚固性能试验研究

刘颖浩¹, 袁 勇²

(1. 同济大学 地下工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过全螺纹 GFRP 锚杆的改进拉拔试验, 测试与分析全螺纹 GFRP 锚杆在锚固工程中与岩体的黏结性能, 并推导出 GFRP 锚杆的锚固承载力设计公式, 给出 GFRP 锚杆锚固设计各参数的确定方法, 以便于全螺纹 GFRP 锚杆在工程中的应用。试验测试项目包括砂浆强度、锚固长度、锚杆直径等对于全螺纹 GFRP 锚杆锚固力的影响, 以及 GFRP 锚杆杆体黏结应力分布。测试发现: 锚固力随砂浆强度、锚固长度、锚杆直径的增大而增大; 黏结强度则随砂浆强度等级增大, 但随锚固长度和锚杆直径的增大而减小。分析认为: 采用全螺纹 GFRP 锚杆进行工程锚固时, 全螺纹 GFRP 锚杆的直径可取 12~32 mm, 锚固长度应大于 20 倍的锚杆直径, 锚固砂浆的强度等级为 M15 以上。

关键词: 岩土工程; GFRP 锚杆; 锚固力; 黏结强度; 黏结应力分布

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)02 - 0394 - 07

EXPERIMENTAL RESEARCH ON ANCHORAGE PERFORMANCE OF FULL-THREAD GFRP BONDING ANCHOR BOLTS

LIU Yinghao¹, YUAN Yong²

(1. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: Through the experiments on the improved pull-out tests of full-thread glass fiber reinforced plastic (GFRP) anchor bolts, the bonding behavior between the bolts and rock mass is studied. By studying the anchorage force of different GFRP anchor bolts, the parameters for application of GFRP anchor bolts to engineering practice are proposed. The testing results indicate that the anchorage force of the bolts increases with the increases of bolt diameter, anchorage length and mortar strength; the bonding strength of bolts increases with the increase of mortar strength, but decreases with the increases of bonding length and bolt diameter. And the results are explained with the bonding stress distribution of the GFRP anchor bolts. By the results, several conclusions are drawn: (1) the recommend diameter of the GFRP anchor bolts in engineering is 12 - 32 mm; (2) the anchorage length of the GFRP bolt should be larger than 20 times of its diameter; and (3) the compressive strength of the mortar used as anchor agent should be more than 15 MPa.

Key words: geotechnical engineering; GFRP anchor bolt; anchorage force; bonding strength; bonding stress distribution

1 引 言

岩土工程所面临的是复杂的地质体。这些复杂的地质体在一定的时间和条件下, 可能处于相对稳

定的平衡状态。但如果条件改变, 原来的平衡状态就有可能遭到破坏。采用锚杆支护可以主动地加固岩土体, 有效地控制其变形, 防止岩土体坍塌破坏的发生^[1]。实际锚固工程中, 对锚杆的材料有特殊的要求。例如, 衡量拉杆材料性能主要有强度、延

收稿日期: 2009 - 08 - 21; **修回日期:** 2009 - 10 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678133, 50678135)

作者简介: 刘颖浩(1983 -), 男, 2005 年毕业于郑州大学水工结构专业, 现为博士研究生, 主要从事纤维增强复合材料方面的研究工作。E-mail: smouse@qq.com

展性、松弛性、弹性模量和抗腐蚀性等指标。理想的拉杆材料应具有高强度、良好的抗腐蚀性、低松弛等性能。

一直以来,制作锚杆的材料首选钢材,而钢材的锈蚀问题日益成为影响锚固体系安全性和耐久性的突出问题,特别是在一些腐蚀性严重的山区以及地下水富集的软土地区,钢材的锈蚀问题更加严重。GFRP 锚杆是一种用于岩土工程锚固支护的新型材料,具有以下优点:(1)具有优良的抗腐蚀性能,耐久性好;(2)抗拉强度高,等于甚至高于预应力钢筋;(3)自重轻,只有预应力钢筋的 15%~20%;(4)低松弛性,荷载损失较小;(5)优良的抗疲劳特性;(6)对电磁场不敏感^[2]。

近年来,我国众多学者对 GFRP 锚杆的经济技术可行性^[3]、与不同基体的黏结性能^[4, 5]、锚固设计等^[6, 7]进行了系列研究。现有的研究成果表明,GFRP 锚杆完全可以用于锚固工程的应用。但是,我国尚缺乏 GFRP 锚杆的设计规范,在很大程度上限制了 GFRP 锚杆的广泛应用。本文的目的在于通过全螺纹 GFRP 锚杆的改进拉拔试验,提出 GFRP 锚杆锚固设计的相关参数,为制定 GFRP 锚杆的设计规范提供建议。

2 试验方案

目前,研究 GFRP 杆材与混凝土黏结性能的试验方法主要有为拉拔试验和梁式试验^[8]。但是,这 2 种方法并不适用于研究 GFRP 锚杆的锚固性能。因为这 2 种方法中混凝土均与杆材直接接触,并没有考虑锚固砂浆对锚固的影响,并不符合锚固工程中的实际情况。因此,本文采用了改进的拉拔试验^[5]。

2.1 试验设计

目前,对于 GFRP 锚杆的黏结性能的研究有以下特点:(1)多集中在小直径锚杆^[9, 10],但其锚固效果多受限于 GFRP 锚杆本身的抗拉强度而产生拉断破坏^[5],其最终承载力较低;(2)多采用较高的砂浆强度^[5, 11],不利于在实际工程中应用;(3)尽管多数试验均按 B. Benmokrane 等^[12]的试验结果选取了 20 倍的直径作为锚固长度,但因所用锚杆直径较小,故采用的锚固长度较小,造成 GFRP 锚杆的锚固力不足而黏结强度高^[5]。本文在试验中采用了直径为 18~32 mm 的锚杆,锚固长度为 25~75 mm,砂浆强度分别为 15, 20 MPa。试验序列及结

果见表 1。

表 1 设计试验序列与试验结果
Table 1 Designed test series and results

试验编号	锚杆直径/mm	锚固长度/mm	砂浆强度/MPa	峰值荷载/kN	黏结强度/MPa
d18-20-50	18	500	20	153.89	5.89
d25-20-50	25	500	20	190.71	5.14
d32-20-50	32	500	20	231.32	4.81
d25-15-25	25	250	15	48.35	2.60
d25-15-50	25	500	15	140.32	3.78
d25-15-75	25	750	15	170.61	3.06

2.2 试验材料

(1) GFRP 锚杆

本文所用 GFRP 锚杆采用上海绩满 FRP 制品有限公司生产的全螺纹 GFRP 锚杆(见图 1)。目前常用的 FRP 杆材的表面形态一般有 4 种,即表面光滑型、表面黏砂型、表面刻痕型和全螺纹型。相对于其他表面形态的 FRP 锚杆,全螺纹 FRP 锚杆的凸肋设计有效地增加了锚杆与黏结材料的接触面积,同时增大了二者之间的机械咬合力。因此,全螺纹锚杆的黏结性能明显优于其他表面形状的锚杆^[13]。为保证锚杆加载端在拉拔过程中不产生应力集中而破坏,采用加载端黏结钢套管的方式对锚杆进行保护,钢套筒长度均为 40 cm。



图 1 全螺纹 GFRP 锚杆表面形态

Fig.1 Surface of full-thread GFRP anchor bolts

(2) 基体

试验采用强度等级为 C60 的混凝土块体(尺寸为 1 800 mm×1 200 mm×1 000 mm)模拟岩石,混凝土配合比为每立方米混凝土中含有 516 kg 水泥、660 kg 砂、1 020 kg 石子、173 kg 水,外加 7.22 kg 高效减水剂。混凝土在标准条件下养护 28 d 后其抗压强度为 57.23 MPa。试验前,在岩体上钻孔,钻孔直径为 64 mm,孔洞的深度根据锚固长度确定。孔洞

的间距为 600 mm，以此来避免相邻锚杆拉拔时的影响(如应力叠加、裂缝扩展等)。

(3) 锚固用砂浆

锚杆采用 2 种强度等级的砂浆进行锚固，设计强度分别为 15 和 20 MPa。水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥；砂为中砂，含水率为 2.5%。

(4) 试验仪器

拉拔试验采用吨位为 100 t，行程为 20 cm 的穿心千斤顶进行加载，千斤顶所提供的拉力通过振弦式锚索计进行测量。杆端位移采用精度为 0.01 mm，量程为 50 mm 的位移计进行测量。并在 GFRP 锚杆锚固段外表面每隔 10 cm 黏结应变片，以测试锚杆的应力分布。传感器和位移的测量数据通过数据采集系统自动采集。试验装置见图 2。



图 2 GFRP 锚杆拉拔试验设备

Fig.2 Equipments of pull-out test on GFRP anchor bolts

3 试验结果分析

3.1 影响锚固力的因素

贾新等^[5]在与本文相同试验条件下，测试了直径为 25 mm，锚固长度为 900 mm 的钢锚杆的锚固力，试验结果与本文相同直径 GFRP 锚杆的锚固力对比见表 2。

表 2 钢锚杆与 GFRP 锚杆试验结果对比

Table 2 Comparison of testing results between steel and GFRP anchor bolts

试验编号	锚杆直径/mm	锚固长度/mm	砂浆强度/MPa	峰值荷载/kN	黏结强度/MPa
Steel25	25	900	55	167.63	2.37
d18 - 20 - 50	18	500	20	153.89	5.89
d25 - 20 - 50	25	500	20	190.71	5.14

在钢锚杆的拉拔试验中，钢锚杆发生了拔断破坏，即提高锚固长度和砂浆强度也不能提高其锚固力。GFRP 锚杆在较短锚固长度、较低黏结剂强度的情况下，锚固力已超越了相同直径钢锚杆的锚固力。该结果证明，在达到相同锚固力的情况下，采用 GFRP 锚杆可明显减少杆材的使用量，降低施工难度。

一般认为，影响锚杆承载力的因素有以下几种：锚杆直径、锚固长度以及锚固剂的性能。此外，湿度变化、温度变化、交通荷载、震动冲击等都会对锚杆产生反复作用的荷载，这种反复荷载将使锚杆产生附加位移，而荷载变化范围的大小对附加位移有重要影响。在不考虑环境影响因素的情况下，锚杆的极限承载能力可以按下式^[14]计算：

$$T_u = \pi dl\psi\tau_g \tag{1}$$

式中： T_u 为锚杆的锚固力(kN)， l 为锚杆的锚固长度(mm)， τ_g 为锚杆的黏结强度(MPa)， d 为锚杆直径(mm)， ψ 为锚固长度有效因子。

由式(1)可知，锚杆的锚固力受锚固长度、锚杆直径和黏结强度等因素的共同作用。不同试验条件下 GFRP 锚杆的极限承载力和黏结强度发展趋势见图 3，4。

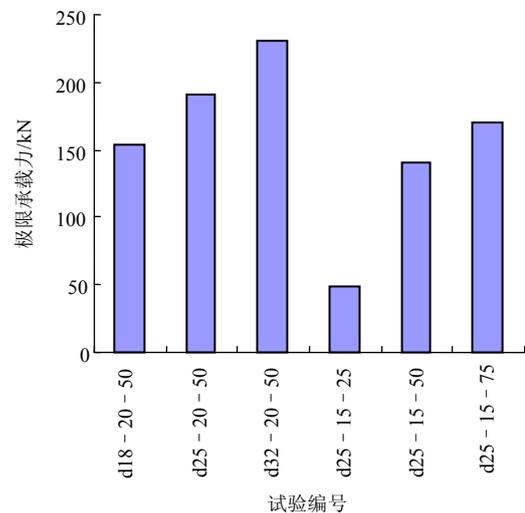


图 3 GFRP 锚杆的极限承载力

Fig.3 Ultimate bearing capacity of GFRP anchor bolts

3.2 锚固长度的影响

锚固砂浆抗压强度为 15 MPa 时，对于直径为 25 mm 的全螺纹 GFRP 锚杆，当其锚固长度分别为 250, 500, 750 mm 时，对应的锚固力分别为 48.35, 140.32 与 170.61 kN；对应的黏结强度分别为 2.60,

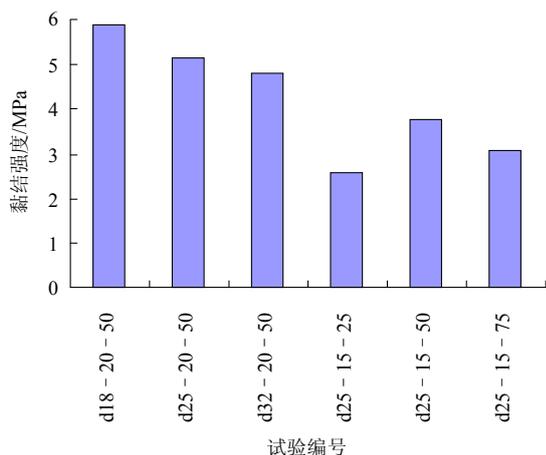


图 4 GFRP 锚杆的黏结强度

Fig.4 Bonding strength of GFRP bolts

3.78和3.06 MPa。在不同锚固长度情况下, 出现了不同的锚固破坏形式。

目前, 普遍认为 GFRP 锚杆的破坏有 3 种模式^[15]: 拔出破坏、滑移破坏和拔断破坏。

当锚杆的锚固长度过短时, 砂浆与锚杆间的接触面积过小, 从而导致锚杆拔出, 发生拔出破坏。为避免拔出破坏, 一般会限定一个锚固长度的最小值, 即临界锚固长度 l_{cr} 。大量研究^[5, 12]认为, 临界锚固长度为 10~20 倍锚杆直径。本试验中, 锚固长度为 250 mm(10d)的锚杆发生拔出破坏, 导致其黏结强度偏低。由图 3 可知, 该锚杆的承载力远远低于锚固长度为 500 mm(20d)和 750 mm(30d)的锚杆, 并不能满足工程应用的要求。为保证工程实践中不出现拔出破坏, 本文推荐采用 20 倍的锚固长度作为 GFRP 锚杆的临界锚固长度。

当锚杆的锚固长度大于某一限定值时, 锚固力会受到锚杆拉伸强度的限制。此时, 即使增加锚杆的锚固长度, 其锚固力也不会上升, 锚杆发生拔断破坏。本文定义此时的锚固长度为锚杆的有效锚固长度。当锚固长度大于锚杆的有效锚固长度时, 锚杆的承载能力取决于锚杆的抗拉强度, 据此可确定锚杆的锚固长度上限:

$$l_{\max} = \frac{f_g d}{4\tau_g} \quad (2)$$

式中: l_{\max} 为 GFRP 锚杆的有效锚固长度(mm), f_g 为 GFRP 锚杆的抗拉强度(MPa)。

当锚杆的锚固长度大于临界锚固长度 l_{cr} 而小于有效锚固长度 l_{\max} 时, 则发生滑移破坏。这种破坏形式是因为锚杆与砂浆间产生较大的滑移而使锚杆

与砂浆的黏结性能下降, 进而导致锚杆锚固力下降。

在不考虑锚固砂浆与岩石界面破坏的情况下, 根据不同的破坏形式, 单根 GFRP 锚杆的锚固力可按式(3)进行计算:

$$T_u = \begin{cases} \pi d l \tau_g & (l_{cr} < l \leq l_{\max}) \\ \pi f_g d^2 / 4 & (l > l_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

3.3 锚杆直径的影响

锚固砂浆抗压强度为 20 MPa 时, 对于锚固长度为 500 mm 的全螺纹 GFRP 锚杆, 当其直径分别为 18, 25 和 32 mm 时, GFRP 锚杆的拉拔承载力分别为 153.89, 190.71 及 231.32 kN, 黏结强度分别为 5.89, 5.14 和 4.81 MPa。由此可知, 在其他条件不变的情况下, GFRP 锚杆的拉拔承载力随着锚杆直径的增大而增加, 而黏结强度则随锚杆直径的增加略有下降趋势。

锚固力的增加主要是因为大直径的杆件与砂浆的接触面积较大, 因此锚杆与砂浆之间可以形成较大的黏结力, 提高拉拔承载力。同时, 因为混凝土的抗压强度较大, 砂浆的抗压强度较小, 直径大的 GFRP 杆件具有较薄的砂浆锚固层, 因此混凝土对锚杆的侧向约束效果增强, 使杆件的拉拔承载力增加^[16]。

由式(3)可知, 当 GFRP 锚杆的锚固长度在临界锚固长度与有效锚固长度之间时, 锚杆对锚固力的影响主要体现在参数 d 和 τ_g 的改变, 在这种情况下, 随直径 d 的增长, τ_g 的下降趋势减缓, 故 $d\tau_g$ 呈明显的上升趋势。当 GFRP 锚杆的锚固长度大于有效锚固长度时, 根据式(3), 锚杆的锚固力仅取决于锚杆的直径和其抗拉强度, 在锚杆的抗拉强度不变的情况下, 锚杆的锚固力与其横截面积呈线性增长关系。

因此, 在工程中选择锚杆直径时, 可按不同锚固长度、不同破坏形式及设计锚固力, 根据式(3)计算所需的锚杆直径。常用 GFRP 杆材的抗拉强度约为钢锚杆抗拉强度的 2 倍^[5], 因此, 在同等极限承载力要求下, 可选取较小直径的 GFRP 锚杆取代钢锚杆。规范^[17]中规定, 黏结型钢锚杆的常用直径为 16~32 mm, 相应的极限承载力为 70.3~281.3 kN, 此承载力对应的 GFRP 锚杆直径为 12~23 mm。而最大锚杆直径的选取往往取决于构造因素。因此, 本文推荐 GFRP 锚杆直径取为 12~32 mm。

3.4 砂浆强度的影响

对于直径为 25 mm、锚固长度为 500 mm 的全螺纹 GFRP 锚杆，当砂浆的抗压强度分别为 15 和 20 MPa 时，GFRP 锚杆的拉拔承载力分别为 140.32 和 190.71 kN，黏结强度分别为 3.78 和 5.14 MPa。由此可知，在其他条件不变的情况下，GFRP 锚杆的拉拔承载力和黏结强度均随着砂浆抗压强度的增大而增大。

贾新等^[5]研究了高强度砂浆对 GFRP 锚固性能的影响。该研究采用抗压强度为 55.5 和 45.5 MPa 的砂浆，其对应的黏结强度分别为 9.99 和 6.13 MPa，但该试验中锚杆锚固长度为 130 mm，直径为 10 mm，试验结果中的高黏结强度受锚固长度和锚杆直径的影响更显著。

本文认为，在普通锚固工程中没有必要追求高强度的锚固砂浆，普通强度锚固砂浆即可满足设计施工要求。根据本文试验结果，强度等级为 M15 的砂浆即可达到良好的锚固效果。

3.5 GFRP锚杆的应力分布曲线

在锚杆锚固段任取一微分段(见图 5)，则该微分段上的拉应力 f_G 与黏结应力 τ 满足下式：

$$\tau = \frac{A_G(f_G + df_G) - A_G f_G}{\pi dx} \quad (4)$$

式中： dx 为微分段长度(mm)， A_G 为锚杆横截面积(mm^2)， df_G 为微分段两端拉应力的变化量(MPa)。

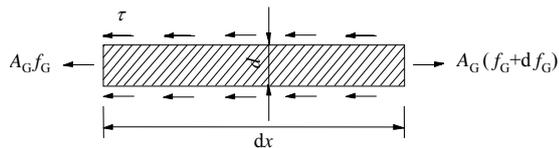


图 5 锚杆微分体中拉应力与黏结应力平衡

Fig.5 Equilibrium between tensile stress and bonding stress in element of anchor bolt

图 6 为试验测得的不同锚固长度、不同锚杆直径和不同强度锚固砂浆情况下，锚杆处于极限承载状态时的拉应力分布。图 6 中，锚杆的拉应力在锚固长度 0~50 mm 范围内大幅下降，其后则呈稳定下降趋势。最大拉应力出现在自由段，因此，锚杆拔断破坏时的破坏点均在锚杆的自由段或因锚固段脱黏产生的自由段内。

图 7 为根据式(4)得出的锚杆表面黏结应力分布。图 7 中黏结应力分布的共同特点为：黏结应力

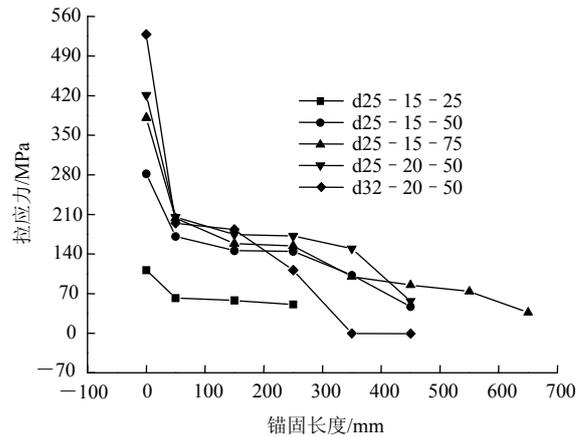


图 6 锚杆拉应力分布

Fig.6 Tensile stress distributions of anchor bolts

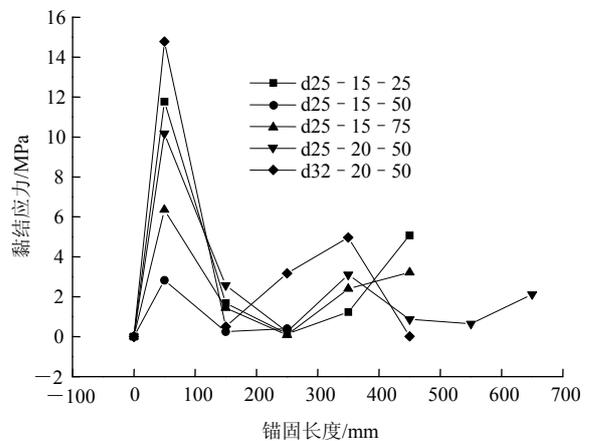


图 7 锚杆的黏结应力分布

Fig.7 Bonding stress distributions of anchor bolts

沿锚杆纵向分布极不均匀，在 0~200 mm 的锚固段内形成一个黏结应力集中区，并在其后存在较小的黏结区。根据图 7 趋势判断，若锚杆长度增长，应存在更多的黏结区，但其黏结区峰值会逐渐降低。

GFRP 锚杆在滑移破坏的情况下，其承载力随锚杆直径和锚固长度的增加而增加，但是其黏结强度却在下降。这一现象可由 GFRP 锚杆的黏结应力分布解释。GFRP 锚杆上的黏结应力集中在一个或几个黏结区内，而大部分锚固长度内的应力较小，因此造成了黏结强度与锚杆的长度成反比的现象。

锚杆的直径、锚固长度和锚固砂浆强度对锚杆的黏结应力峰值有明显影响，但其影响趋势与对黏结强度的影响趋势明显不同，而与锚固力的影响趋势相同。随锚杆直径增加，黏结强度下降而黏结应力峰值上升；随锚固长度的增加，黏结强度下降，黏结应力峰值上升；随锚固剂强度增加，黏结强度

和黏结应力峰值均上升。目前,采用的锚杆黏结强度计算公式^[11]为

$$\tau_g = \frac{T_u}{\pi dl} \quad (5)$$

通过式(5)计算所得的黏结强度的实质为黏结力在锚固长度范围内的平均值,即平均黏结应力。实际上,在锚杆的拉拔过程中,锚杆的锚固力为

$$T_u = \int_0^l \frac{\tau(x)\pi d^2}{4} dx \quad (6)$$

式中: $\tau(x)$ 为极限承载力状态下锚杆上的应力分布函数。

与根据Mindlin解所推导的锚杆的黏结应力理论分布^[18]相比,本文实际测得的黏结应力分布并不均匀。实测结果与理论解的差别在于,实测结果存在多个应力集中区。其原因为:在实际测试过程中,可能因砂浆内部产生微裂纹或与锚杆黏结不好,而在某一区域削弱了对锚杆的作用力,进而导致黏结应力的分布不均匀。而在理论解中,并没有考虑黏结材料的缺陷。根据GFRP锚杆黏结应力分布中锚固段近加载端高应力集中的特点,在实际工程中,可加强对该区域的处理,以提高锚杆的锚固效果。

4 结 论

GFRP 锚杆因其轻质、高强、耐腐蚀的特性,必将在土木工程中逐渐取得大范围应用。本文通过全螺纹 GFRP 锚杆的改进拉拔试验,分析了 GFRP 锚杆的锚固力,黏结强度以及沿锚杆的黏结应力分布,得出以下结论:

(1) 全螺纹 GFRP 锚杆用于锚固工程时,与钢锚杆相比具有更高的极限锚固力。在达到同等锚固效果的情况下,采用 GFRP 锚杆可有效节省杆材使用量,提高施工效率。

(2) 全螺纹 GFRP 锚杆的承载力与锚杆直径成正比。直径为 12 mm 的 GFRP 锚杆的极限承载力即可达到 70 kN。本文推荐工程中采用 GFRP 锚杆直径为 12~32 mm。

(3) 全螺纹 GFRP 锚杆的承载力与锚固长度之间存在式(3)的关系。锚杆的临界锚固长度可取为 20 倍的锚杆直径;锚杆的有效黏结长度可按式(2)计算。

(4) 采用抗压强度为 15 MPa 的砂浆作为锚固剂时, GFRP 锚杆的锚固力即可达到 140.32 kN。因此,在普通锚固工程中,采用抗压强度为 15 MPa 的砂浆即可满足工程要求。

(5) 全螺纹 GFRP 锚杆的黏结应力分布中,存在高应力集中区,黏结应力最大值远高于锚杆的平均黏结应力。该区域黏结材料的失效为锚杆失效的只要原因,在该区域采取增强措施,以提高锚杆的效果。

致谢 本文的试验测试得到上海市绩满玻璃钢制品有限公司的支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 闫莫明,徐祯祥,苏自约. 岩土锚固技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2004.(YAN Moming, XU Zhenxiang, SU Ziyue. Geotechnical anchorage technical manual[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [2] American Concrete Institute. ACI440.1R-03 Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars[S]. Farmington Hills: Gale Group, 2003.
- [3] 袁勇,贾新,闫富友. 岩石GFRP锚杆的可行性研究[J]. 公路交通科技,2004,21(9): 13-15.(YUAN Yong, JIA Xin, YAN Fuyou. Feasibility study on GFRP rock bolts[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9): 13-15.(in Chinese))
- [4] 高丹盈, BRAHIM B. 纤维聚合物钢筋混凝土的结机制及锚固长度的计算方法[J]. 水利学报,2000,(11): 70-78.(GAO Danying, BRAHIM B. Bonding mechanism and calculating method for embedded length of fiber reinforced polymer rebars in concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (11): 70-78.(in Chinese))
- [5] 贾新,袁勇,李焯芬. 新型玻璃纤维增强塑料砂浆锚杆的黏结性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10): 2108-2114.(JIA Xin, YUAN Yong, LEE C F. Experimental study on bond behavior of new type cement grouted GFRP bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2108-2114.(in Chinese))
- [6] 黄志怀,李国维. 玻璃纤维增强塑料锚杆设计研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2008,(4): 36-40.(HUANG Zhihui, LI Guowei. Design research of glass fiber reinforced plastics bolts[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008, (4): 36-40.(in Chinese))
- [7] 张洁,尚岳全,叶彬. 锚杆临界锚固长度解析计算[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(7): 1135-1138.(ZHANG Jie, SHANG Yuequan, YE Bin. Analytical calculations of critical anchorage length of bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

2005, 24(7): 1 135 - 1 138.(in Chinese))

[8] 高丹盈, BRAHIM B. 纤维聚合物筋与混凝土黏结性能的影响因素[J]. 工业建筑, 2001, 31(2): 9 - 14.(GAO Danying, BRAHIM B. Influential factors of bond properties between fiber reinforced polymer(FRP) rebars and concrete[J]. Industrial Construction, 2001, 31(2): 9 - 14.(in Chinese))

[9] 刘汉东, 高磊, 李国维. GFRP锚杆锚固机制试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(3): 63 - 65.(LIU Handong, GAO Lei, LI Guowei. Experimental study on anchoring mechanism of GFRP bolt[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 28(3): 63 - 65.(in Chinese))

[10] ZHANG B, BENMOKRANE B. Pullout bond properties of fiber-reinforced polymer tendons to grout[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 399 - 408.

[11] WON J P, PARK C G, KIM H H, et al. Effect of fibers on the bonds between FRP reinforcing bars and high-strength concrete[J]. Composites (Part B: Engineering), 2008, 39(5): 747 - 755.

[12] BENMOKRANE B, ZHANG B, CHENNOUF A. Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications[J]. Construction and Building Materials, 2000, 14(3): 157 - 170

[13] KATZ A. Bond mechanism of FRP rebars to concrete[J]. Materials and Structures, 1999, 32(10): 761 - 768.

[14] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7 - 12.(CHENG Liangkui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7 - 12.(in Chinese))

[15] HYETT A J, BAWDEN W F, MACSPORRAN G R, et al. A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified Hoek cell[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(1): 11 - 36.

[16] BENMOKRANE B, XU H X, BELLAVANCE E. Bond strength of cement grouted glass fiber reinforced plastic(GFRP) anchor bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(5): 455 - 465.

[17] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50086 - 2001 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50086 - 2001 Specifications for bolt-shotcrete support[S]. Beijing: China Planning Press, 2001.(in Chinese))

[18] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339 - 341.(YOU Chun'an. Mechanical analysis of wholly grouted anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 339 - 341.(in Chinese))

**2008~2009年在《学报》上发表论文较多(前30名)的单位
(按第一作者第一单位计, 不计增刊)**

序号	单位名称	2009年	2008年	序号	单位名称	2009年	2008年
1	中国矿业大学(徐州)	26(1)	6(15)	16	四川大学	6(15)	3(23)
2	中国科学院武汉岩土力学研究所	24(2)	32(1)	17	湖南大学	6(15)	1(27)
3	同济大学	17(3)	21(2)	18	长安大学	5(18)	3(23)
4	中国矿业大学(北京)	13(4)	7(10)	19	大连理工大学	4(19)	7(10)
5	武汉大学	13(4)	7(10)	20	北京科技大学	4(19)	7(10)
6	重庆大学	12(6)	8(7)	21	河南理工大学	4(19)	5(19)
7	成都理工大学	12(6)	7(10)	22	华南理工大学	4(19)	1(27)
8	清华大学	9(8)	11(4)	23	解放军理工大学	3(23)	4(20)
9	太原理工大学	9(8)	9(5)	24	合肥工业大学	3(23)	0
10	河海大学	8(10)	15(3)	25	中国地质大学(武汉)	3(23)	2(25)
11	中南大学	8(10)	9(5)	26	兰州大学	3(23)	0
12	西南交通大学	8(10)	4(20)	27	长江科学院	2(27)	8(7)
13	浙江大学	8(10)	6(15)	28	西安理工大学	2(27)	2(25)
14	北京交通大学	7(14)	8(7)	29	东北大学	2(27)	4(20)
15	山东大学	6(15)	6(15)	30	中国科学院地质与地球物理研究所	2(27)	6(15)

(本刊编辑部)