

非金属锚杆界面粘结强度试验研究

Experimental studies on interface bond strength of non-metallic anchors

薛伟辰

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:为解决岩土锚固工程中钢锚杆的腐蚀问题,自 20 世纪 90 年代起,国外开始采用纤维塑料筋这种非金属锚杆来替代传统的钢锚杆。纤维塑料筋具有抗拉强度高、抗腐蚀性能优良、容重小、热膨胀系数与混凝土和水泥砂浆相似等优点。在国内首次开展了纤维塑料筋锚杆的试验研究,基于 63 个试件的拔出试验,对纤维塑料筋锚杆与多种环境介质之间的界面粘结强度进行较为系统的研究,研究表明,纤维塑料筋锚杆具有较高的界面粘结强度。这一结论可为纤维塑料筋锚杆在岩土锚固工程中的应用提供依据和参考。

关键词:非金属锚杆;纤维塑料筋;界面粘结强度;试验

中图分类号: TU 528.572

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)02-0206-04

作者简介:薛伟辰(1970-),男,江苏扬州人,博士,教授,博士生导师。现任同济大学预应力研究所副所长,同济大学建筑结构试验室主任。主要从事现代预应力结构与先进复合材料应用研究。

XUE Wei-chen

(Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to avoid the corrosion of steel anchors in ground engineering, since 1990, FRP anchors, a non-metallic anchors, are used abroad to substitute for the traditional steel anchors. FRP anchors have the characteristics of higher tensile strength, better antisepsis, light weight, heat expansion coefficient near to concrete and mortar, et al. It is the first time that FRP anchors are tested in China. Based on pull-out tests of 63 specimens, interface bond strength between FRP anchors and different media are systematically studied, and the results show that FRP anchors have higher interface bond strength. This conclusion can provide verifications and references for the application of FRP anchors in ground engineering.

Key words: non-metal anchor; FRP rebar; interface bond strength; test

0 前 言

岩土锚固是岩土工程领域的重要分支。岩土锚固技术已在边坡、基坑、矿井、隧道、地下工程、坝体、航道、机场、港口以及抗倾、抗浮结构等工程建设中广泛应用^[1]。

在目前的岩土工程中,常采用抗拉强度较高的钢材作为锚杆,如高强钢绞线或中强钢筋等。当预应力较小(≤ 500 kN),长度不大(≤ 20 m)时,一般采用中强钢筋。在大预应力(≥ 500 kN),长锚杆(≥ 20 m)或地层徐变较大时,则宜采用高强钢绞线。

国内外岩土锚固工程实践表明,钢锚杆锚固工程的质量问题主要是由锚杆腐蚀引起的。影响锚杆腐蚀的因素除锚杆自身的物理化学性质、地下水和地层的电学性质外,地层的化学成分对腐蚀的形成和发展也有重要的影响。特别是当地层中含有钠盐、钙盐和镁盐时,钢锚杆更易腐蚀。为此,对钢锚杆必须采取有效的防腐措施,如对钢锚杆的锚固段外套波纹管,内填环氧树脂、水泥砂浆或混凝土,在锚杆自由段表面涂润滑油或防腐漆,从而形成双层防腐等。可见,钢

锚杆的防腐保护使锚固工程工作量大、耗材多、施工复杂。另外,钢锚杆重量大,制造、运输和安装也较为困难。

自 20 世纪 90 年代以来,国外开始采用纤维塑料筋这种非金属锚杆来替代传统的钢锚杆。纤维塑料筋是由多股连续长纤维(如玻璃纤维、碳纤维及芳纶纤维等)采用基底材料(如聚酰胺树脂、聚乙烯树脂、环氧树脂等)胶合后,经过特制的模具挤压、拉拔成型的。与钢筋相比^[2],纤维塑料筋的主要特点有:①抗拉强度高,弹性好,几乎不会产生塑性变形;②抗腐蚀性能优良,这是纤维塑料筋最突出的优点;③容重小,仅为钢材的 25%左右;④纤维塑料筋的热膨胀系数与混凝土、水泥砂浆相近;⑤弹性模量小,约为普通钢筋的 25%~75%;⑥抗剪和抗挤压强度低,通常不超过其抗拉强度的 10%,这样,纤维塑料筋不能采用普通钢筋的锚具,需专门研制。因此,用纤维塑料筋锚杆替代钢锚杆具有不需要防腐保护、承载力高、

基金项目:国家自然科学基金项目(50008012);上海市青年科技启明星计划资助项目(02QF14047)

收稿日期:2004-02-13

重量轻、易于运输和安装等优点。

目前,国外对纤维塑料筋这种新型锚杆的研究刚刚起步^[4],在国内几乎是空白。文献[5]是国内仅有的一篇研究纤维塑料筋锚杆的论文,该文主要阐述了纤维塑料筋锚杆的设计方法,而未开展有关试验研究工作。自2000年以来,在国家自然科学基金委员会和上海市科委的资助下,在国内首次开展了纤维塑料筋锚杆的试验研究,基于63个试件的拔出试验,对纤维塑料筋锚杆的界面粘结强度进行了较为系统的研究与分析。

1 纤维塑料筋锚杆的工作原理

1.1 纤维塑料筋锚杆的构造

纤维塑料筋锚杆的构造见图1,它由锚固体、拉杆和锚头组成。锚头由台座、锚板和锚具组成。按锚固体长度的不同,纤维塑料筋锚杆可分为集中锚固型锚杆和全长锚固型锚杆两类。当锚杆只有一部分与锚孔壁接触时,为集中锚固型锚杆;当锚杆全部与锚孔壁接触时,则为全长锚固型锚杆。

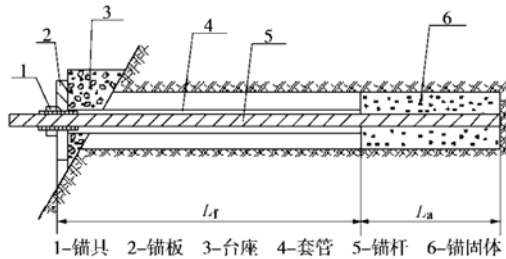


图1 纤维塑料筋锚杆的构造

Fig. 1 FRP anchor

1.2 纤维塑料筋的锚具

由于纤维塑料筋的抗剪强度和抗挤压强度都很小,纤维塑料筋不能采用普通钢筋的锚具,需专门研制。在分析研究国外已有纤维塑料筋锚具的基础上,我们在国内首次研制生产了纤维塑料筋锚具^[3],如图2所示。该锚具以锚杯式锚具为基础,生产工艺简单,质量易于控制。经试验,该锚具的锚固性能达到了预期目标。

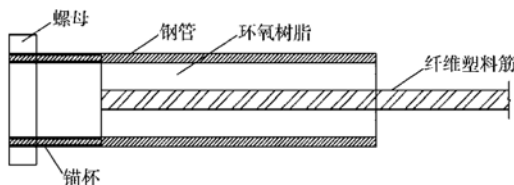


图2 纤维塑料筋锚具

Fig. 2 Anchorage of FRP anchor

1.3 纤维塑料筋锚杆的承载力

纤维塑料筋锚杆的锚固段是锚杆与岩土体的连接

部件,它决定了锚杆承载力的大小。其工作原理是用胶结材料(混凝土、水泥浆或环氧树脂等)将锚杆和孔壁岩土体粘结成一个整体,以承受锚杆的拉拔力。纤维塑料筋锚杆的承载力主要取决于以下4个因素:①纤维塑料筋的抗拉强度;②纤维塑料筋锚具的锚固效率;③胶结材料与岩土孔壁之间的界面粘结强度;④纤维塑料筋与胶结材料之间的界面粘结强度。本文重点研究纤维塑料筋与胶结材料之间的界面粘结强度。

纤维塑料筋与胶结材料之间的界面粘结强度主要与胶结材料种类、筋表面形状以及锚固段的长度等有关。假定粘结应力在胶结材料与锚杆界面均匀分布,已知极限荷载 P_u ,纤维塑料筋的直径 d_b ,粘结长度 L_a ,可求出其界面粘结强度 τ_u 为

$$\tau_u = P_u / (\pi \cdot d_b \cdot L_a), \quad (1)$$

通常,纤维塑料筋锚杆的界面粘结强度可通过拉拔试验获得。

2 试验设计

纤维塑料筋拔出试件按《混凝土结构试验方法标准》(GB50152-92)设计,见图3。

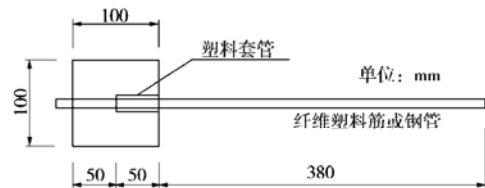


图3 拔出试件简图

Fig. 3 Pull-out specimen

试件数目为63个。试件参数包括:①配筋型式,包括纤维塑料螺纹筋($\Phi 9.5$)和光圆筋($\Phi 9.5$),普通螺纹钢筋 $\Phi 10$ 和光圆 $\Phi 10$ 等4种,下文中除专门指明“纤维塑料光圆筋”外,提到的纤维塑料筋均指“纤维塑料螺纹筋”;②胶结材料或环境介质,包括普通混凝土(分C20和C30两种)、高性能混凝土C50(分掺聚丙烯纤维与不掺聚丙烯纤维两种)、R42.5水泥浆以及环氧树脂等几种。试件分类见表1。

需要说明的是,试验中的纤维塑料螺纹筋与光圆筋,为笔者与国内某大型纤维制品厂家合作开发。纤维塑料筋的力学指标为:极限抗拉强度504 MPa,弹性模量41 GPa。高性能混凝土C50中采用细度为 $5 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{g}$ 的磨细矿渣代替部分水泥,以增强拌合料的活性,其中部分试件掺加了聚丙烯纤维。聚丙烯纤维的体积掺量为0.2%,其物理力学性能为:长度19 mm,直径100 μm ,极限抗拉强度400 MPa,弹性模量60 GPa,延伸率8%,熔点160 $^\circ\text{C}$ 。

表 1 拉拔试件明细表

Table 1 List of pull-out specimens

配筋类型	环境介质	试件数量
纤维塑料筋 $\Phi 9.5$	普通混凝土 C20	6
螺纹钢筋 $\Phi 10$	普通混凝土 C20	6
纤维塑料光圆筋 $\Phi 9.5$	普通混凝土 C20	6
光圆钢筋 $\Phi 10$	普通混凝土 C20	6
纤维塑料筋 $\Phi 9.5$	普通混凝土 C30	6
螺纹钢筋 $\Phi 10$	普通混凝土 C30	3
纤维塑料筋 $\Phi 9.5$	不掺纤维高性能混凝土 C50	6
螺纹钢筋 $\Phi 10$	不掺纤维高性能混凝土 C50	3
纤维塑料筋 $\Phi 9.5$	掺纤维高性能混凝土 C50	6
螺纹钢筋 $\Phi 10$	掺纤维高性能混凝土 C50	3
纤维塑料筋 $\Phi 9.5$	水泥浆 R42.5	3
纤维塑料光圆筋 $\Phi 9.5$	水泥浆 R42.5	3
纤维塑料筋 $\Phi 9.5$	环氧树脂	3
纤维塑料光圆筋 $\Phi 9.5$	环氧树脂	3
合计	—	63

拉拔试件的加载方案见图 4, 试验荷载由万能试验机施加, 在加载端设有穿心球铰。主要量测内容为拉力荷载 P 及试件自由端的滑移值 S 。



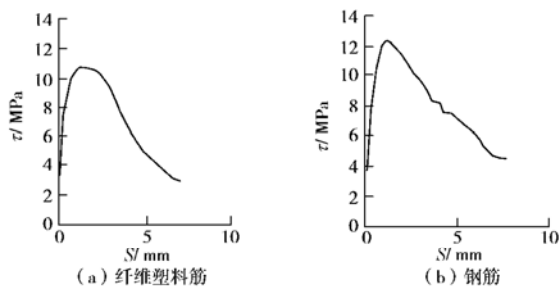
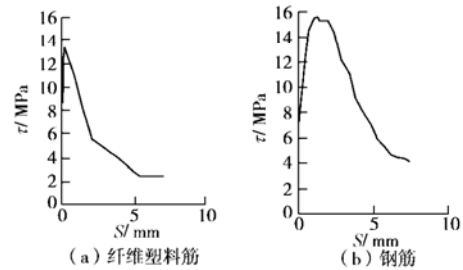
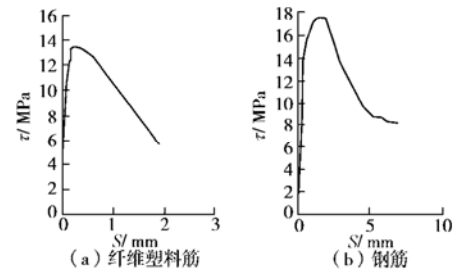
图 4 试件的加载与测试

Fig. 4 Loading and measuring of specimen

3 试验结果与分析

3.1 拔出试件的粘结应力-滑移曲线

典型拔出试件的粘结应力-滑移曲线 (即 $\tau-S$ 曲线) 的实测值如图 5~7 所示。

图 5 锚杆与混凝土 C30 的 $\tau-S$ 曲线Fig. 5 $\tau-S$ curves for anchors in concrete C30图 6 锚杆与不掺纤维的混凝土 C50 的 $\tau-S$ 曲线Fig. 6 $\tau-S$ curves for anchors in concrete C50 without fibers图 7 锚杆与掺纤维的混凝土 C50 的 $\tau-S$ 曲线Fig. 7 $\tau-S$ curves for anchors in concrete C50 with fibers

从图 5~7 可见, 纤维塑料筋出现初始滑移时的粘结应力略高于钢筋, 在峰值点处纤维塑料筋的滑移值则小于钢筋, 纤维塑料筋 $\tau-S$ 曲线在达到峰值点以后下降段比钢筋平缓, 破坏时的滑移值也远小于钢筋。这是由于纤维塑料筋的粘结破坏发生在滑移值较小时, 此时纤维塑料筋的表面外缠肋依次与核心处纤维塑料剥离, 随后纤维塑料筋的粘结强度迅速丧失, 破坏前没有明显的预兆。而钢筋的粘结破坏是由于钢筋表面变形肋之间的混凝土被压碎造成的, 破坏前伴随着显著的滑移。试件的破坏特征见图 8。



图 8 拉拔试件的破坏特征

Fig. 8 Failure patterns of pull-out specimens

从图 8 可见, 纤维塑料筋粘结锚固段的混凝土均未发生破坏, 几乎所有试件的破坏均是由于纤维塑料筋的外缠肋发生损坏或与核心处纤维塑料发生剥离。可见, 纤维塑料筋与不同环境介质之间的界面粘结强度主要取决于其核心位置处纤维塑料与表面外缠肋之间的粘结程度。

3.2 拔出试验结果

拔出试验测得的纤维塑料筋、钢筋与不同环境介质之间的界面粘结强度见表 2。

表 2 拉拔试验结果

Table 2 Results of pull-out tests		
配筋类型	环境介质	粘结强度 /MPa
纤维塑料筋 Φ9.5	普通混凝土 C20	12.87
螺纹钢筋 Φ10	普通混凝土 C20	7.26
纤维塑料光圆筋 φ9.5	普通混凝土 C20	0.90
钢筋 φ10	普通混凝土 C20	3.37
光圆纤维塑料筋 Φ9.5	普通混凝土 C30	11.8
螺纹钢筋 Φ10	普通混凝土 C30	12.6
纤维塑料筋 Φ9.5	不掺纤维高性能混凝土 C50	13.0
螺纹钢筋 Φ10	不掺纤维高性能混凝土 C50	15.7
纤维塑料筋 Φ9.5	掺纤维高性能混凝土 C50	13.5
螺纹钢筋 Φ10	掺纤维高性能混凝土 C50	17.5
纤维塑料筋 Φ9.5	水泥浆 R42.5	9.31
纤维塑料光圆筋 φ9.5	水泥浆 R42.5	0.67
纤维塑料筋 Φ9.5	环氧树脂	15.10
纤维塑料光圆筋 φ9.5	环氧树脂	5.52

(1) 纤维塑料筋与混凝土之间具有较高的界面粘结强度，纤维塑料筋与普通混凝土 C20、C30 及与两种高性能混凝土 C50 之间的粘结强度均超过了 11.0 MPa。

(2) 当环境介质为普通混凝土 C20 时，纤维塑料筋的界面粘结强度稍高于普通钢筋；当环境介质为普通混凝土 C30 时，纤维塑料筋的界面粘结强度比普通钢筋略低；当环境介质为高性能混凝土 C50 时，纤维塑料筋的界面粘结强度则低于普通钢筋。

(3) 高性能混凝土 C50 中掺加聚丙烯纤维对纤维塑料筋的界面粘结强度影响较小，仅提高 4% 左右。

(4) 纤维塑料筋与水泥浆之间的界面粘结强度较高，达到了 9.3 MPa，这将保证纤维塑料筋与水泥浆体之间形成整体作用。

(5) 纤维塑料筋与环氧树脂之间的粘结强度很高，为 15.1 MPa，本文的这一结论将为纤维塑料筋粘结型锚具的研制提供参考。

(6) 纤维塑料光圆筋与混凝土以及水泥砂浆之间的界面粘结强度很低，与环氧树脂之间的界面粘结强度也比较低，这表明纤维塑料光圆筋锚杆不适合于在岩土锚固工程中应用。

3.3 本文试验结果与国外试验结果的对比

以纤维塑料筋与普通混凝土 C30 之间的界面粘结强度为例，本文试验结果与文献[4]中介绍的国外试验结果的对比见表 3。可见二者数值较为相近。

表 3 国内外试验结果的对比

Table 3 Comparison between test results at home and abroad		
试验类别	本文试验结果	国外试验结果 ^[4]
拉拔试验	11.8 MPa	11.5 MPa

4 结 语

基于 63 个拉拔试验，较为系统地研究了纤维塑料筋锚杆与不同环境介质之间的界面粘结强度，主要研究结论如下：

(1) 受力过程 纤维塑料筋出现滑移时对应的粘结应力略高于钢筋；在峰值点处纤维塑料筋的滑移值则小于钢筋；纤维塑料筋 $\tau - S$ 曲线在达到峰值点后下降段比钢筋平缓，破坏时的滑移值也远小于钢筋。

(2) 破坏特征 纤维塑料筋发生粘结破坏时，其表面外缠肋依次与核心处纤维塑料剥离，随后纤维塑料筋粘结强度迅速丧失，破坏前没有明显的预兆。而钢筋的粘结破坏则是由于钢筋表面变形肋之间的混凝土被压碎造成的，破坏前有着显著的滑移。

(3) 界面粘结强度 纤维塑料筋与混凝土间具有较高的界面粘结强度，其与 4 种混凝土之间的界面粘结强度均超过了 11.0 MPa；纤维塑料筋与水泥浆间的界面粘结强度也比较高，为 9.31 MPa；纤维塑料筋与环氧树脂之间的界面粘结强度很高，为 15.1 MPa；纤维塑料光圆筋的界面粘结强度较低，纤维塑料光圆筋不适合于在岩土锚固工程中应用。

参考文献：

[1] 程良奎, 范景伦, 韩 军, 许建平. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

[2] 薛伟辰. 现代预应力结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

[3] 薛伟辰. 土木工程纤维塑料筋研究新进展[J]. 中国科学基金, 2004,18(1):10 - 12.

[4] Benmokrane B, Adil Chennouf. Tensile characteristics and bond properties of AFRP and CFRP tendons for ground anchor applications[A]. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures[C]. Proceedings of the Third International Symposium, 1997,2:727 - 733.

[5] 高丹盈, 张启明, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋粘结型锚杆的设计方法[J]. 水利学报, 2002(增刊):5 - 9.