

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.010



岩石 GFRP 抗浮锚杆承载性能室内试验 与机理分析

白晓宇^{1a, 1b}, 张明义^{1a, 1b}, 王永洪^{1a}, 闫楠²

(1. 青岛理工大学 a. 土木工程学院; b. 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛, 266033;
2. 青岛大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛, 266071)

摘要:基于4根岩石 GFRP 抗浮锚杆的室内足尺拉拔破坏性试验,探讨了风化岩地基中全长黏结 GFRP 抗浮锚杆的界面黏结特性和承载性能,揭示了 GFRP 锚杆的细观破坏机理。结果表明:GFRP 抗浮锚杆发生拔出破坏,主要是由螺纹表面劣化所引起的剪胀破坏;直径 25 mm、灌浆体强度 M30、锚固长度 1.3 和 0.55 m 的 GFRP 抗浮锚杆的极限抗拔承载力分别为 255、195 kN,满足工程抗浮要求;GFRP 抗浮锚杆杆体与灌浆体界面平均黏结强度介于 2.41~5.10 MPa 之间,高于《岩土锚固与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)中钢锚杆与灌浆体的黏结强度推荐值。

关键词:岩石地基;抗浮锚杆;极限抗拔力;平均黏结强度;破坏机制

中图分类号:TU475 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)05-0078-08

Full-scale test and mechanism analysis on bearing capacity of GFRP anti-floating anchor socketed into rock

Bai Xiaoyu^{1a, 1b}, Zhang Mingyi^{1a, 1b}, Wang Yonghong^{1a}, Yan Nan²

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China;
2. College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, P. R. China)

Abstract:Based on the laboratory full-scale tensile failure tests on four full-bonded GFRP anti-anchors socketed into rock, the interfacial adhesion and bearing capacity of the anchor on rock foundation were studied, from which the micro-failure mechanism of the anchor was revealed. The results show that the pull-out failure occurred in GFRP anti-floating anchor, attributing to the dilative shear failure from anchor thread's interfacial deterioration. The ultimate uplift bearing capacity of GFRP anti-floating anchor with diameter of 25 mm, concrete of M30, anchorage length of 1.3 m and 0.55 m, was 255 kN and 195 kN,

收稿日期:2017-11-03

基金项目:国家自然科学基金(51708316、51778312);山东省重点研发计划(2017GSF16107、2018GSF117008);山东省自然科学基金(ZR2016EEQ08、ZR2017PEE006);山东省高等学校科技计划(J16LG02);青岛市应用基础研究计划(16-5-1-39-jch);中国博士后科学基金(2018M632641)

作者简介:白晓宇(1984-),男,博士,副教授,主要从事地基基础与城市地下工程研究,E-mail:baixiaoyu538@163.com。

Received:2017-11-03

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51708316, 51778312); Shandong Key Research and Development Program (No. 2017GSF16107, 2018GSF117008); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EEQ08, ZR2017PEE006); Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province (No. J16LG02); Applied Basic Research Programs of Qingdao (No. 16-5-1-39-jch); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M632641)

Author brief:Bai Xiaoyu(1984-), PhD, associate professor, main research interests: foundation and urban underground engineering, (E-mail) baixiaoyu538@163.com.

respectively, indicating that the high bearing capacity of the anchor for anti-floating purpose. The average bond strength between GFRP anti-floating anchor and grouting body was between 2.41 MPa and 5.10 MPa, higher than the recommended values from *Technical Code for Engineering of Ground Anchoring and Shotcrete Support* (GB 50086-2015).

Keywords: rock foundation; anti-floating anchor; ultimate uplift bearing capacity; average bond strength; failure mechanism

抗浮锚杆因地层适应性强、分散应力、布置灵活、施工便捷、造价低等诸多技术优势在土木工程领域被广泛采用,但其常年处于地下水位以下或干湿交替区域,服役环境会不同程度遭受地下水中侵蚀性离子的化学腐蚀,在沿海地区尤为严重;特别是城市轨道交通运营过程中产生的杂散电流会使钢筋锚杆产生电化学腐蚀,导致抗浮结构的服役性能严重退化,过早退出服役,极大地威胁主体结构的安全性和耐久性^[1-4]。另外,在青岛、深圳等风化岩地基(尤其是~微风化花岗岩)中施工大直径钢筋混凝土抗浮桩非常困难,工程费用高,唤起了人们对非金属抗浮锚杆的期待。玻璃纤维增强聚合物(GFRP)筋是以纤维为增强材料、树脂为基体材料,通过拉挤、固化复合而成的一种新型材料。与钢筋相比,GFRP材料具有耐腐蚀性强、抗拉强度高、造价低、质量轻、抗电磁干扰性能好等优点^[5-6]。近年来,GFRP材料在土木工程相关领域得到了较多研究和应用^[7-9]。将GFRP锚杆用于地基加固工程能有效解决钢筋锚杆的耐久性问题,有利于提高结构的使用寿命。

对GFRP抗浮锚杆的研究尚处于起步阶段,大多数研究都局限于普通岩土GFRP锚杆或基于小尺寸拉拔试件。有学者从GFRP锚杆的承载特性、破坏机理、荷载传递规律及黏结应力分布特征展开研究。刘汉东等^[10]研究了GFRP锚杆基本力学指标和基本破坏形态。贾新等^[11]从试验的角度分析了GFRP锚杆的破坏模式、极限抗拔承载力、平均黏结强度及临界锚固长度等问题。李国维等^[12]基于GFRP锚杆拉拔模型试验,揭示了锚杆杆体应力传递深度随锚固体强度的变化特征。Zhu等^[13]在管状GFRP土钉上植入FBG传感器,现场测试了GFRP土钉的应力应变分布规律。Li等^[14]借助分布式光纤传感技术测试了B-GFRP筋的应力松弛特性。白晓宇等^[15]基于原型抗浮锚杆拉拔破坏性试验,探讨了中风化花岗岩中GFRP抗浮锚杆的承载性能和破坏机理。Vilanova等^[16]得到了长期荷载作用下GFRP筋与混凝土相对滑移的时间效应。Benmokrane等^[17]预测了实心 and 空心GFRP锚杆在盐溶液侵蚀条件下的长期抗拉强度,进一步评价了

GFRP锚杆的耐久性。

GFRP锚杆的出现,特别是GFRP材料优越的抗电磁干扰性和耐腐蚀性,能够彻底解决抗浮锚杆的耐久性问题。为模拟岩石GFRP抗浮锚杆的实际施工情况和受力特性,通过两组全尺寸岩石GFRP抗浮锚杆室内拉拔破坏性试验,研究其抗拔性能及锚杆杆体-灌浆体界面黏结特性,揭示GFRP抗浮锚杆的破坏机制。

1 试验方案及过程

1.1 试验材料及仪器

1.1.1 GFRP抗浮锚杆 为了提高锚杆与灌浆体之间的锚固力,试验采用直径25 mm的全螺纹实心状GFRP抗浮锚杆。经检测,玻璃纤维和环氧树脂的含量分别为75%和25%,密度为2.1 g/cm³,重量为970 g/m,横截面积为478 mm²,常规力学指标见表1。

表1 GFRP锚杆力学指标

Table 1 Mechanical parameters of GFRP anchor

锚杆 型号	极限荷 载/kN	抗拉强 度/MPa	抗剪强 度/MPa	弹性模 量/GPa
YF-H50-25	342	675	150	51

1.1.2 混凝土基体 为模拟实际工程中的中风化岩地基,试验选用C30混凝土制成基体,混凝土基体的底面尺寸为1 m×1 m的方形截面,高度分别为0.8 m和1.6 m。基体的制作如图1所示。另外还



图1 混凝土基体制作

Fig. 1 Photo of making concrete foundation

浇注了 3 组立方体试件,试件尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,与试验锚杆同条件养护,28 d 后测得立方体试件抗压强度均值为 28.9 MPa 。可能由于冬季气温较低,混凝土中未加防冻剂,导致抗压强度小于 30 MPa 。

1.1.3 灌浆体 水泥选用山东某公司生产的 42.5# 普通硅酸盐水泥,砂选用无杂质且级配良好的中砂,采用自来水拌和均匀。其中,水、水泥、砂的质量比为 $0.45:1:1$,灌浆体的设计强度等级为 M30。为检验灌浆体强度是否达到设计要求,浇筑了 2 组 $70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}$ 的水泥砂浆试块,与试验锚杆在相同条件进行养护,7 d 后测得 1 组试块的抗压强度均值为 31.2 MPa ,28 d 后测得另一组试块的抗压强度均值为 35.6 MPa 。

1.1.4 试验仪器 主要试验仪器及设备包括:特制 H 型截面钢支墩、跨中截面预留 $\phi 80\text{ mm}$ 贯通孔洞的箱型加载梁、行程为 20 cm 的手动式油压穿心千斤顶、MGH-500 型锚索测力,量程为 30 mm 的机械式百分表,另外还有专用锚具、钢套管、钢垫板及磁性表架等。

1.2 试验方案

在相同条件下进行不同锚固长度的 GFRP 抗浮锚杆足尺拉拔破坏性试验,研究其承载性能和破坏机制。试验锚杆总数为 4 根,锚固长度分别为 1.3 、 0.55 m ,试验参数如表 2 所示。

表 2 锚杆试验参数

Table 2 Test parameters of anchor rod

编号	直径/mm	锚固长度/mm	总长度/mm
G25-52d-01	25	1 300(52d)	2 500
G25-52d-02	25	1 300(52d)	2 500
G25-22d-01	25	550(22d)	2 000
G25-22d-02	25	550(22d)	2 000

注:表中 d 为锚杆直径。

为模拟岩石地基中锚杆的实际施工情况,待基体养护 28 d 后,采用潜孔钻机成孔,成孔后的照片如图 2 所示。钻孔直径均为 110 mm ,钻孔过程中全程取芯。将 GFRP 抗浮锚杆绑扎对中支架后,人工送入钻孔内,然后注入 M30 水泥砂浆,养护 28 d 或灌浆体的抗压强度达到 75% 时对 GFRP 锚杆进行拉拔试验。需要说明的是,为避免锚杆间距太小而影响试验结果,在钻孔过程中要确保锚杆具有一定的间距,GFRP 锚杆的孔位布置见图 3。

GFRP 锚杆属于正交各向异性材料,抗拉强度高,但抗剪性能较差,夹片式锚具在这里不适用,试



图 2 现场成孔

Fig. 2 Photo of pore-forming

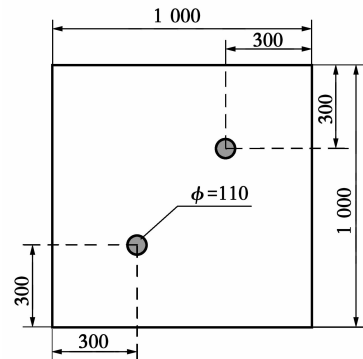


图 3 锚杆孔布置示意图(单位:mm)

Fig. 3 Diagram of drilling location of anchor

验采用加载端粘贴钢套管对 GFRP 锚杆保护,粘结材料选用环氧树脂与固化剂混合液。GFRP 抗浮锚杆加载装置中各部件的位置关系如图 4 所示,装置可直接测定 GFRP 抗浮锚杆与混凝土基体的相对滑移。

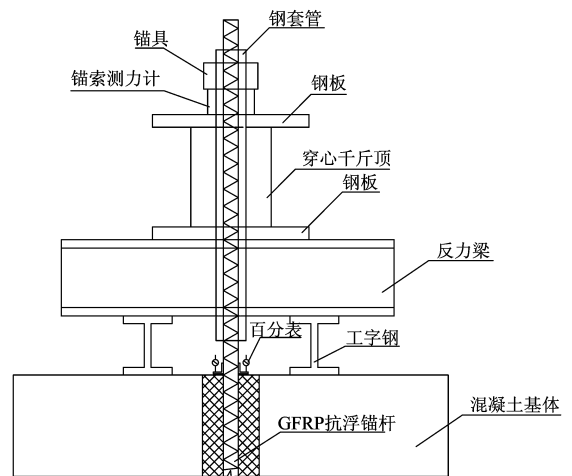


图 4 GFRP 锚杆加载装置

Fig. 4 Loading device schematic diagram of GFRP anchor

1.3 试验过程

试验为不同锚固长度岩石 GFRP 抗浮锚杆拉拔破坏性试验,为了便于比较,同步开展 2 根不同锚固长度的抗浮锚杆拉拔试验,先进行 G25-52d-01 和

G25-22d-01,再进行 G25-52d-02 和 G25-22d-02。试验采用逐级加载法进行,4 根 GFRP 抗浮锚杆按 0→30→60→90→120→150→180 kN……进行加载,直至破坏。荷载的大小通过连接在锚索测力计的 GSJ-2A 型读数仪显示。每级荷载施加完毕后,应立即读取滑移量,之后每间隔 5 min 读取一次,相临两级荷载的加载时间至少要保证 15 min,试验装置如图 5 所示。GFRP 抗浮锚杆的破坏标准按《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[18]来判定。

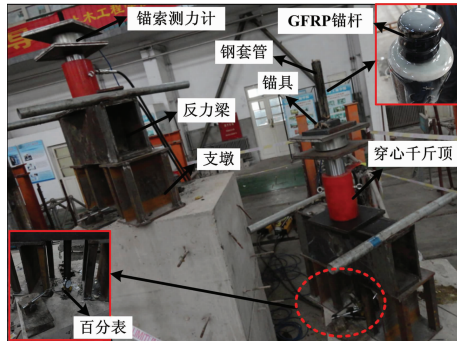


图 5 试验装置

Fig. 5 Test device

2 试验结果及分析

2.1 锚杆的破坏形态与特征分析

试验条件下,GFRP 抗浮锚杆最终破坏形态如表 3 和图 6 所示。

表 3 GFRP 抗浮锚杆破坏形态

Table 3 Failure modes of GFRP anti-floating anchor

锚杆编号	最大加载量/kN	滑移量/mm	破坏形式
G25-52d-01	279	12.51	杆体拔出,灌浆体开裂
G25-52d-02	246	8.46	杆体拔出,灌浆体开裂
G25-22d-01	207	6.62	杆体拔出,灌浆体开裂
G25-22d-02	220	7.26	杆体拔出,灌浆体开裂

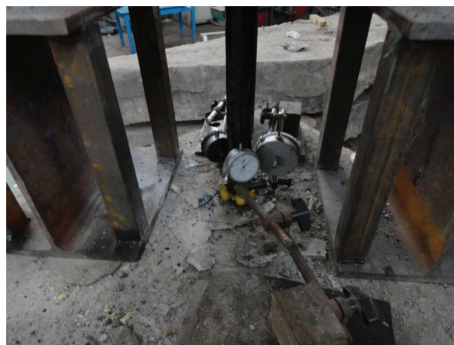


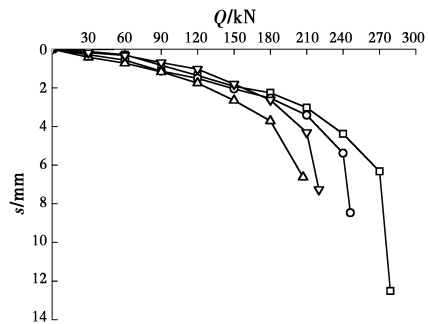
图 6 GFRP 锚杆破坏形式

Fig. 6 Damage mode of GFRP anchor rod

由表 3 可知,4 根锚杆均发生锚杆杆体被拔出、灌浆体开裂的现象。当荷载水平达到最大加载量的 60%~70%时,锚杆发出轻微的破裂声;随着荷载水平的逐渐增加,灌浆体出现 3~5 cm 的裂缝且开裂范围逐渐增大,锚杆的声响也随之增大,在距混凝土基体表面一定深度范围,GFRP 锚杆的螺纹肋被剪坏,该位置正好是剪应力峰值点。可以说螺纹的作用较为显著,在增加锚杆与灌浆体黏结力的同时也使得杆体表面在局部范围内发生应力集中,杆体表面发生劣化,致使锚杆杆体被剪坏。试验过程中,除锚杆杆体-灌浆体界面黏结强度不足而造成的杆体拔出破坏外,没有出现其他破坏形态,表明 GFRP 锚杆自身的强度并未完全发挥。

2.2 GFRP 抗浮锚杆的极限抗拔力

荷载-位移(Q-s)曲线在宏观上体现了荷载传递性状及破坏模式,对 Q-s 分析有助于对 GFRP 抗浮锚杆的荷载传递特性的总体把握。试验中 4 根 GFRP 抗浮锚杆 Q-s 曲线如图 7 所示,最大加载量(极限荷载)和滑移量见表 3。



注:□-G28-52d-01 ○-G28-52d-02 △-G28-22d-01 ▽-G28-22d-02

图 7 GFRP 锚杆的 Q-s 曲线

Fig. 7 Q-s curves of GFRP anchor rod

从图 7 可以看出,4 根 GFRP 锚杆的 Q-s 曲线变化规律一致,基本表现出缓变型的性状,当荷载水平较小时,荷载与杆体位移基本呈线性增长,杆体滑移较小,且滑移量增长速率较慢。随着荷载水平的增加,杆体位移逐渐增大,杆体的上拔速率也相应增大,Q-s 曲线逐渐过渡为非线性。随着锚固长度的增加,GFRP 锚杆承受荷载的能力逐渐增大,相应的滑移量也增加。根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)确定,锚杆 G25-52d-01、G25-52d-02、G25-22d-01、G25-22d-02 的极限抗拔承载力分别为 270、240、180、210 kN,可见 GFRP 抗浮锚杆的锚固长度增加 1.36 倍,其极限抗拔承载力平均提高 30.7%。主要是由于在有效锚固长度范围内,随着锚固长度的增加,GFRP 抗浮锚杆与灌浆体的接触

面积增大,二者的黏结力也将随之提高,因此,GFRP 抗浮锚杆的极限抗拔承载力增大。

2.3 锚杆杆体-灌浆体界面平均黏结强度

GFRP 锚杆与灌浆体的黏结强度是 GFRP 锚杆与灌浆体表面的摩擦力、胶着力及机械咬合力共同作用的结果,此处所述平均黏结强度实际上是广义的,或称之为广义平均黏结强度更贴切。将破坏荷载或最大加载量与 GFRP 锚杆和混凝土接触侧面积的比值定义为二者的平均黏结强度,见式(1)^[19]。

$$\tau_G = P_u / \pi d l \quad (1)$$

式中: τ_G 为 GFRP 锚杆与灌浆体的平均黏结强度,MPa; P_u 为 GFRP 锚杆的最大加载量,N; d 为 GFRP 锚杆杆体直径,mm; l 为 GFRP 抗浮锚杆与灌浆体的有效锚固长度,mm。

在试验条件下,通过式(1)求得 4 根 GFRP 抗浮锚杆与灌浆体的平均黏结强度见图 8。

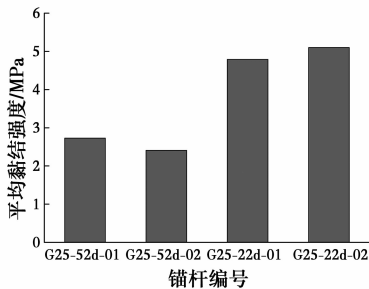


图 8 锚杆与灌浆体的平均黏结强度

Fig. 8 Average bond strength of anchor and grouting body

图 8 显示,在试验条件下,直径 25 mm、M30 的水泥砂浆(灌浆体强度为 35.6 MPa),GFRP 锚杆 G25-52d-01、G25-52d-02、G25-22d-01、G25-22d-02 与灌浆体的平均黏结强度分别为 2.73、2.41、4.79、5.10 MPa。锚杆直径、灌浆体强度相同的情况下,随着锚固长度的增加,锚杆杆体与混凝土底板的平均黏结强度逐渐减小,GFRP 抗浮锚杆的锚固长度增加 1.36 倍,相应的平均黏结强度降低 92.4%,说明锚固长度对 GFRP 锚杆与灌浆体之间黏结力发挥有较大影响,这与 Zheng 等^[20]和 Nemcik 等^[21]的研究结果一致,主要是由于 GFRP 抗浮锚杆的锚固长度越短,锚杆杆体与灌浆体黏结力就能更加充分发挥。

试验得到的 GFRP 锚杆杆体与灌浆体的平均黏结强度与黄志怀等^[22]研究结果相比提高约 83.3%。主要是由于文献^[22]中水泥砂浆立方体试块 28 d 龄期的抗压强度均值为 25.7 MPa,而本试验中灌浆体 28 d 龄期的抗压强度均值为 35.6 MPa,灌浆体强度的大小对锚杆杆体-灌浆体界面平均黏结强度

有较大的影响,因此,本试验得到的 GFRP 锚杆与水泥砂浆的黏结强度偏高。另外,比较《岩土锚固与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)^[23]发现,在灌浆体强度基本一致的情况下,试验中 GFRP 锚杆杆体与灌浆体的平均黏结强度远高于规范^[23]中螺纹钢筋与灌浆体间黏结强度设计值的上限,可见,GFRP 抗浮锚杆与灌浆体之间的平均黏结强度要比钢锚杆与同强度灌浆体之间的平均黏结强度高,这一结论与白晓宇等^[15]在风化岩地基中现场试验得到的结果一致。这主要是由于 GFRP 材料的弹性模量低,并且其线膨胀系数与水泥基材料的线膨胀系数相近所致。

2.4 GFRP 抗浮锚杆的破坏机制分析

试验中 4 根 GFRP 抗浮锚杆均产生杆体拔出,灌浆体开裂的现象。实际上,GFRP 锚杆与灌浆体的黏结力主要由杆体表面与灌浆体中水泥胶凝体的化学黏着力、杆体与灌浆体界面的摩擦力以及杆体表面凸起的螺纹与灌浆体的机械咬合力 3 部分组成。在 GFRP 抗浮锚杆受荷过程中,这 3 种力在不同的加载阶段发挥各自的作用,但他们之间又不是独立存在,而是相互作用,相互影响。对于光圆 GFRP 锚杆,在锚杆与灌浆体出现相对滑移之前,其黏结力主要由化学黏着力提供,产生相对滑移之后则取决于摩擦力和杆体表面的咬合力,只不过咬合力的作用效果较弱。而全螺纹 GFRP 抗浮锚杆与光圆 GFRP 锚杆相比,螺纹的存在改变了锚杆杆体与灌浆体的相互作用方式,使玻璃纤维丝的分布方向与作用力方向具有一定角度,改善了锚杆杆体-灌浆体界面的黏结作用,提高了二者的黏结强度;固然化学黏着力和摩擦力存在,但其相互作用与机械咬合力相比较弱,锚杆杆体-灌浆体界面的黏结强度主要由杆体表面的突肋与灌浆体之间的机械咬合力提供(见图 9)。

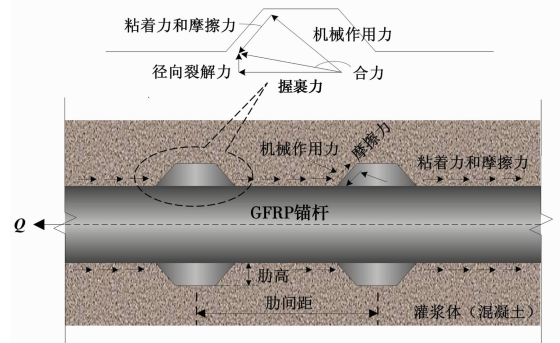


图 9 螺纹 GFRP 锚杆与灌浆体之间的相互作用

Fig. 9 Interaction between thread and grouting body of GFRP anchor

灌浆体的开裂或压碎,会引起 GFRP 锚杆杆体与灌浆体的相对滑动,在某一特定荷载作用下,这意味着 GFRP 锚杆应具有一定的灌浆覆盖厚度。当 GFRP 锚杆承受拉力时,根据静力平衡条件,灌浆体内的黏结力与外荷载相等。随着荷载水平不断增加,主拉应力大于灌浆体的抗拉强度时,灌浆体内的裂缝就会由内向外逐渐开展,GFRP 锚杆的螺纹深度和宽度越大,则灌浆体的开裂范围越明显。螺纹 GFRP 锚杆与灌浆体之间的相互作用机理见图 10。

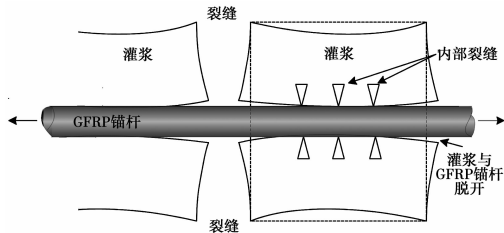


图 10 螺纹 GFRP 抗浮锚杆周围灌浆体开裂

Fig. 10 Fracture of grouting body surround thread GFRP anti-floating anchor

GFRP 锚杆出现拔出破坏,说明锚杆杆体的强度没有充分发挥出来。加载初期,GFRP 抗浮锚杆杆体与灌浆体之间剪应力小于二者的黏结强度,与玻璃纤维丝与树脂之间的黏结强度相比更小,杆体与灌浆体之间剪应力主要由摩擦力和黏着力提供,因锚杆表面未经喷砂处理,摩擦力和黏着力的作用效果不显著。随着荷载水平的提高,黏着力和摩擦力发挥的作用逐渐降低,机械咬合力开始承担主要作用。随着 GFRP 锚杆杆体表面螺纹发生劣化,使机械咬合力在一定深度范围(剪应力峰值点的位置)内逐步降低,其峰值向杆体深部转移,最终机械咬合力失去作用,产生 GFRP 抗浮锚杆杆体与灌浆体脱黏或者杆体被拔出的现象。这种破坏可归结为凸起的螺纹使得 GFRP 抗浮锚杆产生剪胀破坏^[24-25]。

与钢锚杆的荷载传递特性类似,GFRP 锚杆杆体-灌浆体之间黏结应力的峰值随荷载水平的提高逐渐向锚杆深部移动,杆体以渐近的方式发生滑动并使黏结应力重新分布,见图 11。由于加载端钢套筒的约束作用强,对 GFRP 锚杆杆体提供足够的界面压力,加载端杆体处于三向受力状态,而灌浆体的抗剪强度有限,所以,灌浆体与杆体会出现脱黏的现象。杆体与灌浆体的黏结应力低于钢套筒与 GFRP 锚杆的黏结应力,在灌浆体的抗剪强度还未完全发挥时,剪胀效应所引起的拉应力就已经达到或者超过灌浆体的抗拉强度,所以,GFRP 锚杆

拔出的同时,在混凝土基体表面时常伴随着灌浆体开裂的现象。

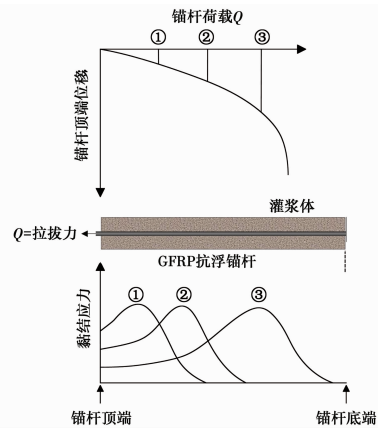


图 11 加载过程中黏结应力随 GFRP 锚杆深度的变化规律

Fig. 11 Change law of bond strength along with GFRP anchorage depth under load

3 结论

1) GFRP 抗浮锚杆发生拔出破坏,主要是由于凸起的螺纹表面劣化所引起的剪胀破坏。

2) 直径 25 mm, 灌浆体强度 M30, 锚固长度 1.3、0.55 m 的 GFRP 抗浮锚杆, 极限抗拔承载力较高, 分别为 255、195 kN, 满足工程抗浮要求。其他条件不变, 锚固长度由 22d 提高到 52d, GFRP 抗浮锚杆的极限抗拔承载力平均提高约 30.7%。

3) 试验条件下, GFRP 抗浮锚杆杆体与灌浆体界面平均黏结强度介于 2.41~5.10 MPa 之间, 高于《岩土锚固与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086-2015) 中钢锚杆与灌浆体(灌浆体强度为 M30) 的黏结强度推荐值。

4) 基于试验结果, 从细观角度揭示了 GFRP 抗浮锚杆的破坏机制。

参考文献:

- [1] 朱磊, 张明义, 白晓宇, 等. GFRP 抗浮锚杆在基础底板中的锚固性能现场试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 107-114.
ZHU L, ZHANG M Y, BAI X Y, et al. Field test on anchorage performance of GFRP anti-floating anchors in foundation slab [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(2): 107-114. (in Chinese)
- [2] 张明义, 朱磊, 白晓宇, 等. 钢筋抗浮锚杆外锚固承载性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38 (Sup1): 118-124.
ZHANG M Y, ZHU L, BAI X Y, et al. Experimental

- research on load bearing behavior of external anchorage of steel anti-floating anchors [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38 (Sup1): 118-124. (in Chinese)
- [3] KOU H, GUO W, ZHANG M. Pullout performance of GFRP anti-floating anchor in weathered soil [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49: 408-416.
- [4] LIU X, WANG J, HUANG J, et al. Full-scale pullout tests and analyses of ground anchors in rocks under ultimate load conditions [J]. *Engineering Geology*, 2017, 228: 1-10.
- [5] BENMOKRANE B, ALI A H, MOHAMED H M, et al. Laboratory assessment and durability performance of vinyl-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 114: 163-174.
- [6] VELJKOVIC A, CARVELLI V, HAFFKE M M, et al. Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 124: 40-53.
- [7] CARATELLI A, MEDA A, RINALDI Z, et al. Precast tunnel segments with GFRP reinforcement [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 60: 10-20.
- [8] YOST J, DINEHART D, GROSS S, et al. Fatigue behavior of GFRP and steel reinforced bridge decks designed using traditional and empirical methodologies [J]. *Bridge Structures*, 2015, 11(3): 87-94.
- [9] XU D, YIN J. Analysis of excavation induced stress distributions of GFRP anchors in a soil slope using distributed fiber optic sensors [J]. *Engineering Geology*, 2016, 213: 55-63.
- [10] 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.
LIU H D, YU X Z, LI G W. Experimental study on tensile mechanical properties of glass fiber reinforced plastic rebar [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(20): 3719-3723 (in Chinese)
- [11] 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 X, YUAN Y, 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)
- [12] 李国维, 高磊, 黄志怀, 等. 全长粘结玻璃纤维增强聚合物锚杆破坏机制拉拔模型试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1653-1663.
LI G W, GAO L, HUANG Z H, et al. Pull-out model experiment on failure mechanism of pull-length bonding glass fiber reinforced polymer rebar [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1653-1663. (in Chinese)
- [13] ZHU H H, YIN J H, YEUNG A T, et al. Field pullout testing and performance evaluation of GFRP soil nails [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 137(7): 633-642.
- [14] LI G W, PEI H F, HONG C Y. Study on the stress relaxation behavior of large diameter B-GFRP bars using FBG sensing technology [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(10): 1-12.
- [15] 白晓宇, 张明义, 刘鹤, 等. 风化岩地基全螺纹玻璃纤维增强聚合物抗浮锚杆承载特征现场试验[J]. *岩土力学*, 2014, 35(9): 2464-2472.
BAI X Y, ZHANG M Y, LIU H, et al. Field test on load-bearing characteristics of full-thread GFRP anti-floating anchor in weather rock site [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2464-2472. (in Chinese)
- [16] VILANOVA I, BAENA M, TORRES L, et al. Experimental study of bond-slip of GFRP bars in concrete under sustained loads [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 74(1): 42-52.
- [17] BENMOKRANE B, ROBERT M, MOHAMED H M, et al. Durability assessment of glass FRP solid and hollow bars (rock bolts) for application in ground control of Jurong Rock Caverns in Singapore [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 21(3): 06016002.
- [18] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120-2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)
- [19] LI C C, KRISTJANSSON G, HΦIEN A H. Critical embedment length and bond strength of fully encapsulated rebar rockbolts [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 59: 16-23.
- [20] ZHENG J J, DAI J G. Analytical solution for the full-range pull-out behavior of FRP ground anchors [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 58: 129-137.
- [21] NEMCIK J, MA S, AZIZ N, et al. Numerical

- modelling of failure propagation in fully grouted rock bolts subjected to tensile load [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 71: 293-300.
- [22] 黄志怀, 李国维, 王思敬, 等. 不同围岩条件玻璃纤维增强塑料锚杆结构破坏机制现场试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(5): 1008-1018.
- HUANG Z H, LI G W, WANG S J, et al. Field test on pullout behaviors of anchorage structures with glass fiber reinforced plastic rods for different surrounding rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27 (5): 1008-1018. (in Chinese)
- [23] 岩土锚固与喷射混凝土支护工程技术规范: GB 50086—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support: GB 50086-2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)
- [24] 白晓宇, 张明义, 寇海磊. 基于裸光纤光栅传感技术 GFRP 抗浮锚杆荷载传递机制的原位试验研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(8): 172-181.
- BAI X Y, ZHANG M Y, KOU H L. Field experimental study of load transfer mechanism of GFRP anti-floating anchors based on embedded bare fiber bragg grating sensing technology [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(8): 172-181. (in Chinese)
- [25] 白晓宇. GFRP 抗浮锚杆锚固机理试验研究与理论分析[D]. 山东 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- BAI X Y. Experimental study and theoretical analysis on the anchoring mechanism for GFRP anti-floating anchor [D]. Qingdao, Shandong: Qingdao University of Technology, 2015. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)