

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.014



GFRP 抗浮锚杆在基础底板中的锚固性能 现场试验研究

朱磊^a, 张明义^{a,b}, 白晓宇^{a,b}, 王永洪^a, 赵天杨^a

(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)

摘要:通过现场拉拔破坏性试验,测得不同直径的 GFRP 抗浮锚杆在基础底板内的极限承载力和滑移量,并与实际工程中不同形式的钢筋抗浮锚杆作比较,分析其承载性能和粘结特性。研究表明,在相同的混凝土强度与养护条件下,相同直径的 GFRP 抗浮锚杆的极限承载力、平均粘结强度与钢筋抗浮锚杆相比较,且 GFRP 抗浮锚杆的变形能够满足实际工程需求,充分验证了 GFRP 材料用作抗浮锚杆的先进性与合理性。基于试验结果与理论分析,给出了 GFRP 抗浮锚杆与基础底板的最佳锚固面积,并提出了计算公式。

关键词:GFRP 抗浮锚杆;承载力;锚固性能;最佳锚固面积;平均粘结强度

中图分类号:TU470 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0107-08

Field test on anchorage performance of GFRP anti-floating anchors in foundation slab

Zhu Lei^a, Zhang Mingyi^{a,b}, Bai Xiaoyu^{a,b}, Wang Yonghong^a, Zhao Tianyang^a

(a. School of Civil Engineering; b. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

Abstract: Through spot pull-out destructive test, ultimate bearing capacity and slippage in the foundation slab of GFRP anti-floating anchors with different diameter were monitored. Compared with some kinds of steel anti-floating anchors in the actual engineering, their bearing performance and bond behavior were analyzed. The results showed that under the same strength and curing condition of the concrete, ultimate bearing capacity of GFRP anti-floating anchor was larger than steel anti-floating anchor with same diameter, the average bond strength between GFRP anti-floating anchor and foundation slab was higher than the steel anti-floating anchor, moreover the deformation of GFRP anti-floating anchor can meet the engineering requirements, all of those fully verify that GFRP material as an anti-floating anchor was advanced and reasonable. Based on the experimental results and theoretical analysis, the best anchoring

收稿日期:2016-07-19

基金项目:国家自然科学基金(51278261);山东省自然科学基金(ZR2016EEQ08);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)

作者简介:朱磊(1991-),男,主要从事地基基础研究,(E-mail)zhuleibetter@163.com。
白晓宇(通信作者),男,博士,(E-mail)baixiaoyu538@163.com。

Received:2016-07-19

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51278261); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EEQ08); Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province(J16LG02); Applied Basic Research Programs of Qingdao(16-5-1-39-jch)

Author brief: Zhu Lei (1991-), main research interest: foundation, (E-mail)zhuleibetter@163.com.
Bai Xiaoyu (corresponding author), PhD, (E-mail)baixiaoyu538@163.com.

表 1 GFRP 抗浮锚杆和钢筋抗浮锚杆尺寸

Table 1 Size of GFRP and steel anti-floating anchors

锚杆编号	锚杆直径/mm	根数	锚固长度/mm	弯曲半径/mm	弯折长度/mm
GZ-D32-M420	32	2	420		
GZ-D28-M420	28	2	420		
SZ-D28-M420	28	2	420		
SW-D28-M420	28	2	420	84	420

1.2 试验材料

1.2.1 GFRP 抗浮锚杆 试验采用由南京某公司生产的 GFRP 抗浮锚杆,运用连续成型工艺,经预成型、固化后而形成试验要求的各尺寸抗浮锚杆。其外表面呈螺纹状,主要成分为玻璃纤维和环氧树脂,经出厂测试,杆体密度为 2.1 g/cm^3 ,弹性模量 41 GPa ,极限抗拉强度 675 MPa ,极限抗剪强度 150 MPa ;杆体树脂体积分数为 25% ,玻璃纤维体积分数为 75% 。

1.2.2 钢筋抗浮锚杆 钢筋抗浮锚杆所用钢筋为直径 28 mm 的三级螺纹钢,屈服强度 340 MPa ,极限抗拉强度 570 MPa ,伸长率 18% 。经钢筋切割机 and 弯曲机加工为试验要求尺寸。

1.2.3 混凝土底板 在试验场地,用挖掘机在已量测区域开挖基槽,基槽的尺寸:长度 \times 宽度 \times 深度为 $10 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$;在基槽内绑扎好试验锚杆,并灌注强度等级为 C30 的商品混凝土来模拟基础底板,养护 28 天后,测得同条件养护的边长为 150 mm 的立方体试块的抗压强度为 30.4 MPa 。

1.3 试验装置

试验装置为自行设计的非金属抗浮锚杆拉拔装置,如图 3 所示。因 GFRP 筋材抗剪性能较差,需提前在加载端用结构胶粘结钢套管对 GFRP 锚杆进行保护,为保证加载端能提供足够的拉拔力,试验所用钢套管的尺寸与文献[3]相同。试验需测量杆体上拔量,在试验装置安装前,将自行设计的位移测试装置(半圆钢管与角钢焊接件)用结构胶对称安装在距混凝土面 1 cm 的锚杆位置,钢筋抗浮锚杆则对称焊接两个角钢即可,安装完毕后,将精度为 0.01 mm ,量程为 30 mm 百分表竖直安装在相应的位移测试装置上,用于测量每级荷载作用下的锚杆的上拔位移量,见图 4、图 5。试验拉拔力由已标定好的手动油压千斤顶提供,其吨位为 50 t 、行程为 20 cm 。试验各级荷载通过标定好的 MGH500 锚索测力计

及 GSJ2A 型检测仪(量程为 500 kN ,分辨率 $\leq 1 \text{ kN}$)进行测量。在试验装置最上端将穿心铁块牢固焊接在钢套管上,用于提供锚固反力,钢筋抗浮锚杆则直接焊接在钢筋上即可。



图 3 试验装置图(倒置底板)

Fig. 3 Photo of test device (inverted motherboard)



图 4 GFRP 抗浮锚杆测试装置图

Fig. 4 Test device of GFRP anti-floating anchor



图 5 钢筋抗浮锚杆上拔量测试装置图

Fig. 5 Test device of steel anti-floating anchor

1.4 试验加载

根据相关文献规范^[16-18],试验采用分级、匀速加载方式,各级荷载为 30 kN ,荷载施加完毕每隔 5 min 读取杆体上拔量,当每级荷载杆体上拔量变化在 0.1 mm 之内,即可施加下一级荷载。当锚杆杆体破坏,杆体位移不收敛或锚杆位移增量过大时,可判定锚杆发生破坏,试验结束。

2 试验分析

2.1 抗浮锚杆破坏形式及极限承载力

试验各锚杆破坏形式如表 2 所示。

表 2 抗浮锚杆的破坏形式

Table 2 Failure modes of anchors

锚杆编号	锚杆直径/ mm	极限承载 力/kN	极限滑 移量/ mm	最终破 坏形式
GZ-D32-M420-01	32	324	10.31	滑移破坏
GZ-D32-M420-02	32	341	9.07	滑移破坏
GZ-D28-M420-01	28	297	12.75	滑移破坏
GZ-D28-M420-02	28	278	10.62	滑移破坏
SZ-D28-M420-01	28	281	14.685	滑移破坏
SZ-D28-M420-02	28	272	12.72	滑移破坏
SW-D28-M420-W420-01	28	327	11.79	拔断破坏
SW-D28-M420-W420-02	28	316	13.27	拔断破坏

抗浮锚杆外锚固破坏形式主要有两种:锚杆自身强度不足,杆体发生屈服破坏,当达到锚杆极限承载力时,杆体发生断裂;混凝土与锚杆界面粘结强度较低,其界面发生剪切,当达到最大粘结强度时,锚杆与混凝土之间发生滑移破坏。试验中 GZ-D32-M420、GZ-D28-M420 和 SZ-D28-M420 这 3 种型号锚杆均发生滑移破坏,而对 SW-D28-M420-W420 型号锚杆在距混凝土面大约 7.5 cm 处发生拔断破坏。

2.1.1 试验破坏特征分析 在 GFRP 抗浮锚杆拉拔过程中,当荷载加载到 180~210 kN 时,锚杆内部纤维开始断裂,杆体发生屈服,随着加载的继续进行,纤维丝断裂声越来越大且连续不断,并伴有混凝土破碎的声音,杆体相对于混凝土的位移量增大,当达到杆体的破坏荷载时,随着“嘭”的一声巨响,杆体发生滑移破坏,周围混凝土发生破碎;对于直锚的钢筋抗浮锚杆,在加载初始阶段,试验荷载上升较快,随着加载继续,荷载达到 240~280 kN 时,千斤顶加载困难,此时达到钢筋屈服阶段,且周围混凝土出现“起皮”现象,随着荷载持续增大,当到达破坏荷载时,杆体发生滑移破坏;对于弯曲的钢筋抗浮锚杆,当达到钢筋屈服阶段,杆体相对于混凝土滑移量增大,当加载到 300 kN 以后,杆体在接近混凝土表面位置直径变小,随着荷载达到极限值,锚杆瞬间发生断裂,断裂锚杆的自由端飞起,并打翻试验测试装置。各锚杆破坏形式见图 6~8。



图 6 GFRP 抗浮锚杆滑移破坏

Fig. 6 Pullout failure of GFRP anti-floating anchors



图 7 钢筋抗浮锚杆滑移破坏

Fig. 7 Pullout failure of steel anti-floating anchors



图 8 钢筋抗浮锚杆拔断破坏

Fig. 8 Tensile failure of steel anti-floating anchors

2.1.2 锚杆极限抗拔承载力分析 从表 2 可以看出,在相同的试验条件下,相同的锚固长度、不同直径的 GFRP 抗浮锚杆,直径越大,极限抗拔承载力越大;锚杆极限承载力的增大,主要是由于锚杆直径增大,锚固段杆体与混凝土的接触面积增大,混凝土与杆体之间可以形成较大的粘结力。试验过程中,直径大的 GFRP 抗浮锚杆与直径小的相比,其极限承载力提高幅度为 18.75%,张明义等^[14]通过室内对拉试验,测得直径 28 mm、锚固长度为 420 mm 增设螺母托盘的 GFRP 抗浮锚杆极限承载力比直锚的 GFRP 抗浮锚杆的极限承载力提高 24.19%,比较两者的极限承载力提高幅度发现:就锚杆的承载力

而言,增加较小的 GFRP 抗浮锚杆直径,其承载力增幅较大,可以取代螺母托盘的作用。对于相同锚固长度、相同直径的 GFRP 抗浮锚杆和钢筋抗浮锚杆,两者极限承载力相差不大,但都小于弯曲处理后的钢筋抗浮锚杆 SW-D28-M420-W420;对于 GZ-D32-M420 与 SW-D28-M420-W420 两类抗浮锚杆,GFRP 抗浮锚杆极限承载力略大一些,因此,GFRP 抗浮锚杆可以替代钢筋抗浮锚杆,能够满足实际工程的要求。另外,GZ-D32-M420、GZ-D28-M420 和 SZ-D28-M420 这 3 种型号锚杆均发生滑移破坏,说明在相应的破坏荷载作用下,各锚杆均未达到杆体材料本身的极限破坏状态,还有相应的荷载储备。

2.2 试验锚杆荷载与滑移量之间的关系

试验测试装置设置在锚杆自由段底部,高出混凝土面 1~2 cm,所以,试验百分表测出的位移量可以认为是抗浮锚杆相对于混凝土底板的滑移量。各类锚杆荷载与滑移量关系见图 9。

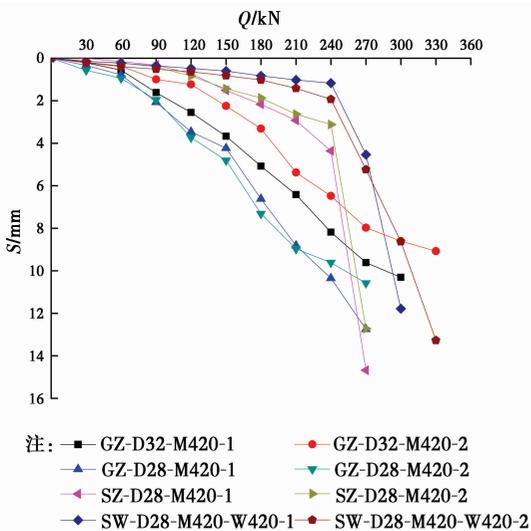


图 9 抗浮锚杆荷载与滑移量曲线

Fig. 9 Load-slip curves of anti-floating anchors

由图 9 可知,在相同试验条件下,同尺寸的 GFRP 抗浮锚杆的最终滑移量比钢筋抗浮锚杆小,因钢筋弹性模量较大,在加载初始阶段,钢筋抗浮锚杆滑移量较小,当达到屈服阶段,滑移量剧增,超过 GFRP 抗浮锚杆,由此说明,相同条件下,GFRP 材料与混凝土之间的粘结性能比钢筋好。相同试验条件的不同直径的 GFRP 抗浮锚杆,锚杆直径越大,其相对于混凝土滑移量越小,且在每一级荷载作用下,滑移变化量均小。究其原因,主要是 GFRP 抗浮锚杆直径越大,与混凝土的接触面积越大,在相同的荷载作用下,单位面积分担的平均荷载越小,其粘结强

度越大,因此,锚杆滑移量变化值较小。就钢筋抗浮锚杆而言,埋入混凝土中越长的钢筋抗浮锚杆,即弯折处理后的钢筋抗浮锚杆,其滑移量较小,原因也是由于混凝土接触面积较大所致。

由图 9 还可以看出,GFRP 抗浮锚杆与钢筋抗浮锚杆荷载-滑移曲线变化特征不同。GFRP 抗浮锚杆变化曲线变化均匀,呈缓变型,且锚杆直径越大,曲线斜率越小。在试验加载初期,GFRP 抗浮锚杆滑移量较小,而后变化量有所增加,但较均匀。而钢筋抗浮锚杆荷载-滑移曲线存在明显的拐点;在加载初期,荷载-滑移曲线呈线性分布,滑移量随荷载的变化较小,约 1~2 mm,当荷载达到 240 kN 时,曲线出现拐点,随后,锚杆滑移量骤增,曲线出现明显的陡降。由此可知,GFRP 材料与混凝土的协同工作能力较钢筋更强,能够满足实际工程的需要。

2.3 平均粘结强度

在锚固长度较短的情况下,锚固界面上的剪应力可以认为是均匀的,将拉拔承载力除以锚杆与锚固混凝土的接触面积所得到的值定义为锚杆与混凝土之间的平均粘结应力^[19-21]。根据相应的计算方法,计算各类型抗浮锚杆的平均粘结强度,比较其强度值如图 10 所示。

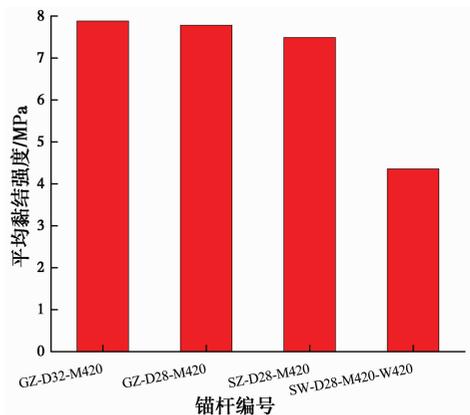


图 10 抗浮锚杆平均粘结强度

Fig. 10 The average bond strength of anti-floating anchors

由图 10 可知,对于发生滑移破坏的不同直径的 GFRP 抗浮锚杆,平均粘结强度相差不大;而相同破坏特征、相同直径、不同材料的 GZ-D28-M420 和 SZ-D28-M420 两种型号的锚杆,GFRP 抗浮锚杆的平均粘结强度大于钢筋抗浮锚杆,可以说明,GFRP 材料与混凝土的粘结性能较好,主要由于 GFRP 材料与混凝土的弹性模量相近所致;对于 SZ-D28-M420 与 SW-D28-M420-W420 两种钢筋抗浮锚杆,

锚杆伸入混凝土中的尺寸越大,其平均粘结性能越小,由两种锚杆发生破坏方式不同也可证明,钢筋抗浮锚杆锚固长度愈短,愈能发挥杆体与混凝土之间的粘结力。

因 GZ-D32-M420 和 GZ-D28-M420 两种型号锚杆的平均粘结强度近似相等,破坏形式相同,也可说明当 GFRP 抗浮锚杆平均粘结强度达到锚杆与混凝土的极限粘结应力,却未达到锚杆本身的屈服极限时,锚杆发生滑移破坏。结果表明,在极限拉拔荷载作用下,锚杆发生滑移破坏时的平均粘结强度为锚杆的极限平均粘结强度;当锚杆处于极限平均粘结强度下,增加材料与混凝土接触面积,其最终的滑移破坏荷载会相应增加,当该值超过锚杆自身发生拉断破坏荷载时,GFRP 抗浮锚杆会发生拉断破坏。在这里,可以定义,当 GFRP 抗浮锚杆最大滑移破坏荷载等于其拉断破坏荷载时,GFRP 抗浮锚杆与混凝土底板的接触面积为最佳外锚固面积,它的取值与锚杆直径和锚固长度有关。其相应的计算式为

$$A = P \cdot A_0 / P_0 \quad (1)$$

式中: A 为锚杆最佳外锚固面积, mm^2 ; P 为锚杆拉断破坏时的荷载, kN ; P_0 为锚杆滑移破坏时荷载, kN ; A_0 为滑移破坏时,锚杆与混凝土底板的接触面积, mm^2 。

GFRP 材料为正交各向异性材料,其纵向和横向的力学特性不同,所以以上分析只针对直锚形式的 GFRP 抗浮锚杆外锚固情况。

2.4 平均粘结强度-滑移量曲线分析

GFRP 筋与混凝土的粘结特性的研究是 GFRP 抗浮锚杆的关键技术问题,GFRP 筋与混凝土之间的粘结力可以实现锚杆与混凝土之间的荷载传递。因此,GFRP 抗浮锚杆的平均粘结强度与滑移关系可以反映杆体与混凝土共同作用的机理。锚杆平均粘结强度与滑移曲线如图 11 所示。

在锚杆受拉过程中,锚杆与混凝土之间的作用力主要由化学胶着力、机械咬合力、相互摩擦力组成。由图 11 可知,GFRP 抗浮锚杆与钢筋抗浮锚杆粘结-滑移曲线变化规律不同,GFRP 抗浮锚杆曲线呈缓降趋势,不存在明显拐点,在初始阶段,锚杆滑移量甚小,而其平均粘结强度增长较大,说明此时锚杆与混凝土之间的化学胶着力起主要作用;随着荷载的增加,锚杆平均粘结强度随荷载增速变小,说明二者的机械咬合力开始发挥作用;在试验最后阶段,曲线基本呈线性变化,说明此时锚杆与混凝土之间化学胶着力基本完全丧失,机械咬合力发挥主要作

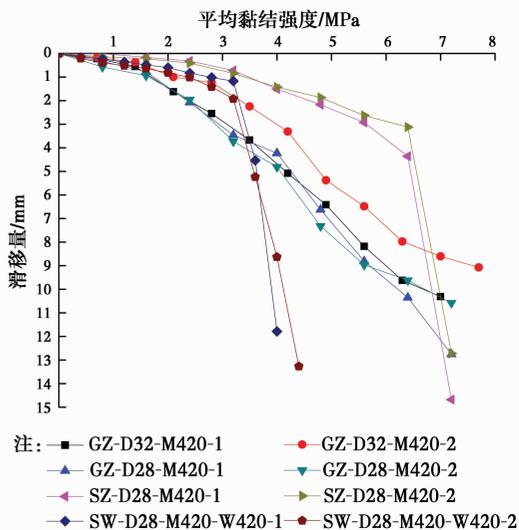


图 11 锚杆平均粘结强度与滑移量曲线

Fig. 11 Average bond strength-slip curves of anchors

用。对于钢筋抗浮锚杆,其曲线由缓变段和陡降段两部分组成,并有明显拐点,当 $0 \sim 80 \text{ kN}$ 时,化学胶着力在杆体与基础底板之间起主要作用,曲线较平缓;随着试验进行,曲线斜率变大,杆体与混凝土之间机械咬合力开始发挥作用;进而,两者关系曲线出现拐点,机械咬合力发挥作用越来越大,致使杆体上拔量增速变大,平均粘结强度增速变缓。由此可见,GFRP 锚杆与混凝土之间的作用机理与钢筋抗浮锚杆相比不同,GFRP 锚杆与混凝土之间的化学胶着力较大,使加载过程中,位移变化量更均匀,也可证明,GFRP 材料与混凝土的协同作用能力更强。

对于不同直径的 GFRP 抗浮锚杆,在相同的平均粘结强度下,锚杆直径越大,滑移量越小,说明锚杆与混凝土接触面积越大,其分担荷载能力越强,致使其平均粘结能力发挥越慢。对于不同形式的钢筋抗浮锚杆,相同的荷载作用下,埋入混凝土内长度较短的锚杆粘结能力发挥较快;另外,锚杆埋入长度越长,曲线拐点出现越慢,可见,锚杆锚固长度越长,即埋入混凝土中长度越长,杆体与混凝土之间的联合作用效果越好。对于不同的材料的抗浮锚杆,GFRP 材料曲线变化更均匀,也可说明其与混凝土之间粘结性能更好,更能满足实际抗浮工程的需要。

2.5 对于单根抗浮锚杆尺寸的确定

在 GFRP 抗浮锚杆外锚固段,锚杆与混凝土之间粘结力的大小决定了锚杆承载力,而锚杆的形式及锚固长度是粘结力的主要影响因素。由此,通过拉拔试验测定各类 GFRP 抗浮锚杆在不同标号混凝土内的极限平均粘结强度和拉断破坏荷载,可以求

得 GFRP 抗浮锚杆最佳外锚固尺寸,进而能为 GFRP 抗浮锚杆的优化设计及工程应用提供依据。

3 结论

1)GFRP 抗浮锚杆直径越大,其外锚固极限承载力越大,可见,在工程中提高有限的杆体直径,可以取代配套螺母托盘的作用,施工简便。

2)与工程中常见的钢筋抗浮锚杆相比,GFRP 抗浮锚杆有较强的适用性,能够满足工程中抗浮锚杆的承载力和变形的需求。

3)通过试验研究,给出了 GFRP 抗浮锚杆最佳外锚固面积,即当 GFRP 抗浮锚杆最大滑移破坏荷载等于其拉断破坏荷载时,GFRP 抗浮锚杆与混凝土底板的接触面积,并提出了其相应的计算公式。

4)通过对试验变化曲线分析可知,与钢筋抗浮锚杆相比,GFRP 抗浮锚杆与混凝土之间粘结性能较好,GFRP 材料与混凝土之间的协同作用更佳,更能满足实际工程需要。

5)基于试验结果与理论分析,得到 GFRP 抗浮锚杆最佳外锚固面积,并提出计算式,为 GFRP 抗浮锚杆优化设计和工程应用提供借鉴和参考。

参考文献:

[1] 夏宁,任青文,曹茂森. 锈蚀锚杆与砂浆黏结机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1240-1243.
XIAN N, REN Q W, CAO M S. Experimental study on bonding mechanism between corroded bolts and grout [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1240-1243. (in Chinese)

[2] 曾宪明,陈肇元,王靖涛,等. 锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2235-2242.
ZENG X M, CHEN Z Y, WANG J T, et al. Research on safety and durability of bolt and cable-supported structures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2235-2242. (in Chinese)

[3] 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: Qingdao Technological University, 2015. (in Chinese)

[4] ROBERT M, BENMOKRANE B. Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 274-284.

[5] 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.

[6] 贾新,袁勇,李焯芬. 新型玻璃纤维增强塑料砂浆锚杆的粘结性能试验研究[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)

[7] TENG J G, CAO S Y, LAM L. Behavior of GFRP-strengthened RC cantilever slabs [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(7): 339-349.

[8] 薛伟辰,刘华杰,王小辉. 新型 FRP 筋粘结性能研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 104-109, 123.
XUE W C, LIU H J, WANG X H. Studies on bond properties of new type FRP bars [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 104-109, 123. (in Chinese)

[9] 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.

[10] 刘颖浩,袁勇. 全螺纹 GFRP 粘结型锚杆锚固性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 394-400.
LIU Y H, YUAN Y. Experimental research on anchorage performance of full-thread GFRP bonding anchor bolts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 394-400. (in Chinese)

[11] 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 weathered rock site [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2464-2472. (in Chinese)

[12] 郝庆多,王言磊,侯吉林,等. GFRP 带肋筋粘结性能试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 158-165.
HAO Q D, WANG Y L, HOU J L, et al. Experimental study on bond behavior of GFRP ribbed rebars [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 158-165. (in Chinese)

[13] 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)
- [14] 张明义, 白晓宇, 李伟伟, 等. GFRP 抗浮锚杆螺母托盘锚具外锚固性能试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(1): 239-246.
ZHANG M Y, BAI X Y, LI W W. Experiment on external anchorage performance for nut-pallet anchorage of GFRP anti-floating anchors [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47 (1): 239-246. (in Chinese)
- [15] 混凝土结构试验方法标准: GB 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Standard methods for testing of concrete structures; GB 50152-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Technical code for testing of building foundation piles; JGJ 106-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [17] 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 & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [18] 岩土锚杆(索)技术规程: CECS 22—2005 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
Technical specification for ground anchors; CECS: 22-2005 [S]. Beijing: China Planning Press, 2005. (in Chinese)
- [19] BENMOKRANE B, TIGHIOUART B, THERIAULT M. Bond strength of fiber reinforced plastic(FRP) bars [C]// Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Sherbrooke, Quebec, Canada, 1997.
- [20] MASMOUDI A, MASMOUDI R, OUEZDOU M B. Thermal effects on GFRP rebars; experimental study and analytical analysis [J]. Materials and Structures, 2010, 43(6): 775-788.
- [21] 郝庆多, 王言磊, 欧进萍. 拉拔条件下 GFRP 筋与混凝土粘结强度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 103-111.
HAO Q D, WANG Y L, OU J P. Experimental investigation on bond strength between GFRP rebars and concrete under pullout conditions [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29 (1): 103-111. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)