DOI: 10.11779/CJGE202007014

大直径 GFRP 抗浮锚杆蠕变试验及蠕变模型

白晓宇^{1,2},郑 晨¹,张明义^{1,2},王永洪^{*1,2},王海刚¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033; 2. 山东省高等学校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:为深入探究在长期应力作用下大直径 GFRP 抗浮锚杆的力学性能变化,通过施加长期荷载对 GFRP 抗浮锚杆 进行了室内足尺试验。试验结果表明:试验锚杆在其破坏荷载的 38%~45%荷载作用下才发生蠕变。通过标准线性固 体模型对 GFRP 抗浮锚杆的蠕变规律进行分析,对刚度随时间变化曲线进行拟合,拟合曲线与实测曲线吻合度较好; 进一步结合损伤力学理论和蠕变模型推导了 GFRP 抗浮锚杆的抗拔承载力,实现了 GFRP 抗浮锚杆长期承载力的精准 预测,为 GFRP 锚杆在抗浮工程中的应用提供理论依据。

关键词: GFRP 抗浮锚杆; 蠕变试验; 长期应力; 标准线性固体模型; 刚度; 时间损伤

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2020)07 - 1304 - 08 **作者简介:** 白晓宇(1984—),博士(后),副教授,主要从事地基基础与城市地下工程领域的研究工作。E-mail: baixiaoyu538@163.com。

Creep tests and standard linear solid model for large-diameter glass fiber-reinforced polymer anti-floating anchors

BAI Xiao-yu^{1, 2}, ZHENG Chen¹, ZHANG Ming-yi^{1, 2}, WANG Yong-hong^{1, 2}, WANG Hai-gang¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. Cooperative Innovation Center of

Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China)

Abstract: With the advancement of science and technology and the concept of green environmental protection, China's construction industry is gradually moving towards green and sustainable buildings. The application of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) anchor rods instead of the traditional steel anchor rods and underground anti-floating engineering can not only save the engineering cost effectively, but also extend the service life of anti-floating structures and prevent the pollution of corrosion steel bars to underground environment. In order to further explore the changes of mechanical properties of large-diameter GFRP anti-floating bolts under long-term stress, an indoor full-scale test on GFRP anti-floating bolts is conducted by applying long-term loads. The test results show that the test bolt does not creep until 38%~45% of its failure load is applied. Through the standard linear solid model, the creep law of GFRP anti-floating bolts is investigated. The model fits the stiffness versus time curve, and the fitted curve agrees well with the measured one. Furthermore, the combination of damage mechanics theory and creep model is used to derive the uplift capacity of GFRP anti-floating anchors, and the accurate prediction of long-term bearing capacity of GFRP anti-floating anchors is realized, which provides a theoretical basis for the application of GFRP anchors in anti-floating engineering.

Key words: GFRP anti-floating anchor; creep test; long-term stress; standard linear solid model; stiffness; time damage

0 引 言

随着建筑施工技术的发展、建(构)筑物埋深的 增加,建筑地下结构工程的抗浮问题日益凸显。抗浮 锚杆因其施工的便捷性及优异的抗浮效果成为近年来 使用最为广泛的抗浮措施,抗浮工程的特殊性决定着 抗浮锚杆为一项永久性工程。但抗浮锚杆处于复杂的 地下环境中,地下水、围岩土体中的矿物质、地下交 通轨道间的杂散电流都会对抗浮锚杆的工程质量造成 危害,严重制约着其使用期限^[1-3]。因易锈蚀而导致强 度降低,素来有"定时炸弹"之称的钢筋锚杆不适宜 用于地下结构抗浮的工程中,非金属聚合物锚杆则成 为抗浮锚杆的"主力军"。

玻璃纤维增强型聚合物 (glass fiber reinforced polymer, GFRP) 因其优异的抗拉性能、耐腐蚀性能、

*通信作者(E-mail: hong7986@163.com)

基金项目:国家自然科学基金项目(51708316);中国博士后科学基金项目(2018M632641);山东省博士后创新项目(201903043) 收稿日期:2019-10-28

质轻且成本低廉等特性从一众纤维增强聚合物中脱颖 而出,成为目前使用广泛的非金属聚合物抗浮锚杆^[4-5]。 因 GFRP 抗浮锚杆推广年限较短,国内外对 GFRP 抗 浮锚杆在长期荷载作用下其承载性能,即蠕变特性的 研究较为全面^[6-9]。Gonilha 等^[10]进行 GFRP 筋与混凝 土蠕变试验时提出 GFRP 筋锚固于混凝土中的蠕变率 远低于 GFRP 筋自身蠕变率。Li 等^[11]结合 FBG 传感 器技术,探究了在长期应力作用下 B-GFRP 锚杆杆体 应力的变化特征。Vilanova 等^[12]对 GFRP 锚杆及钢筋 锚杆进行了长达130 d的拉拔试验,提出在长期荷载 作用下 GFRP 锚杆与混凝土间相对滑移量大于钢筋锚 杆与混凝土间相对滑移量可能为二者间黏结化学键不 同所致。白晓宇等^[13]对 GFRP 抗浮锚杆进行长期应力 下拉拔试验后,在损伤力学基础上结合 Burgers 模型 计算提出 GFRP 抗浮锚杆的长期抗拔性能较好。 Rossini 等^[14]探究预应力 GFRP-钢绞线在长期应力作 用下预应力损失情况,认为 GFRP 材料有效解决了钢

筋预应力锚杆在长期应力作用下预应力损失率较高的问题。

目前对于大直径的 GFRP 抗浮锚杆在长期荷载作 用下的变形性能研究较少,而且涉及的模型参数较多, 在工程应用中带来了极大的不便。鉴于此,本文根据 室内足尺大直径 GFRP 抗浮锚杆(25 mm)在长期应 力作用下位移的变化对其蠕变特性进行研究,并引入 标准线性固体模型对其蠕变本构方程、刚度随时间变 化规律进行分析,结合损伤力学理论对大直径 GFRP 抗浮锚杆在实际工程中的应用提供理论依据。

1 蠕变试验方案

1.1 蠕变试验材料

(1) GFRP 抗浮锚杆

本试验使用的锚杆为南京某公司生产的型号为 YFH50 的一次挤压成型全螺纹 GFRP 抗浮锚杆。本批 次锚杆直径为 25 mm,锚筋中玻璃纤维与环氧树脂体 积比为 3:1,锚筋密度为 2.1 g/cm³。经测量试验使用 批次锚杆弹性模量为 51 GPa,平均极限抗拔承载力为 342 kN,极限抗拉强度为 675 MPa,极限抗剪强度为 150 MPa。

(2) 混凝土

本次试验采用 C30 商品混凝土垂直浇筑成 1000 mm×1000 mm×1600 mm 的立方体试块模拟 GFRP 抗浮锚杆锚固围岩层,振捣密实后带模标准养护 28 d 后拆模。并采用同批次混凝土浇筑 2 组共 6 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,与模拟围岩层 一起养护 28 d 后测得其平均抗压强度为 28.8 MPa。

(3) 锚固砂浆

本试验使用山东"山水牌"P·O 42.5 普通硅酸盐 水泥,砂采用级配良好的中砂,水为自来水。拟使用 强度为 M30 的砂浆,水泥:砂:水的质量比为1:1: 0.45,浇筑 6 个 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方 体试块,标准养护 28 d 后测得其平均抗压强度为 35.5 MPa。

1.2 试验方案

本次试验拟对 4 根 GFRP 抗浮锚杆进行长期应力 作用下的室内足尺拉拔试验,试验锚杆的具体参数如 表 1 所示。

表1 试验参数

Table 1 Test parameters							
试件	锚杆直	锚杆长	锚固长	混凝土强	砂浆强		
编号	径/mm	度/mm	度/mm	度等级	度等级		
G1-G4	25	2 500	1 300	C30	M30		

将养护好的模拟围岩混凝土试块拆模后,采用潜 孔钻机在试块对角线全程取芯,为防止同组两根试验 锚杆上拔时互相干扰,根据以往试验经验每个孔距混 凝土立方体边缘 30 cm,孔位布置如图 1 所示。成孔 完毕并清孔后将完成绑扎的试验 GFRP 锚杆放入孔洞 中,注入配置好的 M30 砂浆,标准养护 28 d 后进行 长期拉拔试验并测定其蠕变位移。



图 1 试件孔位布置示意图



1.3 试验过程

(1) 试验装置

加载装置按图 2 布置。将试验锚杆置于中间留有 孔洞,截面尺寸为 700 mm×200 mm×300 mm 的箱型 反力梁正中央,上架设 2 根 H 型钢块。将钢垫板、1 台 60 t,行程为 20 cm 的手动式油压穿心千斤顶、山 东科技大学生产的型号 MGH 500 锚索测力计、钢套 管、锚具依次在 GFRP 抗浮锚杆自由段组装调试好, 采用精度为 0.01 mm,量程为 30 mm 的百分表对锚杆 相对混凝土位移进行测读。



图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading devices

(2) 加载方式

本次试验为测定 GFRP 抗浮锚杆在长期应力作用 下的蠕变位移规律,整个加载过程采用逐级加载法, 每级荷载设定为 30 kN 保持 20 d,直至最终锚杆发生 破坏。试验人员根据锚索测力计检测穿心千斤顶压力 施加稳定情况,如若发生压力不足应及时补足压力, 维持试验过程荷载恒定。每级荷载施加完毕后应立即 测读百分表并记录位移数据,之后每隔 5 min 进行测 读直至百分表读数恒定不再发生改变。待该级荷载稳 定后,前 72 h 每隔 4 h 对百分表读数进行记录(每日 0:00—8:00 不进行读数),72 h 后每 24 h 对百分表进 行测读并记录数据直至每级荷载稳定至 20 d 后施加下 一级荷载。试验过程如图 3 所示。



(a) 锚杆安装示意图



(b) 加载装置示意图 图 3 GFRP 抗浮锚杆蠕变试验过程 Fig. 3 Creep test process of GFRP anti-floating anchors

2 试验结果与分析

2.1 GFRP 抗浮锚杆破坏形式

本次试验4根GFRP抗浮锚杆最大加载量、滑移 值及破坏形态如表2所示。

表 2 蠕变试验结果统计

Table 2 Statistical results of counter-pulled tests

试件 编号	锚固长 度/mm	破坏荷载 /kN	最终滑移量 /mm	破坏形式
G1	1300	266	11.30	
G2	1300	231	7.65	世山西村
G3	1300	227	7.20	拟山蚁州
G4	1300	220	6.98	

4 根 GFRP 抗浮锚杆破坏形式均为外锚固段砂浆 出现裂缝,锚杆与砂浆间发生黏结滑移(剪切)破坏, 杆体从锚固体中拔出。因 GFRP 材料弹抗剪强度较小、 脆性较大,对 GFRP 抗浮锚杆杆体施加向上的拉拔荷 载时极易对锚杆杆体表面肋纹产生磨损,导致 GFRP 抗浮锚杆与锚固砂浆间黏结力中起主要作用的机械咬 合力迅速下降,锚杆被拔出。此时 GFRP 抗浮锚杆杆 体自身强度仍未完全发挥,锚固体系仍具有较高的抗 拔力储备,这亦与白晓字等^[13]的研究结果一致。

2.2 GFRP 抗浮锚杆蠕变特性及分析

一般来说,固体材料在长期稳定的力学作用下易发 生应力松弛的现象,这种在长期稳定荷载作用下产生随 时间增加而增加的变形现象称之为蠕变。不同荷载水平 下4根 GFRP 抗浮锚杆的位移 - 时间曲线如图4 所示。

由图 4 可知,试验锚杆 G1 在 90 kN 荷载作用下 基本未发生蠕变现象,位移 - 时间曲线为平稳的直线; G1 受到荷载为 120~210 kN、G2、G3 及 G4 受到荷 载为 90~180 kN 每级荷载刚开始施加时,位移 - 时间 曲线斜率出现较小增长,后续趋于平稳,为典型的衰 减蠕变行为,表明此时 GFRP 抗浮锚杆所受荷载小于 其极限抗拔荷载。当试件G1 所受荷载增加至 240 kN,





试件 G2、G3 及 G4 所受荷载增加至 210 kN 时,其 位移-时间曲线均呈快速上扬趋势,为非衰减蠕变, 其曲线非衰减蠕变的过渡蠕变段、稳态蠕变段、加速 蠕变段表现都较为明显,表明 240 kN 已较为接近试件 G1 的极限抗拔荷载, 210 kN 较为接近 G2、G3 及 G4 的极限抗拔荷载。且结合表 2 可知,试件 G1 产生初 始蠕变荷载为 120 kN,为其破坏荷载的 45%;试件 G2、G3及G4产生初始蠕变荷载均为90kN,分别为 其破坏荷载的 38%, 39%, 41%, 表明大直径的 GFRP 抗浮锚杆在其极限荷载的 40%以下荷载水平工作时展 现蠕变性能较优良。

蠕变力学模型 3

3.1 标准线性固体力学模型

标准线性固体模型在 Kelvin 模型边串联了 1 个 Hooke 弹簧元件的三元件模型,用以改善原 Kelvin 模 型未能对材料瞬时普弹性进行模拟的缺点[15],标准线 性固体模型如图5所示。



图 5 标准线性固体模型

Fig. 5 Standard linear solid model

由标准线性固体模型可得
$$\sigma = E_1 \varepsilon_1$$
,

$$\sigma = E_2 \varepsilon_2 + \eta \varepsilon_2 \quad , \tag{2}$$

(1)

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad . \tag{3}$$

式中 σ 为元件所受应力; E_1 , E_2 为弹簧元件刚度;

 ε_1 , ε_2 为元件所受应变; η 为黏性元件黏度。

对式(1)~(3)进行 Laplace 变换后重新代入 式(3),进行逆变换可得到

$$(E_1 + E_2) \cdot \sigma + \eta \cdot \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}t} = E_1 E_2 \varepsilon - E_1 \eta \cdot \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} \quad \circ \quad (4)$$

在蠕变情况下,假设标准线性固体模型受到的恒 定轴向拉力为F,则该模型蠕变方程可化为

$$\mu = F \cdot \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \cdot \left[1 - \exp(-\frac{E_2}{\eta} t) \right] \right\} \quad , \quad (5)$$

式中, μ为模型的蠕变位移。

本文参照文献[16]设
$$M = \frac{1}{E_1}$$
, $N = \frac{1}{E_2}$, $P = \frac{E_2}{\eta}$,

并代入式(5)中可得

$$\mu = F \cdot \left[M + N \cdot (1 - e^{-Pt}) \right] \quad . \tag{6}$$

因将指数函数展开可得

$$e^{x} = 1 + x + \frac{x^{2}}{2!} + \frac{x^{3}}{3!} + \dots + \frac{x^{n}}{n!}$$
, (7)

其展开式形式与多项式函数 ($y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^2$) $a_{3}x^{3} + \dots + a_{n}x^{n}$)类似,为求解式(6)中力学参数 模型,对锚杆 G1 及 G2 位移 - 时间曲线进行多项式线 性回归分析,回归方程系数如表 3~6 所示。

将式(6)中e^{-Pt}展开可得

$$e^{-Pt} = 1 - Pt + \frac{P^2 t^2}{2!} - \frac{P^3 t^3}{3!} + \dots + (-1)^n \frac{P^n t^n}{n!}, \quad (8)$$

210

3.27

			表3 G1 回归	3方程系数			
		Table 3	Regression equ	ation coeffic	ient of G1		
荷载/kN	a_0	a_1	<i>a</i> ₂	$a_3/10^{-4}$	柞	关系数	RSS
90	1.1962	0.06436	-0.00565	1.50860	0	.93677	0.00425
120	1.5893	0.08927	-0.00778	2.06373	0	.94608	0.00712
150	2.1805	0.09880	-0.00956	1.54982	0	.82454	0.01124
180	2.6259	0.1270	-0.01193	3.46620	0	.93477	0.01791
210	3.2676	0.2396	-0.01835	5.98803	0	.98725	0.07331
			表4 G2 回归	3方程系数			
		Table 4	Regression equ	ation coeffic	ient of G2		
荷载/kN	a_0	a_1	<i>a</i> ₂		$a_3/10^{-4}$	相关系数	RSS
120	1.4192	0.06208	-0.00	538	1.42269	0.94623	0.00349
150	1.9697	0.06935	-0.00	578	1.48587	0.95079	0.00455
180	2.3813	0.11499	-0.01	032	2.79126	0.90694	0.01907
210	3.3777	0.15655	-0.01	405	3.80348	0.89809	0.03902
240	4.5065	0.34547	-0.02	331	7.40548	0.98811	0.18094
			表5 G3 回归	3方程系数			
		Table 5	Regression equ	ation coeffic	ient of G3		
荷载/kN	a_0	a_1	a_2		$a_3/10^{-4}$	相关系数	RSS
90	0.8516	0.06642	-0.00)62	1.71991	0.77787	0.01501
120	1.3014	0.11761	-0.01	036	2.76950	0.93243	0.01506
150	2.0481	0 12028	-0.00	72.7	1 95009	0 91737	0.00911
180	2,4940	0 14751	-0.01	055	2 78375	0 95014	0.01258
210	3.3397	0.19222	-0.01	044	3.10581	0.99380	0.03882
			表 6 G4 回归	1方程系数			
		Table 6	Regression equ	ation coeffic	ient of G4		
荷载/kN	a_0	a_1	<u>a</u> 2		$a_3/10^{-4}$	相关系数	RSS
90	1 0462	0.06436	-0.00	565	1 50860	0.93677	0.00425
120	1 4347	0.08728	-0.00	758	2 00884	0.94825	0.00658
150	1 9849	0.09635	-0.00	438	1 22507	0 70148	0.01022
180	2 4220	0.17214	-0.01	100	3.03600	0.03280	0.01500
210	3 0665	0.24053	-0.01	846	6 00744	0.93289	0.07061
<u>将式 (8)</u> 代入式	(6) 由可得	0.21000	0.01	$a r^3 \pm \cdots$	$+a x^n = \pm \pm \pm$	(9) 联立, 将4	
	ENP^2t^2			$E \not \rightarrow \lambda$	可報想計析		岁级巨足相同1275 造刑会粉加丰 7~
$\mu = FM + FNPt -$	$-\frac{1}{2}$ +			$F \downarrow \backslash \land$	り 胖待风作	FUI、U2 ss文/	医至参数如衣 //~
	2			10 所示。	5		
FNF	$\frac{D^3t^3}{2} + \cdots + (-$	$1)^{n-1} \frac{FNp^n t^n}{1}$	· (9)	由表	長 7~10 可し	以看出,4 根锚材	干均在轴向拉拔力
6		<i>n</i> !	- (-)	最小时名	4模型参数边	大最大值,且随着	着作用于 GFRP 抗
将锚杆每级得	导到的多项式方	程 $y = a_0 + a_1$	$x + a_2 x^2 +$				
			- 表7G1力	学参数表			
		Tabl	e 7 Mechanical	parameters	of G1		
荷载/kN	位移/mi	m	$E_1/(\mathrm{kN}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$	_	$E_2/(\text{kN}\cdot\text{mm})$	⁻¹) η/	$(kN \cdot d \cdot mm^{-1})$
120	1.42		84.5547		2.7920		16.1082
150	1.97		76.1537		2.4036		14.4196
180	2.38		75.5890		1.5610		8.6964
210	3.38		62.1725		1.1466		6.3877
240	4.51		53.2564		0.3906		2.8946
			表8 G2力	学参数表			
		Tabl	e 8 Mechanical	parameters	of G2		
荷载/kN	位移/m	m	$E_1/(\mathrm{kN}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$		$E_2/(kN mm)$	⁻¹) η/	$(kN \cdot d \cdot mm^{-1})$
90	1.20		75.2383		2.7280		15.5376
120	1.59		75.5049		1.9525		11.2020
150	2.18		68.7916		1.9382		10.1215
180	2.63		68.5479		1.4793		7.8740

64.2674

0.6393

4.1736

表 9	G3	力学参	\$数表
20 /	05	ハエタ	· XX 1C

Table 9 Mechanical parameters of G3

荷载/kN	位移/mm	$E_1/(\mathrm{kN}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$	$E_2/(\mathrm{kN}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$	$\eta/(kN \cdot d \cdot mm^{-1})$
90	0.85	105.6834	2.8108	15.0557
120	1.30	92.2084	1.4980	8.5027
150	2.05	73.2386	1.0050	8.3139
180	2.49	72.1732	0.9697	6.7792
210	3.34	62.8799	0.5651	5.2024

表 10 G4 力学参数表

Table 10 Mechanical parameters of G4

荷载/kN	位移/mm	$E_1/(\mathrm{kN}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$	$E_2/(\mathrm{kN}\cdot\mathrm{mm}^{-1})$	$\eta/(kN \cdot d \cdot mm^{-1})$
90	1.05	86.0256	2.7280	15.5376
120	1.43	83.6412	1.9901	11.4574
150	1.98	75.5706	0.9436	10.3788
180	2.42	74.3187	0.7411	5.8092
210	3.07	68.4820	0.6382	4.1575

浮锚杆轴向拉拔力的增大,蠕变本构模型的参数均逐 渐减小,应为微观损伤所致,这亦与许宏发等^[17]、白 晓宇等^[13]的研究一致。

3.2 时效刚度

根据图4 GFRP 抗浮锚杆的位移时间曲线可以得 到不同时刻下不同荷载作用下的等时荷载 - 位移曲 线,如图6所示。

等时曲线可直接观测出在不同荷载水平下同作用时间段锚杆位移变化规律。由图 4 可知,试件 G1 在不同荷载水平下荷载 - 位移等时曲线规律基本一致,均呈"S"型分布,表明试件在 150~180 kN 荷载作用下位移变化较小;试件 G2 及 G4 在每级荷载作用下第 0 天的荷载 - 位移呈近似线性关系,且试件 G2、G3、G4 在 1 d 的等时荷载 - 位移曲线走势十分相似,体现了 GFRP 抗浮锚杆与混凝土间黏结--滑移运动的趋势。自第 2 天起 4 根试验锚杆的等时曲线在较低荷载下位移增长速率均基本一致,在 180,210 kN 较大荷载作用下位移变化较大,表明在相同时间段内较大荷载对 GFRP 抗浮锚杆位移影响较大。





图 6 GFRP 抗浮锚杆荷载 - 位移等时曲线

Fig. 6 Load-time isochronal curves of GFRP anti-floating anchors

由等时曲线特性可知,在相同时间段不同荷载作 用下其荷载-位移曲线均不是严格的线性关系,为便 于后续内容分析,根据 90~210 kN 曲线段割线刚度进 行计算。由式(6)可知在 *t* 时刻刚度与时间函数为

$$K_{s}(t) = \frac{1}{M + N(1 - e^{-Pt})} \quad . \tag{10}$$

对于锚杆 G1 及 G2 的割线刚度与时间曲线采用

$$K_{\rm s}(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{b}\right) + B_0 \tag{11}$$

进行回归,第1~20天回归曲线及割线刚度与时间曲 线如图7所示,函数各参数如表11所示。

联立式(10)及式(11)可解得试件 G1~G4 的 长期割线刚度力学参数,如表 12 所示。

由表 12 可知, 4 根试验锚杆的长期割线抗拔刚度

均较小,且波动幅度亦较小。究其原因,可能是混凝 土相比于岩石层硬度低,玻璃纤维增强型材料与混凝 土材料容易发生协同变形,导致锚固于混凝土底板中 的 GFRP 抗浮锚杆长期割线刚度较小。



图 7 GFRP 抗浮锚杆荷载 - 位移等时曲线

Fig. 7 Secant stiffness-times curve of GFRP anti-floating anchors

表 11 GFRP 抗浮锚杆蠕变本构模型力学参数

Table 11 Creep constitutive model mechanical parameters of

GFRP a	inti-floatii	ng anchors
--------	--------------	------------

CEPD anti floating anahora

试件编号	$A/(\text{mm}\cdot\text{kN}^{-1})$	$b/(d^{-1})$	$B_0/(\mathrm{mm}\cdot\mathrm{kN}^{-1})$	相关系数	RSS
G1	19.2945	1.1885	48.3411	0.9904	0.0399
G2	16.7209	1.1252	56.3922	0.9393	0.1778
G3	12.2128	1.8507	48.2759	0.9538	0.1643
G4	19.7950	0.9584	57.7335	0.9773	0.0635

表 12 GFRP 抗浮锚杆长期割线刚度力学参数

Table 12 Long-term secant stiffness mechanical parameters of

OF KF anti-noating anchors					
试件编号	$M/(\mathrm{mm}\cdot\mathrm{kN}^{-1})$	$N/(\text{mm}\cdot \text{kN}^{-1})$	$P/(d^{-1})$	$K_{\rm s}/({\rm mm\cdot kN^{-1}})$	
G1	67.6356	-19.2945	0.8414	0.02068	
G2	73.1131	-16.7209	0.8887	0.01774	
G3	60.4887	-12.2128	0.5403	0.02072	
G4	77.5285	-19.7950	1.0434	0.01733	

3.3 时间损伤效应

本次试验长期作用于 GFRP 抗浮锚杆的轴向拉拔 力远低于其破坏荷载,此试验情况下产生的位移视为 蠕变位移,损伤主要为时间损伤,变形损伤可忽略不 计。根据模量法测量损伤变量,则有

$$\omega(t) = 1 - \frac{K_{\rm s}(t)}{K_{\rm s}(0)} \quad . \tag{12}$$

式中 $\alpha(t)$ 为 GFRP 抗浮锚杆在 t 时刻的损伤变量; $K_{s}(t)$ 为 t 时刻 GFRP 抗浮锚杆的刚度; $K_{s}(0)$ 为 t=0 时 GFRP 抗浮锚杆的刚度,

$$K_{\rm s}(0) = \frac{1}{M} \quad . \tag{13}$$

将式 (10), (13) 代入式 (12) 中, 可得

$$\omega(t) = 1 - \frac{M}{M + N \cdot (1 - e^{-Pt})} \quad . \tag{14}$$

当 $t \rightarrow \infty$ 即可得到 GFRP 抗浮锚杆的长期时间损 伤变量,即

$$\omega(\infty) = \frac{N}{M+N} \quad . \tag{15}$$

GFRP 抗浮锚杆在不同时刻下极限抗拔承载力为
$$F(t) = [1 - \omega(t)] \cdot F(0)$$
 。 (16)

式中 *F*(*t*)为GFRP 抗浮锚杆在*t*时刻下的极限抗拔承载力: *F*(0)为 GFRP 抗浮锚杆的极限抗拔承载力。

根据试验锚杆 G1、G2、G3 及 G4 在 t=0 时的荷 载与位移曲线,采用双切线法即可求得 t=0 时瞬时抗 拔承载力,经计算 4 根试件 t=0 时的极限抗拔承载力 近似为 F(0)=216.7 kN。

由此可得 GFRP 抗浮锚杆的长期抗拔承载力为

$$F(\infty) = \left[1 - \omega(\infty)\right] \cdot F(0) \quad , \tag{17}$$

式中, F(∞)为 GFRP 抗浮锚杆的长期抗拔承载力。

根据式(15),(17)计算求得试验锚杆 G1 及 G2 的长期时间损伤变量及长期抗拔承载力如表 13 所示。 表 13 GFRP 抗浮锚杆长期抗拔承载力计算值与实测值对比

Table 13 Comparison of calculated and measured values of

long-term uplift capacity of GFRP anti-floating anchors

	e 1	1 5		
试件	长期时间损伤	$F(\infty)$	破坏荷载	$\frac{F(\infty)}{\sqrt{2}}$
编号	变量	/kN	$F_{\rm u}/{ m kN}$	$F_{\rm u}$
G1	0.3991	159.84	266	60.10
G2	0.2965	162.51	231	70.35
G3	0.2529	169.59	227	74.71
G4	0.3428	144.58	220	65.72

根据表 13 可看出,根据蠕变模型计算得到的 GFRP 抗浮锚杆的蠕变损伤变量分别为 0.3991, 0.2965,0.2529,0.3428,长期抗拔承载力分别为 159.84,162.51,169.59,144.58 kN,约为其极限抗拔 承载力的 68%。究其计算长期抗拔承载力较低的原因, 可能与 GFRP 材料特质有关。因 GFRP 筋的弹性模量 较小,锚杆在受到轴向拉拔力后回弹性能差,在实际 工程中应根据实测极限抗拔承载力值预留出 40%左右 的安全储备空间,防止 GFRP 抗浮锚杆因应力松弛而 引发安全性问题。

4 结 论

(1)本文通过进行长期应力作用下的室内足尺拉 拔试验探究了4根GFRP抗浮锚杆在长期应力作用下 的蠕变特性,试验结果表明GFRP抗浮锚杆在其38% 破坏荷载的作用下不会发生蠕变行为。

(2)引入标准线性固体模型对 GFRP 抗浮锚杆在 长期应力作用下的蠕变规律进行探究,采用多项式回 归分析的方法对试件的力学参数进行求解,参数变化 证实了试验过程中发生了微观损伤。

(3)根据在同级荷载下 GFRP 抗浮锚杆的位移-时间等时曲线绘制其刚度-时间曲线,根据标准线性固体模型计算出 4 根试件刚度随时间变化公式,公式回归曲线与试验实测曲线吻合度较高,验证了模型的准确性。

(4)根据损伤力学求解 GFRP 抗浮锚杆的长期时

间损伤变量及长期抗拔承载力,结果表明根据模型计 算得到的长期抗拔承载力约为试验测得最大加载量的 60%~75%,4 根试验锚杆的均值为最大加载量的 68%,在实际工程中应注意预留出足够的储备承载力。

参考文献:

- 白晓宇,张明义,朱 磊,等. 全长黏结 GFRP 抗浮锚杆界 面剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1407 - 1418. (BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, ZHU Lei, et al, Experimental study on shear characteristics of interface of full-bonding glass fiber reinforced polymer anti-floating anchors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1407 - 1418. (in Chinese))
- [2] YAN F, LIN Z. Bond durability assessment and long-term degradation prediction for GFRP bars to fiber-reinforced concrete under saline solutions[J]. Composite Structures, 2017, 55(11): 393 - 406.
- [3] 白晓宇,张明义,王永洪,等. GFRP 抗浮锚杆与混凝土底 板黏结特性现场试验[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1):
 93 102. (BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, WANG Yong-hong, et al. Field test on bond strength between glass fiber reinforcement polymer anti-floating anchor and concrete floor[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 93 102. (in Chinese))
- [4] 匡 政,张明义,白晓宇,等.风化岩地基 GFRP 抗浮锚杆 力学与变形特性现场试验[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1882 - 1892. (KUANG Zheng, ZHANG Ming-yi, BAI Xiao-yu, et al. Field tests on mechanics and deformation properties of GFRP anti-floating anchors in decomposed rock foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10): 1882 - 1892. (in Chinese))
- [5] 曾宪明, 雷志梁, 张文巾, 等. 关于锚杆"定时炸弹"问题的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 22(1): 143 147. (ZENG Xian-ming, LEI Zhi-liang, ZHANG Wen-jin, et al. Discussion on the issue of anchor "time bomb"[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 22(1): 143 147. (in Chinese))
- [6] 李国维, 余 亮, 吴玉财, 等. 预应力喷砂玻璃纤维聚合物 锚杆的黏结损伤[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1711 - 1719. (LI Guo-wei, YU Liang, WU Yu-cai, et al. Bond damage of prestressed sand-coated glass fiber reinforced polymer anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8): 1711 - 1719. (in Chinese))
- [7] 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: 42 - 52.

- [8] 高丹盈,房 栋,谷泓学. GFRP-钢绞线复合筋与混凝土黏结 机理及强度计算模型[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 130 -139. (GAO Dao-ying, FANG Dong, GU Hong-xue. Bonding mechanism and strength calculation model of GFRP-steel composite rebars embedded in concrete[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4): 130 - 139. (in Chinese))
- [9] YOO D Y, KWON K Y, PARK J J. Local bond-slip response of GFRP rebar in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. Composite Structures, 2015, 120: 53 - 64.
- [10] GONILHA J A, CORREIA J R, BRANCO F A. Creep response of GFRP-concrete hybrid structures: application to a footbridge prototype[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 53: 193 - 206.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 白晓宇,张明义,张舜泉. 全长黏结螺纹玻璃纤维增强聚 合物抗浮锚杆蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 804 - 813. (BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, ZHANG Shun-quan. Creep testing on anti-floating anchors of full-length bonding thread glass fiber reinforced polymer(GFRP)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 804 - 813. (in Chinese))
- [14] ROSSINI M, NANNI A. Composite strands for prestressed concrete: state-of-the-practice and experimental investigation into mild prestressing with GFRP[J]. Construction and Building Materials, 2019, 205: 486 - 498.
- [15] 马 明. CFRP 加固钢筋混凝土梁长期力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017. (MA Ming. Study on Long-Time Behavior of RC Beams Strengthened with Externally Bonded CFRP[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [16] 许宏发,陈新万. 多项式回归间接求解岩石流变力学参数 的方法[J]. 有色金属, 1994, 46(4): 19 - 22. (XU Hong-fa, CHEN Xin-wan. Method to find indirectly solution of rock rheology's parameters with polynomial regression[J]. China Nonferrous Metals, 1994, 46(4): 19 - 22. (in Chinese))
- [17] 许宏发,卢红标,钱七虎.土层灌浆锚杆的蠕变损伤特性研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(1):61-63. (XU Hong-fa, LU Hong-biao, QIAN Qi-hu. Creep damage effects of pulling grouting anchor in soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1):61-63. (in Chinese))