

海水浸泡与持续荷载耦合作用下GFRP筋的长期锚固长度

常宇飞 王言磊 王密锋 周智

Long-term development length of GFRP bar in concrete under coupling effect of seawater immersion and sustained load

CHANG Yufei, WANG Yanlei, WANG Mifeng, ZHOU Zhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220720.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋环境下G827/3234复合材料老化机制及当量加速关系

Aging mechanism and equivalent acceleration relationship of G827/3234 composite in the marine environment

复合材料学报. 2018, 35(12): 3304–3312 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180207.002>

海水浸泡对FRP筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响

Effects of sea water soaking on the bonding properties of FRP bars–coral concrete

复合材料学报. 2018, 35(12): 3458–3465 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.001>

高温后CFRP筋及其粘结式锚固系统的力学性能

Mechanical properties of CFRP bar and bond–type anchorage system after elevated temperature exposure

复合材料学报. 2021, 38(12): 4031–4041 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210215.005>

GFRP筋与自密实混凝土黏结性能的试验研究

Experimental study on bond properties between GFRP bars and self compacting concrete

复合材料学报. 2021, 38(10): 3484–3494 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210207.001>

高温持续荷载作用下复合纤维对沥青混合料稳定性的影响

Research on stability of hybrid fiber asphalt mixture based on high temperature and continuous loading

复合材料学报. 2017, 34(10): 2344–2355 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170112.008>

大吨位FRP复合材料拉索整体式锚固理论分析

Theoretical analysis on integral anchor for large–tonnage FRP composites cable

复合材料学报. 2019, 36(5): 1169–1178 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180725.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220720.001

海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的
长期锚固长度



分享本文

常宇飞¹, 王言磊¹, 王密锋¹, 周智^{* 1,2}

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 大连 116024; 2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228)

摘 要: 为了获得海水浸泡与持续荷载耦合作用下玻璃纤维增强树脂复合材料 (Glass fiber-reinforced polymer, GFRP) 筋的长期锚固长度计算公式, 首先搜集了 81 个拔出破坏的 GFRP 筋混凝土梁式试件的数据, 提出了 GFRP 筋的短期锚固长度计算公式。然后测试了在海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋拉拔试件的粘结强度, 结合强度预测理论, 得到了粘结强度折减系数。采用粘结强度折减系数及基于他人试验获得的 GFRP 筋抗拉强度折减系数修正了短期锚固长度计算公式, 最终建立了海水浸泡与持续荷载耦合作用下适用于拔出破坏的 GFRP 筋长期锚固长度计算公式。研究表明: GFRP 筋的长期锚固长度变化主要是由粘结强度和抗拉强度的减小造成的。经过海水浸泡与持续荷载耦合作用 50 年后, 当环境的年平均温度为 8℃、13℃、18℃、23℃ 和 28℃ 时, GFRP 筋的粘结强度折减系数分别为 0.60、0.60、0.56、0.56 和 0.52。相应的 GFRP 筋抗拉强度折减系数分别为 0.63、0.56、0.49、0.42 和 0.35。

关键词: 纤维增强树脂复合材料 (FRP); 海洋环境; 持续荷载; 粘结强度; 锚固长度

中图分类号: TU318+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5122-13

Long-term development length of GFRP bar in concrete under coupling
effect of seawater immersion and sustained load

CHANG Yufei¹, WANG Yanlei¹, WANG Mifeng¹, ZHOU Zhi^{*1,2}

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: To obtain the long-term development length equation of the glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bar under the coupling effect of seawater immersion and sustained load, a short-term development length equation was proposed first according to the collected 81 GFRP bar-reinforced concrete beam with pullout failure. Then, the bond strength of the pullout specimen under the coupling effect of seawater immersion and sustained load was tested, and the bond strength reduction factor was obtained with a prediction theory. Based on the bar's bond strength reduction factor and the tensile strength reduction factor deduced from others' tests, the short-term development length equation was modified. Finally, the long-term development length equation of the GFRP bar for the beam with pullout failure was established. The results show that the change in the long-term development length of the GFRP bar is mainly caused by the reductions in bond strength and tensile strength. After the coupling effect of seawater immersion and sustained load for 50 years, when the annual average temperatures of the environment are 8℃, 13℃, 18℃, 23℃ and 28℃, the bar's bond strength retentions are 0.60, 0.60, 0.56, 0.56 and 0.52, respectively. The corresponding tensile strength retentions of the GFRP bar are 0.63, 0.56, 0.49, 0.42 and 0.35, respectively.

Keywords: fiber-reinforced polymer (FRP); marine environment; sustained load; bond strength; development length

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-06-18; 录用日期: 2022-07-02; 网络首发时间: 2022-07-20 14:45:58
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220720.001>
基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51978126; 51778102)
通信作者: 周智, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为纤维增强树脂材料制品与海洋土木工程结构 E-mail: zhouzhi@dlut.edu.cn
引用格式: 常宇飞, 王言磊, 王密锋, 等. 海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的长期锚固长度 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5122-5134.
CHANG Yufei, WANG Yanlei, WANG Mifeng, et al. Long-term development length of GFRP bar in concrete under coupling effect of seawater immersion and sustained load[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5122-5134(in Chinese).

由于性能优越且价格低廉，玻璃纤维增强树脂复合材料 (Glass fiber-reinforced polymer, GFRP) 筋已广泛应用于混凝土结构中^[1]。GFRP 筋与混凝土之间的粘结能够使二者具有相同的变形，并将混凝土承受的荷载传递给 GFRP 筋。因此，粘结性能是影响结构正常工作的关键因素。

GFRP 筋的锚固长度是衡量粘结性能的一项重要指标。许多学者提出了 GFRP 筋的锚固长度计算公式。Ehsani 等^[2]利用梁端试件的试验数据推导了 GFRP 筋的锚固长度计算公式，并确定了受保护层厚度和浇筑位置影响的修正系数。Okelo^[3]忽略了不同类型纤维增强树脂复合材料 (Fiber-reinforced polymer, FRP) 筋的差异，提出了适用于铰接梁的 FRP 筋锚固长度计算公式。Wambeke 等^[4]基于劈裂和拔出两种破坏模式，发展了两种 GFRP 筋锚固长度计算公式。Xue 等^[5]在锚固长度计算公式中引入了 GFRP 筋的环境影响折减系数。Basaran 等^[6]搜集了 185 根铰接梁的试验数据，建立了适用于拔出破坏的 FRP 筋锚固长度计算公式。该公式充分考虑了 FRP 筋的种类、半径、表面情况、弹性模量、抗拉强度、混凝土强度和保护层厚度对粘结性能的影响，因此计算值与试验值比较接近。Choi 等^[7]提出了适用于 FRP 筋桥面板的粘结强度计算公式，利用粘结强度与锚固长度之间的转化关系，可以获得对应的锚固长度计算公式。此外，规范 ACI 440.1 R-15^[8]、CAN/CSA S806-12^[9]、CAN/CSA S6:19^[10]与 GB/T 50608—2020^[11]也对 GFRP 筋的锚固长度计算方法给出了详细的说明。

然而，只有少数 GFRP 筋锚固长度计算公式考虑了环境与荷载的长期影响^[5,8-11]。这些公式认为环境与荷载促进了 GFRP 筋抗拉强度的降低，这是造成长期与短期锚固长度不同的主要原因。但它们却忽视了 GFRP 筋粘结强度随时间的增长而出现的退化。据作者所知，目前还没有人提出海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的长期锚固长度计算公式。

因此，本文目标是提出海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的长期锚固长度计算公式。为了实现此目标，首先搜集文献中 81 个拔出破坏的 GFRP 筋混凝土梁式试件，采用多元线性回归分析建立 GFRP 筋的短期锚固长度计算公式。然后进行海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的粘结耐久性试验，并根据试验结果和他人的研究成果确定 GFRP 筋粘结强度和抗拉强度的折减

系数。最后利用这两个系数对短期锚固长度计算公式修正，建立海水浸泡与持续荷载作用下适用于拔出破坏的 GFRP 筋长期锚固长度计算公式。

1 GFRP 筋的短期锚固长度

1.1 数据库

目前存在的 GFRP 筋短期锚固长度计算公式大多是基于较早的粘结试验结果获得的。随着研究的深入，越来越多的试验结果陆续出现在文献中。为了确定更准确的计算公式，需要搜集更多的试验数据。由于拉拔试件中加载端混凝土承受压力，并不能准确地反映 GFRP 筋混凝土构件的受力情况，因此在计算 GFRP 筋的锚固长度时通常采用梁式试件^[12]。而拉拔试件可用于确定环境等因素对粘结性能的长期影响^[13]。本文基于现有文献中的试验数据，剔除了偶然因素对数据造成的影响，搜集了 80 个 GFRP 筋混凝土梁式构件的试验数据^[2-3, 5, 12, 14-16]，如表 1 所示。由于下文粘结耐久性试验中试件的破坏模式为拔出破坏，为了确保数据类型一致，表 1 中搜集的所有试件也均发生拔出破坏。浇筑试件采用的混凝土均为普通混凝土，但文献没有说明其骨料性质。所有 GFRP 筋位于试件的底部。表 2 展示了与粘结性能相关的参数的取值范围。

混凝土强度可以采用立方体抗压强度和圆柱体抗压强度来表示。为了便于比较，表 1 中所有试件的混凝土强度均采用立方体抗压强度。EN 206:2013+A1:2016^[17]提供了两种强度的对应关系，如表 3 所示。对表 3 中的数据进行回归分析可得到下式：

$$f'_c = 0.0012f_{cu}^2 + 0.7186f_{cu} + 1.2555 \tag{1}$$

式中： f'_c 是尺寸为 150 mm×300 mm 的混凝土圆柱体的抗压强度； f_{cu} 是边长为 150 mm 的混凝土立方体的抗压强度。

1.2 短期锚固长度计算公式

借鉴 ACI 440.1 R-15^[8]中 FRP 筋粘结强度计算公式的形式，通过对表 1 中的试验数据进行多元线性回归分析，可以得到 GFRP 筋的短期粘结强度计算公式，如下式所示：

$$\frac{u}{\sqrt{f'_c}} = -0.201 + 0.314 \frac{C}{d_b} + 7.547 \frac{d_b}{l_e} \tag{2}$$

式中： u 是 GFRP 筋的短期粘结强度； C 是混凝土表面至 GFRP 筋截面中心的距离及相邻 GFRP 筋距离的 1/2 这两者之中的较小值； d_b 是 GFRP 筋的

表 1 玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 筋混凝土梁式构件粘结试验数据

Table 1 Data from the bond test of concrete beam reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars

Data sources	Specimen	f'_c /MPa	d_b /mm	C /mm	l_e /mm	u /MPa	Surface condition
[2]	46 B3 B2	27.6	19	48	76	17.1	WH
	46 B6 B2	27.6	19	48	152	9.3	
	46 B12 B2	39.2	19	48	305	5.6	
	86 B12 B2	47.7	19	48	305	5.7	
	46 B16 B4	39.2	19	86	406	5.4	
	86 B16 B4	47.7	19	86	406	5.2	
	49 B4 B2	27.6	29	73	102	15.2	
	49 B8 B2	27.6	29	73	203	8.5	
	49 B22 B2	39.7	29	73	559	4.2	
	89 B22 B2	44.8	29	73	559	4.0	
	49 B26 B4	39.7	29	132	660	3.9	
	89 B26 B4	47.3	29	132	660	3.8	
[3]	G-10-0-100	33.3	10	38	150	0.8	WH+SC
	G-19-0-190	33.3	19	38	285	3.4	
[5]	I 30-1-f	24.1	16	50	40	18.49	WH+SC
	I 30-1-s	24.1	16	50	40	14.88	
	I 30-2-s	24.1	16	50	80	14.88	
[12]	G8 Sf/4.5-11-4.5-5-1/C30	29.1	8	36	40	11.0	SC
	G8 Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.1	8	36	80	7.8	
	G8 Sf/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.3	8	36	160	5.1	
	G8 Sf/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.4	8	36	80	7.6	
	G8 Sf/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.3	8	36	80	5.0	
	G8 Sf/2.5-15-4.5-10-1/C30	29.1	8	20	80	8.5	
	G8 Sf/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.1	8	20	80	7.5	
	G8 Sf/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.1	8	28	80	8.2	
	G6 Sf/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.1	6	36	60	13.6	
	G12 Sf/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.1	12	36	120	6.1	
	G8 Sf/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.1	8	15	80	5.8	WO
	G8 Sf/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.1	8	28	80	8.8	
	G8 WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.1	8	36	80	11.4	
	G8 WO/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.3	8	36	160	8.8	
	G8 WO/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.3	8	36	80	9.3	
	G8 WO/4.5-11-4.5-10-1/C35	37.3	8	36	80	14.7	
	G8 WO/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.4	8	36	80	11.8	
	G8 WO/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.3	8	36	80	9.3	
	G8 WO/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.1	8	20	80	11.4	R
	G8 WO/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.1	8	28	80	11.5	
	G12 WO/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.1	12	54	120	10.2	
	G8 WO/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.1	8	28	80	11.5	
	G12 WW/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.1	12	54	120	11.4	WW
	G8 R/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.1	8	36	80	15.1	R
	G8 R/4.5-11-4.5-20-1/C20	17.3	8	36	160	9.6	
	G8 R/4.5-11-4.5-10-1/C20	17.3	8	36	80	10.7	
	G8 R/4.5-11-4.5-10-1/C40	41.4	8	36	80	17.4	
	G8 R/4.5-11-4.5-10-0/C20	17.3	8	36	80	11.1	
	G8 R/2.5-15-4.5-10-1/C30	29.1	8	20	80	15.8	
	G8 R/4.5-11-2.5-10-1/C30	29.1	8	20	80	13.8	
	G8 R/4.5-11-3.5-10-1/C30	29.1	8	28	80	16.0	
	G8 R/4.5-3.75-4.5-10-1/C30	29.1	8	15	80	12.8	
	G8 R/4.5-7-4.5-10-1/C30	29.1	8	28	80	15.6	
	G6 R/4.5-17.7-4.5-10-1/C30	29.1	6	27	60	13.1	
	G12 R/4.5-11-4.5-10-1/C30	29.1	12	54	120	10.7	
[14]	-	31	12.7	50	76.2	11.3	WH+SC
	-	31	15.9	50	95.4	10.6	
	-	31	19.1	50	114.6	7.1	
	-	31	25.4	50	152.4	7.0	
	-	31	19.1	50	305.6	5.3	
	-	31	25.4	50	406.4	5.1	
	-	31	12.7	50	127	10.6	
	-	31	15.9	50	159	7.3	
	-	31	19.1	50	191	6.6	
	-	31	25.4	50	254	6.4	
	-	31	12.7	50	127	12.3	
	-	31	15.9	50	159	10.8	
	-	31	15.9	50	159	10.8	

续表 1							
Data sources	Specimen	f'_c /MPa	d_b /mm	C /mm	l_e /mm	u /MPa	Surface condition
	—	31	25.4	50	254	7.4	WH
[15]	T1.25 L15	52	12	15	180	2.9	WH
	T1.25 L20	52	12	15	240	1.7	
	T2 L15	52	12	25	180	2.7	
	T2 L20	52	12	25	240	1.7	
	T1.25 L20-C	52	12	15	240	1.9	
	T2 L20-C	52	12	25	240	2.2	
[16]	GS-12-5.1	32.2	12	50	60	14.8	SC
	GS-12-5.2	32.2	12	50	60	14.5	
	GS-12-5.3	32.2	12	50	60	12.7	
	GS-16-5.1	31.9	16	50	80	11.7	
	GS-16-5.2	31.9	16	50	80	10.3	
	GS-16-5.3	31.9	16	50	80	12.1	
	GS-18-5.1	32.2	18	50	90	10.0	
	GS-18-5.2	32.2	18	50	90	11.6	
	GS-18-5.3	32.2	18	50	90	11.8	

Notes: f'_c —Compressive strength of the concrete cylinder with a size of 150 mm×300 mm; d_b —Bar diameter; C —Smaller of the distance from the concrete surface to the center of the bar and 1/2 of the spacing between the adjacent bars; l_e —Embedment length of the GFRP bar in the concrete; u —Bond strength of the GFRP bar; WH—Wrapped in a helical pattern; SC—Sand coated; WO—Wound; WW—Widely-spaced and tight wrapping; R—Ribbed; For the specimen name in reference [2], First number—Compressive strength of concrete, Second number—Bar diameter, Third number—Embedment length, Fourth number—Ratio of the clear concrete cover to the bar diameter, First letter B—Beam specimen, Second letter B—Bar is casted at the bottom of the beam; For the specimen name in reference [3], G—Specimen with GFRP bar, First number—Bar diameter, Second number—Concrete mix, Third number—Embedment length; For the specimen name in reference [5], I—First test method, First number—Compressive strength of concrete, Second number—Embedment length, f—GFRP bar, s—Steel bar; For the specimen name in reference [12], the letters and numbers represents the GFRP bar, bar diameter, surface properties of bar, side concrete cover, bar span, bottom concrete cover, embedment length, stirrup effect, strength class of concrete, respectively; For the specimen name in reference [15], R—GFRP ribbed bar, First number—Ratio of the concrete cover to the clear spacing between the splices, L and the second number—Splice length, C—Steel confinement; For the specimen name in reference [16], GS—GFRP bar with sand-coated surface, First number—Bar diameter, Second number—Embedment length, Third number—Specimen number among three identical specimens.

表 2 GFRP 筋混凝土梁式构件粘结性能参数的取值范围

Table 2 Parameter ranges of bond performance of concrete beam reinforced with GFRP bars

Parameter	f'_c /MPa	d_b /mm	C/d_b	l_e/d_b	u /MPa
Maximum	52.0	29.0	6.0	22.8	22.1
Minimum	17.3	6.0	1.3	2.5	0.8
Average	32.2	13.8	3.4	11.0	9.5
Standard deviation	8.7	6.6	1.0	5.2	4.5

直径； l_e 是 GFRP 筋在混凝土中的粘结长度。

拟合公式的相关系数为 0.73。图 1 比较了短期粘结强度的试验值与计算值，可以看出式 (2) 对试验数据的拟合程度有待提高。由于数据库中数据量较小，式 (2) 忽略了 GFRP 筋表面形式和骨料性质等参数的影响，这是造成拟合程度不高的主要原因。为了提高公式的拟合程度，未来需要搜集更多的试验数据，考虑 GFRP 筋表面形式、粘结破坏模式和骨料性质等参数对粘结性能的影响，建立更精确的粘结强度计算公式。

结构承受荷载作用时，GFRP 筋与混凝土界面的粘结力与 GFRP 筋的拉力达到平衡。特殊地，当 GFRP 筋的拉应力达到设计抗拉强度 f_{tu} 时，可

以得到以下关系：

$$u\pi d_b l_d = f_{tu} A_f \tag{3}$$

式中： l_d 是 GFRP 筋的锚固长度； A_f 是 GFRP 筋的横截面面积。联立式 (2) 和式 (3)，得到 GFRP 筋的短期锚固长度计算公式为

$$l_d = d_b \left(\frac{f_{tu}}{\sqrt{f'_c}} - 30.188 \right) / \left(1.256 \frac{C}{d_b} - 0.804 \right) \tag{4}$$

2 GFRP 筋的粘结耐久性性试验

2.1 试验方案与试件设计

为了研究海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的粘结强度变化规律，设计了 7 组共计 21 个拉拔试件，每组有 3 个名义相同试件。试验

表 3 混凝土立方体抗压强度和圆柱体抗压强度的关系

Table 3 Relationship between cube and cylinder compressive strengths of concrete

f_{cu}/MPa	f'_c/MPa
10	8
15	12
20	16
25	20
30	25
37	30
45	35
50	40
55	45
60	50
67	55
75	60
85	70
95	80
105	90
115	100

Note: f_{cu} —Compressive strength of the concrete cube with a side length of 150 mm.

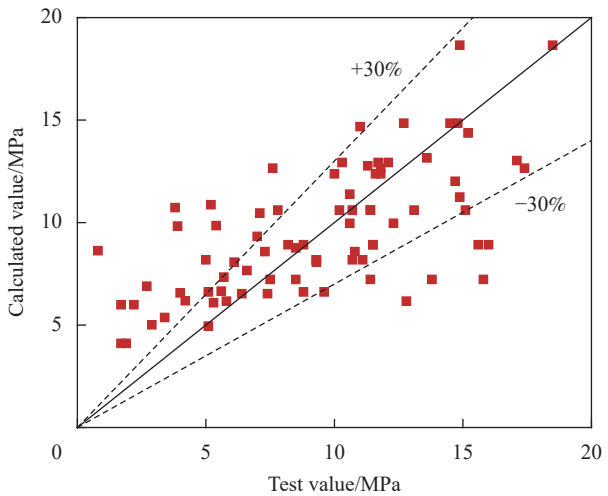


图 1 GFRP 筋短期粘结强度试验值与计算值的对比

Fig. 1 Comparison between experimental and calculated values of GFRP bar's short-term bond strength

变量包括海水浸泡时间 (90 天、180 天和 270 天) 和持载情况 (有、无持续荷载作用)。根据 ACI 440.3 R-12^[13], 试件中混凝土立方体的边长为 200 mm, GFRP 筋垂直穿过立方体中心, 粘结长度为 GFRP 筋名义直径的 5 倍, 如图 2 所示。

2.2 材料性能

GFRP 筋的名义直径为 12 mm, 弹性模量、设计抗拉强度和极限拉应变分别为 47 GPa、910 MPa 和 2.1%。采用单束纤维螺旋缠绕的方式使筋的表面形成肋部, 如图 3 所示。

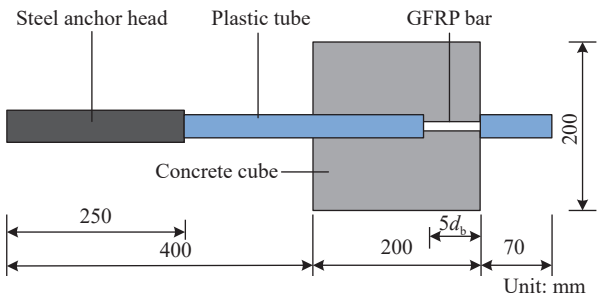


图 2 GFRP 筋混凝土拉拔试件

Fig. 2 GFRP-reinforced concrete pullout specimen

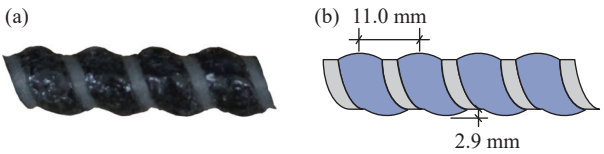


图 3 GFRP 筋的尺寸及表面特征

Fig. 3 Dimensions and surface conditions of GFRP bar

由于沿海地区海水和海砂资源丰富, 且海水海砂混凝土与普通混凝土具有相似的力学性能^[18], 因此本文采用海水、海砂浇筑混凝土拉拔试件。在室温下海水环境中养护 28 天后, 测量标准圆柱体混凝土试件的抗压强度为 43.3 MPa。

2.3 海水浸泡与持续荷载

针对环境和荷载这两种因素对 GFRP 筋设计抗拉强度的影响, 规范 ACI 440.1 R-15^[8] 分别提出了相应的规定: 在海洋环境下, GFRP 筋的设计抗拉强度 $f_{fu}=0.7f_{fu}^*$ (f_{fu}^* 是 GFRP 筋的保证抗拉强度); 在持续荷载作用下, 为了防止材料的蠕变断裂, GFRP 筋的抗拉强度不应高于 $0.2f_{fu}$ 。因此, 在海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的设计抗拉强度 f_{fu} 不应高于 $0.14f_{fu}^*$ 。设计拉拔试件承受的持续荷载为对照试件 (即无环境和荷载作用的试件) 极限拉拔力的 25%。该荷载值等于 14.9 kN。此时, GFRP 筋的拉应力为 131.8 MPa, 相当于 $0.14f_{fu}^*$, 满足 ACI 规范要求。

借助弹簧的压力对拉拔试件施加持续荷载。如图 4 所示。为了避免钢材锈蚀, 施加持续荷载使用的所有零件均经过喷漆防腐处理。由于弹簧蠕变能够引起持续荷载的降低, 因此需要每隔 30 天对拉拔试件进行重新加载。

除对照试件外, 所有试件浸泡在盛有海水的环境试验箱内, 如图 5 所示。试验箱放置在室温环境下。为了降低热量散失, 在箱体侧面贴保温棉和聚苯乙烯泡沫板。并用篷布盖在箱上来避免海水蒸发。

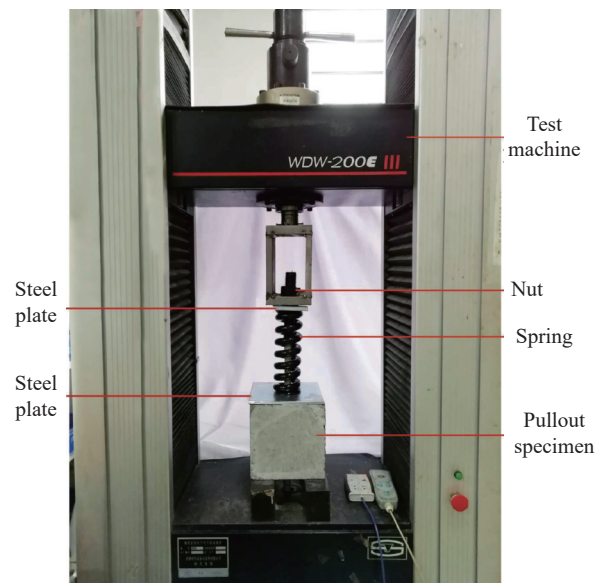


图 4 施加持续荷载
Fig. 4 Sustained load application

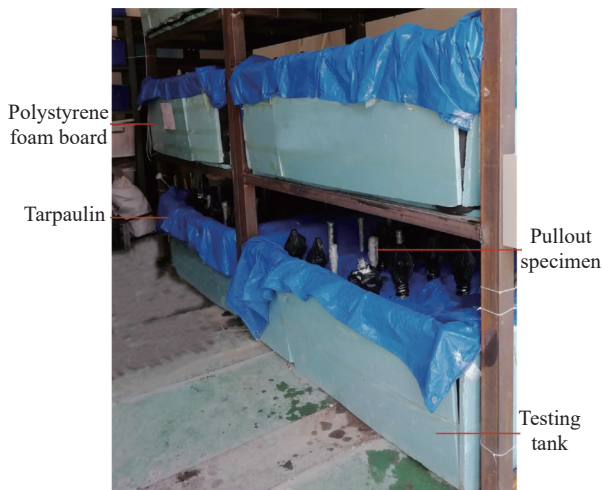


图 5 浸泡在海水中的拉拔试件
Fig. 5 Pullout specimens in seawater

2.4 试验装置与量测方案

拉拔试验装置如图 6 所示。将试件放在自制

的反力架上，利用万能材料试验机 (WDW-200E, 济南时代试金试验机有限公司) 的夹头将 GFRP 筋的端部夹紧后，控制试验机以 1 mm/min 的速度对 GFRP 筋进行拉拔。

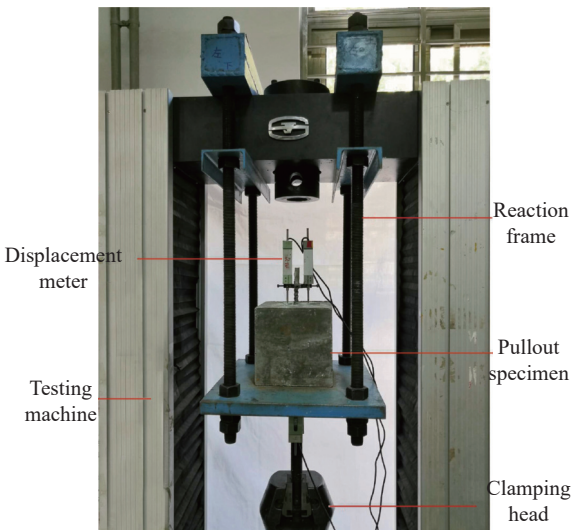


图 6 拉拔试验装置
Fig. 6 Setup of pullout test

2.5 试验结果

所有试件的破坏模式均为 GFRP 筋的拔出破坏。GFRP 筋的粘结强度可按下式计算：

$$u = \frac{F}{\pi d_b l_d} \tag{5}$$

式中， F 是拉拔力。试件的粘结强度列于表 4。

3 GFRP 筋的长期锚固长度

3.1 影响 GFRP 筋长期锚固长度的因素

根据第 2 章分析可知，确定 GFRP 筋的锚固长度需要两个步骤：(1) 通过对粘结试验数据拟合，获得 GFRP 筋的粘结强度计算公式；(2) 基于 GFRP 筋达到设计抗拉强度时的受力平衡方程，

表 4 GFRP 筋混凝土拉拔试件的粘结强度

Table 4 Bond strength of GFRP-reinforced concrete pullout specimen

Specimen	Immersion time/days	Sustained load	Bond strength	
			Average/MPa	Retention/%
P0 N	0	No	26.4	100.0
P90 N	90	No	27.7	104.9
P90 L	90	Yes	27.2	103.0
P180 N	180	No	25.8	97.7
P180 L	180	Yes	25.6	97.0
P270 N	270	No	24.4	92.4
P270 L	270	Yes	23.5	89.0

Notes: The naming method of all the specimens follows the form of “PAB”. P—Pullout specimen; A—Immersion time; B—Sustained load applied on the specimen, where L and N indicate the specimens with and without sustained load, respectively.

将粘结强度计算公式转化为锚固长度计算公式。因此，在计算 GFRP 筋的长期锚固长度时应首先分析长期粘结强度。

受环境与荷载影响，GFRP 筋的粘结强度随着时间的增加而逐渐减小。粘结界面的破坏是导致粘结强度减小的主要原因。由粘结耐久性试验结果，结合强度预测理论，可以确定设计使用年限下考虑环境与荷载影响的粘结强度折减系数。利用该系数对短期粘结强度计算公式进行修正，即可获得 GFRP 筋的长期粘结强度计算公式。

此外，在研究 GFRP 筋的长期锚固长度计算公式时，为了防止 GFRP 筋发生断裂破坏，还需要确定 GFRP 筋的设计抗拉强度。在环境与荷载作用下，GFRP 筋的设计抗拉强度等于其保证抗拉强度乘以强度折减系数。通过搜集 GFRP 筋抗拉强度耐久性试验数据，依据一定的预测方法可以得到设计使用年限下考虑环境与荷载影响的抗拉强度折减系数。

综上所述，在已知 GFRP 筋短期锚固长度计算公式的前提下，确定长期锚固长度计算公式的关键是确定 GFRP 筋的粘结强度折减系数和抗拉强度折减系数。需要注意的是，在分析 GFRP 筋长期锚固长度时忽略了混凝土力学性能的退化。

3.2 GFRP 筋粘结强度折减系数

3.2.1 长期粘结强度预测方法

目前常用的 FRP 筋长期粘结强度预测方法是由 Fib Bulletin 40^[19] 提出的。该方法考虑了环境温度和湿度对 FRP 筋粘结性能的影响，结合混凝土结构的设计使用年限，提出了粘结强度折减系数 $1/\eta_b$ 这一指标来评价 FRP 筋与混凝土之间的粘结性能退化程度。 η_b 可通过下式计算：

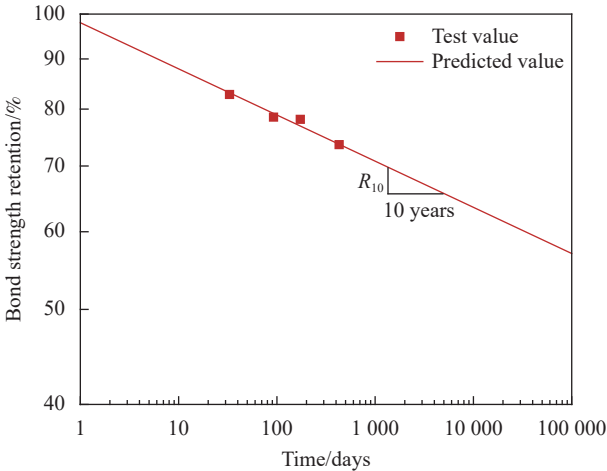
$$\eta_b = \frac{1}{[(100 - R_{10})/100]^n}$$
 (6)

式中： R_{10} 是每 10 年粘结强度的标准降低率； n 是参数，可按式计算：

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL} + n_d$$
 (7)

式中， n_{mo} 、 n_T 、 n_{SL} 和 n_d 可分别根据湿度、温度、结构设计使用年限和 GFRP 筋直径确定。

标准 Fib Bulletin 40^[19] 认为在对数坐标系下 GFRP 筋的粘结强度与结构使用时间保持线性关系。因此，将根据耐久性试验得到的粘结强度试验数据进行线性回归分析，即可获得 GFRP 筋的粘结强度预测曲线，如图 7 所示。当需要预测粘



R₁₀—Standard reduction of bond strength in percent per decade

图 7 GFRP 筋的长期粘结强度预测

Fig. 7 Prediction of long-term bond strength of GFRP bars

结性能的 GFRP 筋与加速老化试验的 GFRP 筋处于相同的环境时，可以直接根据预测曲线确定结构设计使用年限下的粘结强度预测值。

可以看出，粘结强度预测曲线的斜率与 R_{10} 有关。研究发现：在相似的外部环境下，同类型 GFRP 筋的粘结强度预测曲线的斜率几乎是相同的，进而可以认为 R_{10} 的数值是保持不变的^[20]。因此，当需要预测粘结性能的 GFRP 筋与加速老化试验的 GFRP 筋处于相似的环境时，可首先由加速老化试验的短期粘结强度数据确定 R_{10} 的数值，然后采用式 (6) 计算出粘结强度折减系数，最终预测出 GFRP 筋的长期粘结强度。

3.2.2 折减系数的确定

由国家气象科学数据中心提供的资料^[21] 显示，我国沿海城市的年平均气温为 8~28℃。参考此气温范围，将结构所在地的年平均气温划分为 5 个等级 (8℃、13℃、18℃、23℃ 和 28℃)，对不同温度的海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的长期粘结强度进行研究。根据粘结耐久性试验获得的粘结强度，采用标准 Fib Bulletin 40^[19] 提出的预测方法可以推算出直径 12 mm 的 GFRP 筋在海水浸泡下、海水浸泡与持续荷载耦合作用下参数 R_{10} 的取值分别为 11 和 13。由于试验使用的 GFRP 筋直径较小，因此假设需要预测粘结性能的 GFRP 筋的直径均不低于试验用的直径。此外，在预测粘结强度时，只考虑相对环境湿度 100% 这种最恶劣的情况。根据 GB/T 50068—2018^[22] 可知，普通建筑结构的设计使用年限为 50 年。表 5

表 5 GFRP 筋粘结强度折减系数计算结果
Table 5 Calculation of reduction factors of GFRP bar's bond strength

Annual average temperature/℃	n_{mo}	n_T	n_{SL}	n_d	Seawater immersion		Seawater immersion + Sustained load	
					R_{10}	$1/\eta_b$	R_{10}	$1/\eta_b$
8	1	0.0	2.7	0	11	0.65	13	0.60
13		0.0				0.65		0.60
18		0.5				0.61		0.56
23		0.5				0.61		0.56
28		1.0				0.58		0.52

Notes: n_{mo} , n_T , n_{SL} , n_d —Parameters related to the humidity, temperature, structure's design service life and bar diameter, respectively; R_{10} —Standard reduction of bond strength in percent per decade; η_b —Parameter related to the reduction factor of the GFRP bar's bond strength.

列出了结构设计使用年限为 50 年时 GFRP 筋的粘结强度折减系数。通过比较折减系数可知：在相同的年平均气温下，与海水浸泡单独作用相比，海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的粘结强度更低。当环境的年平均温度为 8℃、13℃、18℃、23℃ 和 28℃ 时，经过海水浸泡 50 年后 GFRP 筋的粘结强度折减系数分别为 0.65、0.65、0.61、0.61 和 0.58，经过海水浸泡与持续荷载耦合作用 50 年后 GFRP 的筋粘结强度折减系数分别为 0.60、0.60、0.56、0.56 和 0.52。

3.3 GFRP 筋抗拉强度折减系数

3.3.1 长期抗拉强度预测方法

目前最常用的 FRP 筋抗拉强度预测方法由 Huang 等^[23]提出。该方法指出 FRP 筋的抗拉强度退化规律符合 Arrhenius 关系，即

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT_k}} \tag{8}$$

式中： k 是 FRP 筋的退化速率； A 是与筋材、退化过程有关的系数； E_a 是活化能； R 是理想气体常量； T_k 是开尔文温度。Arrhenius 关系假设 FRP 筋的退化机制不会因时间和温度的影响而改变，且温度上升可以加速 FRP 筋的退化。

若 FRP 筋在 T_1 和 T_2 ($T_1 < T_2$ ，单位为 ℃) 两种温度下的退化程度相同，且达到这一退化程度所需的时间分别为 t_1 和 t_2 ，则 t_1 和 t_2 的比值 $r_{T_1-T_2}$ 可表示为

$$r_{T_1-T_2} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{k_2}{k_1} = e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1+273.15} - \frac{1}{T_2+273.15} \right)} \tag{9}$$

式中： $r_{T_1-T_2}$ 又称为温度由 T_1 转化至 T_2 的时间转化因子； k_1 和 k_2 分别是在 T_1 和 T_2 温度 GFRP 筋的退化速率； E_a/R 是一个常数。

Bank 等^[24]发现 FRP 筋抗拉强度保留率与时间

的对数呈线性关系，如图 8 所示。在 T_1 和 T_2 温度下的曲线均是通过对加速试验数据回归得到的，而 T_3 (单位为 ℃) 温度下的曲线是需要预测的抗拉强度退化曲线。 t_D 表示设计使用天数， t_s 表示 T_3 温度下 GFRP 筋在 t_D 时的抗拉强度保留率对应的 T_1 温度下使用天数。 δ_1 是 T_1 温度下 GFRP 筋经过 365 天后的抗拉强度降低率， δ_2 是 T_1 温度下 GFRP 筋从 365 天至设计使用天数的抗拉强度降低率， δ_3 是当温度由 T_1 升至 T_3 时 FRP 筋抗拉强度的损失百分比。

当已知 T_1 和 T_2 温度下 FRP 筋的抗拉强度退化曲线时，可以分别确定两种温度下达到某种退化程度所需的时间，进而得到时间转化因子 $r_{T_1-T_2}$ 。将 $r_{T_1-T_2}$ 代入式 (9) 中可解出 E_a/R 的值。由图 8 可

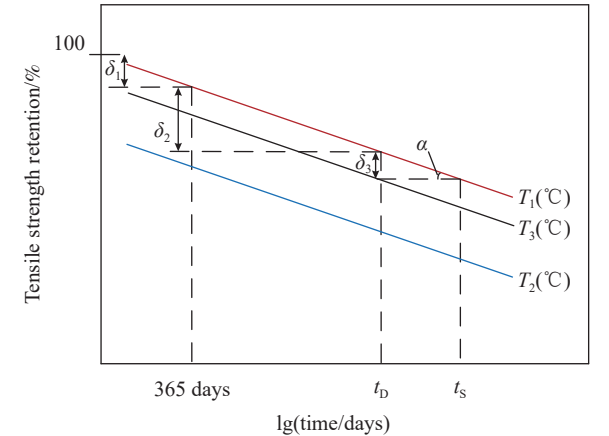


图 8 GFRP 筋抗拉强度保留率与时间的对数之间的关系
Fig. 8 Relation between GFRP bar's tensile strength retention and logarithmic time

知，当温度为 T_3 时，GFRP 筋达到设计使用天数时的抗拉强度为

$$f_{fu} = (1 - \delta_1 - \delta_2 - \delta_3)f_{fu}^* \tag{10}$$

式中： δ_1 可以通过将 $t=365$ 天代入 T_1 温度下的抗拉强度回归曲线中获得； δ_2 和 δ_3 可以根据图 8 中的几何关系确定，它们的表示式分别为

$$\delta_2 = \tan \alpha [\lg t_D - \lg 365] = -\rho \lg t_Y \tag{11}$$

$$\delta_3 = \tan \alpha [\lg t_S - \lg t_D] = -\rho \lg r_{T_1-T_3} \tag{12}$$

式中： α 是 FRP 筋抗拉强度退化曲线与 x 轴之间的夹角(锐角)； t_Y 是设计使用年限； ρ 是 FRP 筋抗拉强度退化曲线的斜率； $r_{T_1-T_3}$ 是温度由 T_1 转化至 T_3 的时间转化因子，可以通过已知的 T_1 、 T_3 和 E_a/R 代入式 (9) 中获得。联立式 (10)、式 (11) 和式 (12) 可得下式：

$$f_{fu} = \left[1 - \delta_1 + \rho \lg (t_Y r_{T_1-T_3}) \right] f_{fu}^* \tag{13}$$

除了考虑温度和设计使用时间对 FRP 筋长期抗拉强度的影响，该预测方法还引入了湿度影响系数 β 。由于 GFRP 筋抗拉性能的退化速率随着环境湿度的增大而增大。因此，式 (13) 应修改为

$$f_{fu} = \left[1 - \delta_1 + \rho \lg (t_Y r_{T_1-T_3}) \right] \beta f_{fu}^* = \eta_t f_{fu}^* \tag{14}$$

式中， η_t 是受环境与荷载作用后 GFRP 筋的抗拉强度折减系数。

3.3.2 折减系数的确定

虽然有研究表明若干年后混凝土中的 GFRP 筋没有退化^[25-26]，但一些学者却得到了相反的结论^[27-28]。通常将 GFRP 筋放入碱溶液中来模拟处于混凝土中的 GFRP 筋退化情况。由于 GFRP 筋在碱溶液中的退化速率高于在混凝土中的退化，故采用碱溶液获得的 GFRP 筋抗拉强度折减系数可能偏低^[29-30]。

Wang 等^[31]开展了 GFRP 筋的加速腐蚀试验。通过将直径 6 mm 的 GFRP 筋浸泡在特制的溶液中，可以模拟海水浸泡下混凝土中 GFRP 筋的退化。GFRP 筋承受的持续荷载是其抗拉荷载的 0%~40%。为了确定 GFRP 筋在海水浸泡与持续荷载耦合作用下的抗拉强度折减系数，本文搜集了 Wang 等^[31]的部分试验数据，如表 6 所示。可以发现，分析抗拉强度折减系数和粘结强度折减系数时 GFRP 筋的直径(分别是 6 和 12 mm)不一致。研究表明不同直径 GFRP 筋的长期抗拉强度差异不大^[32]，故本文忽略了直径对 GFRP 筋抗拉强度折减系数的影响，认为不同直径的 GFRP 筋抗拉强

表 6 GFRP 筋的抗拉强度试验数据
Table 6 Test data of GFRP bar's tensile strength

Specimen	Tensile strength	
	Average/MPa	Retention/%
BC	1 054	100.0
B/32/21/0	1 032	97.9
B/32/42/0	1 007	95.5
B/32/63/0	1 036	98.3
B/55/21/0	966	91.7
B/55/42/0	980	93.0
B/55/63/0	948	89.9
B/40/21/20	915	86.8
B/40/42/20	865	82.0
B/40/63/20	781	74.1
B/55/21/20	724	68.7
B/55/42/20	773	73.4
B/55/63/20	617	58.6

Notes: BC—Control specimen. The naming method of all the conditioned specimens follows the form of “B/ $a_1/a_2/a_3$ ”, in which B is GFRP bar, a_1 is solution temperature in $^{\circ}\text{C}$, a_2 is immersion time in day, and a_3 is sustained load level in %.

度折减系数是相同的。

由于材料的变异性、试验误差等因素，表 6 中抗拉强度并没有随时间增加而不断减小。例如：浸泡 42 天后试件 B/55/42/20 的抗拉强度高于浸泡 21 天后试件 B/55/21/20 的抗拉强度。这显然是不符合常理的。为了获得较准确的预测结果，在分析抗拉强度时删除了这些测量异常点。

图 9 展示了 GFRP 筋的抗拉强度保留率变化规律。如图 9(a) 所示，在海水浸泡下， 32°C 和 55°C 时 GFRP 筋的抗拉强度保留率拟合曲线的斜率接近，因此认为拟合曲线的斜率是以上两斜率的均值，即 -0.0573 。当温度为 32°C 时，将 $x=\lg 365$ 代入抗拉强度保留率拟合曲线公式中可知 $\delta_1=0.07$ 。根据图 9(a) 可以计算出温度从 32°C 升至 55°C 时的时间转化因子为 25.916，将该值代入式 (9) 中得到 $E_a/R=14\ 171$ 。因此，温度从 32°C 转变为 T_3 时，时间转化因子 r_{32-T_3} 的计算公式为

$$r_{32-T_3} = e^{\left(\frac{14171}{32+273.15} - \frac{14171}{T_3+273.15} \right)} \tag{15}$$

类似地，如图 9(b) 所示，在海水浸泡与持续荷载耦合作用下，GFRP 筋的抗拉强度保留率拟合曲线的斜率为 -0.23 。 40°C 时，将 $x=\lg 365$ 代入抗拉强度保留率拟合曲线公式中可知 $\delta_1=0.41$ 。根据图 9(b) 可以计算出温度从 40°C 升至 55°C 时的时间转化因子为 5.766，将该值代入式 (9) 中得到 $E_a/R=12\ 002$ 。因此，温度从 40°C 转变为 T_3 时，

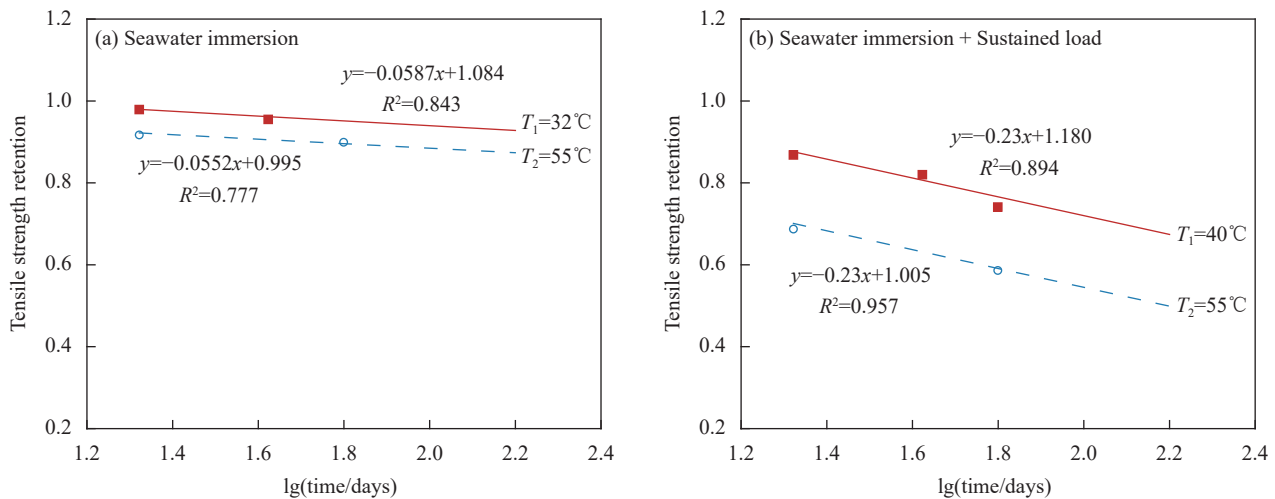


图 9 GFRP 筋的抗拉强度保留率变化规律

Fig. 9 Variations of the GFRP bar's tensile strength retention

时间转化因子 r_{40-T_3} 的计算公式为

$$r_{40-T_3} = e^{\left(\frac{12002}{40+273.15} - \frac{12002}{T_3+273.15}\right)} \tag{16}$$

基于以上分析结果，计算了结构设计使用年限为 50 年时 GFRP 筋的抗拉强度折减系数。在计算抗拉强度折减系数时只考虑环境湿度最大的情况，此时 GFRP 筋的抗拉强度降低程度最大。表 7 列出了 GFRP 筋的抗拉强度折减系数及计算该系数所需的各种参数。当环境的年平均温度为 8℃、13℃、18℃、23℃ 和 28℃ 时，经过海水浸泡 50 年后 GFRP 筋抗拉强度折减系数分别为 0.93、0.91、0.89、0.87 和 0.85，经过海水浸泡与持续荷载耦合作用 50 年后 GFRP 筋抗拉强度折减系数分别为 0.63、0.56、0.49、0.42 和 0.35。

3.4 GFRP 筋长期锚固长度计算公式

在 GFRP 筋短期粘结强度计算公式等号的右侧乘以粘结强度折减系数，即可获得在环境和荷

载影响下 GFRP 筋的长期粘结强度计算公式，如表 8 所示。

将表 7 中 GFRP 筋的抗拉强度折减系数代入式 (14) 中，可确定受环境与荷载影响的 GFRP 筋设计抗拉强度。联立式 (3)、式 (14) 和表 8 中的长期粘结强度计算公式，可得到 GFRP 筋的长期锚固长度计算公式，如表 9 所示。

式 (3) 可以转化为

$$l_d = f_{tu}A_f/(u\pi d_b) \tag{17}$$

由上式可推测出 GFRP 筋长期与短期的锚固长度之比等于抗拉强度折减系数与粘结强度折减系数的比值，即 η_t/η_b 。表 10 列出了不同条件下 GFRP 筋的长期与短期锚固长度之比。可知，在相同年平均气温下，锚固长度由大到小依次为海水浸泡下的锚固长度、短期锚固长度和海水浸泡与持续荷载耦合作用下的锚固长度。式 (17) 表明粘结性能的退化使 GFRP 筋需要更大的锚固长度，

表 7 GFRP 筋抗拉强度折减系数计算结果

Table 7 Calculation of reduction factors of GFRP bar's tensile strength

Annual average temperature/℃	t_Y	β	Seawater immersion				Seawater immersion + Sustained load			
			δ_1	ρ	r_{32-T_3}	η_t	δ_1	ρ	r_{40-T_3}	η_t
8	50	1	0.07	-0.0573	0.02	0.93	0.41	-0.23	0.01	0.63
13					0.05	0.91			0.03	0.56
18					0.11	0.89			0.06	0.49
23					0.24	0.87			0.11	0.42
28					0.54	0.85			0.22	0.35

Notes: t_Y —Design service life of structures; β —Humidity coefficient; δ_1 —Reduction of GFRP bar's tensile strength after 365 days at the temperature of T_1 ; ρ —Slope of the time-dependent tensile strength curve of GFRP bar; r_{32-T_3} —Time conversion factor under seawater immersion; r_{40-T_3} —Time conversion factor under the coupling effect of seawater immersion and sustained load; η_t —Parameter related to the reduction factor of the GFRP bar's tensile strength.

表 8 GFRP 筋长期粘结强度计算公式总结
Table 8 Summary of long-term bond strength equations of GFRP bar

Annual average temperature/°C	Long-term bond strength equations	
	Seawater immersion	Seawater immersion + Sustained load
8	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.131 + 0.204 \frac{C}{d_b} + 4.906 \frac{d_b}{l_e}$	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.121 + 0.188 \frac{C}{d_b} + 4.528 \frac{d_b}{l_e}$
13	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.131 + 0.204 \frac{C}{d_b} + 4.906 \frac{d_b}{l_e}$	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.121 + 0.188 \frac{C}{d_b} + 4.528 \frac{d_b}{l_e}$
18	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.123 + 0.192 \frac{C}{d_b} + 4.604 \frac{d_b}{l_e}$	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.113 + 0.176 \frac{C}{d_b} + 4.226 \frac{d_b}{l_e}$
23	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.123 + 0.192 \frac{C}{d_b} + 4.604 \frac{d_b}{l_e}$	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.113 + 0.176 \frac{C}{d_b} + 4.226 \frac{d_b}{l_e}$
28	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.117 + 0.182 \frac{C}{d_b} + 4.377 \frac{d_b}{l_e}$	$\frac{u}{\sqrt{f_c'}} = -0.105 + 0.163 \frac{C}{d_b} + 3.924 \frac{d_b}{l_e}$

表 9 GFRP 筋的长期锚固长度计算公式总结
Table 9 Summary of long-term development length equations of GFRP bar

Annual average temperature/°C	Long-term development length equations	
	Seawater immersion	Seawater immersion + Sustained load
8	$l_d = d_b \left(\frac{0.93 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 19.624 \right) / \left(0.816 \frac{C}{d_b} - 0.524 \right)$	$l_d = d_b \left(\frac{0.63 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 18.112 \right) / \left(0.752 \frac{C}{d_b} - 0.484 \right)$
13	$l_d = d_b \left(\frac{0.91 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 19.624 \right) / \left(0.816 \frac{C}{d_b} - 0.524 \right)$	$l_d = d_b \left(\frac{0.56 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 18.112 \right) / \left(0.752 \frac{C}{d_b} - 0.484 \right)$
18	$l_d = d_b \left(\frac{0.89 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 18.416 \right) / \left(0.768 \frac{C}{d_b} - 0.492 \right)$	$l_d = d_b \left(\frac{0.49 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 16.904 \right) / \left(0.704 \frac{C}{d_b} - 0.452 \right)$
23	$l_d = d_b \left(\frac{0.87 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 18.416 \right) / \left(0.768 \frac{C}{d_b} - 0.492 \right)$	$l_d = d_b \left(\frac{0.42 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 16.904 \right) / \left(0.704 \frac{C}{d_b} - 0.452 \right)$
28	$l_d = d_b \left(\frac{0.85 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 17.508 \right) / \left(0.728 \frac{C}{d_b} - 0.468 \right)$	$l_d = d_b \left(\frac{0.35 f_{fu}^*}{\sqrt{f_c'}} - 15.696 \right) / \left(0.652 \frac{C}{d_b} - 0.420 \right)$

Note: f_{fu}^* —Guaranteed tensile strength of the GFRP bar.

表 10 GFRP 筋的长期与短期锚固长度之比
Table 10 Ratios of GFRP bar' long-term and short-term development lengths

Annual average temperature/°C	Conditions for long-term length	
	Seawater immersion	Seawater immersion + Sustained load
8	1.43	1.05
13	1.40	0.93
18	1.46	0.88
23	1.43	0.75
28	1.47	0.67

但抗拉性能的降低却能减小锚固长度。在海水浸泡与持续荷载耦合作用下 GFRP 筋的抗拉强度显著降低，因此该条件下锚固长度最小。

为了更深入地了解环境和荷载的单独和耦合作用对 GFRP 筋长期锚固长度的影响，未来需对一般大气环境、持续荷载单独作用下 GFRP 筋的粘结性能进行研究，并将一般大气环境、海水浸泡单独作用、持续荷载单独作用、海水浸泡与持

续荷载耦合作用这四种条件下 GFRP 筋的长期粘结强度和锚固长度进行比较。

4 结论

通过引入玻璃纤维增强树脂复合材料 (Glass fiber-reinforced polymer, GFRP) 筋粘结强度折减系数和抗拉强度折减系数，对 GFRP 筋短期锚固长度修正，提出了海水浸泡与持续荷载耦合作用

下适用于拔出破坏的 GFRP 筋长期锚固长度计算公式。主要结论如下:

(1) 影响 GFRP 筋长期锚固长度的原因主要包括 GFRP 筋粘结强度的减小和 GFRP 筋抗拉强度的降低;

(2) 当结构所在地的年平均气温为 8℃、13℃、18℃、23℃ 和 28℃ 时, 经过海水浸泡作用 50 年后 GFRP 筋的粘结强度折减系数分别为 0.65、0.65、0.61、0.61 和 0.58; 经过海水浸泡与持续荷载耦合作用 50 年后 GFRP 筋的粘结强度折减系数分别为 0.60、0.60、0.56、0.56 和 0.52;

(3) 当结构所在地的年平均气温为 8℃、13℃、18℃、23℃ 和 28℃ 时, 经过海水浸泡作用 50 年后 GFRP 筋的抗拉强度折减系数分别为 0.93、0.91、0.89、0.87 和 0.85; 经过海水浸泡与持续荷载耦合作用 50 年后 GFRP 筋的抗拉强度折减系数分别为 0.63、0.56、0.49、0.42 和 0.35。

参考文献:

[1] 冯鹏. 复合材料在土木工程中的发展与应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9): 99-104.
FENG Peng. Development and application of composite in civil engineering[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(9): 99-104(in Chinese).

[2] EHSANI M R, SAADATMANESH H, TAO S. Design recommendations for bond of GFRP rebars to concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122: 247-254.

[3] OKELLO R. Realistic bond strength of FRP rebars in NSC from beam specimens[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2007, 20(3): 133-140.

[4] WAMBEKE B W, SHIELD C K. Development length of glass fiber-reinforced polymer bars in concrete[J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(1): 11-17.

[5] XUE W, ZHENG Q, YANG Y, et al. Bond behavior of sand-coated deformed glass fiber reinforced polymer rebars[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(10): 895-910.

[6] BASARAN B, KALKAN I. Development length and bond strength equations for FRP bars embedded in concrete[J]. *Composite Structures*, 2020, 251: 112662.

[7] CHOI D U, CHUN S C, HA S S. Bond strength of glass fibre-reinforced polymer bars in unconfined concrete[J]. *Engineering Structures*, 2012, 34: 303-313.

[8] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars: ACI 440.1 R-15[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.

[9] Canadian Standards Association. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers: CAN/CSA S806-12[S]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2012.

[10] Canadian Standards Association. Canadian highway bridge design code: CAN/CSA S6: 19[S]. Toronto: Canadian Standards Association, 2014.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料工程应用技术标准: GB/T 50608—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction: GB/T 50608—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020(in Chinese).

[12] BASARAN B, KALKAN I. Investigation on variables affecting bond strength between FRP reinforcing bar and concrete by modified hinged beam tests[J]. *Composite Structures*, 2020, 242: 112185.

[13] American Concrete Institute. Guide test methods for fiber-reinforced polymer (FRP) for reinforcing or strengthening concrete and masonry structures: ACI 440.3 R-12[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2012.

[14] TIGHIOUART B, BENMOKRANE B, GAO D. Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars[J]. *Construction and Building Materials*, 1998, 12: 453-462.

[15] HARAJLI M, ABOUNIAJ M. Bond performance of GFRP bars in tension: Experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(6): 659-668.

[16] SCZECH D, KOTYNIA R. Beam bond tests of GFRP and steel reinforcement to concrete[J]. *Archives of Civil Engineering*, 2018, 64(4): 243-256.

[17] European Committee for Standardization. Concrete-Specification, performance, production and conformity: EN 206: 2013+A1: 2016[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2016.

[18] XIAO J, QIANG C, NANNI A, et al. Use of sea-sand and sea-water in concrete construction: Current status and future opportunities[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 1101-1111.

[19] International Federation for Structural Concrete. FRP reinforcement in RC structures: Fib Bulletin 40[S]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007.

[20] WEBER A. Advanced reinforcement technology with GFRP rebar[C]//The 2nd International Fib Congress. Naples, 2006.

[21] 国家气象科学数据中心. 全球气候背景[EB/OL]. (2021-12-30) [2022-3-31]. <http://data.cma.cn/site/theme.html>.

- China Meteorological Data Service Centre. Global climate background[DB/OL]. (2021-12-30) [2022-3-31].<http://data.cma.cn/site/theme.html>(in Chinese).
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB/T 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of building structures: GB/T 50068—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020(in Chinese).
- [23] HUANG J, ABOUTAHA R. Environmental reduction factors for GFRP bars used as concrete reinforcement: New scientific approach[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(5): 479-486.
- [24] BANK L C, GENTRY T R, THOMPSON B P, et al. A model specification for FRP composites for civil engineering structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17: 405-437.
- [25] BENMOKRANE B, NAZAIR C, LORANGER M A, et al. Field durability study of vinyl-ester-based GFRP rebars in concrete bridge barriers[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(12): 04018094.
- [26] MUFTI A A, BANTHIA N, BENMOKRANE B, et al. Durability of GFRP composite rods[J]. *ACI Concrete International*, 2007, 29(2): 37-42.
- [27] ALSAYED S H, ALHOZAIMY A M, ALSALLOUM Y A, et al. Durability of the new generation of GFRP rebars under severe environments[C]//The 2nd International Conference on Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction (CDCC 02). Montreal, 2002.
- [28] CHEN Y, DAVALOS J F, RAY I, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures[J]. *Composite Structures*, 2007, 78: 101-111.
- [29] D'ANTINO T, PISANI M A. Influence of sustained stress on the durability of glass FRP reinforcing bars[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 474-486.
- [30] BENMOKRANE B, BROWN V L, ALI A H, et al. Reconsideration of the environmental reduction factor CE for GFRP reinforcing bars in concrete structures[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(4): 06020001.
- [31] WANG Z, ZHAO X L, XIAN G, et al. Effect of sustained load and seawater and sea sand concrete environment on durability of basalt- and glass-fibre reinforced polymer (B/GFRP) bars[J]. *Corrosion Science*, 2018, 138: 200-218.
- [32] BENMOKRANE B, MANALO A, BOUHET J C, et al. Effects of diameter on the durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in alkaline solution[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(5): 04017040.