

## 持续荷载作用对 GFRP 筋-海工混凝土黏结性能的影响

赵潍越<sup>1</sup>, 商怀帅<sup>1,\*</sup>, 杨加兴<sup>1</sup>, 聂志超<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛海陆通工程质量检测有限公司, 青岛 266033)

**摘要:**为研究持续荷载作用下 GFRP 筋与海工混凝土间的黏结性能,设计制作了 16 个 GFRP 筋-海工混凝土梁式黏结性能试件,在不同持续荷载等级(0%  $P_u$ , 25%  $P_u$ , 45%  $P_u$ , 65%  $P_u$ )作用下进行了为期 120 d 的持续荷载试验。对持续过程中 GFRP 筋-海工混凝土间的瞬时滑移及时变滑移进行了测试分析,并建立不同持续荷载等级作用下的 GFRP 筋-海工混凝土时变滑移模型;对比分析了持续荷载作用下 GFRP 筋与混凝土和普通钢筋与混凝土间的滑移量大小及变化规律。试验结果表明:瞬时滑移量随着持续等级的提高而增大,加载端滑移量大于自由端滑移量;时变滑移量随时间呈非线性增长,前期增长较快,后期滑移量逐渐趋于稳定;两种筋材与混凝土间的时变滑移变化规律相似,但 GFRP 筋与混凝土间的滑移量要远大于普通钢筋与混凝土间的滑移量。

**关键词:**GFRP 筋;海工混凝土;持续荷载;梁式试件;黏结强度;滑移量

**中图分类号:**TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)01-0019-07

## Effect of sustained load on the bond performance between GFRP bars and marine concrete

ZHAO Weiyue<sup>1</sup>, SHANG Huaishuai<sup>1,\*</sup>, YANG Jiaying<sup>1</sup>, NIE Zhichao<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Sea and Land Communication Engineering Quality Inspection Co. Ltd., Qingdao 266033, China)

**Abstract:** In order to study the bond performance between GFRP bar and marine concrete under sustained load, 16 GFRP bar-marine concrete beam specimens were designed and fabricated. The 120-day sustained load test was carried out under different sustained load levels (0%  $P_u$ , 25%  $P_u$ , 45%  $P_u$  and 65%  $P_u$ ). The instantaneous slip and time-varying slip between GFRP bar and marine concrete during the loading process were analyzed, and the time-varying slip models under different load levels were established. The size and variation of the slip between GFRP bar and concrete and of the slip between ordinary rebar and concrete under continuous load were compared and analyzed. The test results show that the instantaneous slip increases with the increase of sustained load level, and the slip at the loading end is greater than that at the free end; the time-varying slip increases nonlinearly with time; the slip increases rapidly in the early stage and tends to be stable in the later stage; the

收稿日期:2022-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778310);山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2022ZD33);滨海城乡建设工程安全与性能提升研究创新团队项目;山东省“双一流”建设工程-土木

作者简介:赵潍越(1998-),女,黑龙江肇东人。硕士,研究方向为结构工程。E-mail: 994884664@qq.com。

\* 通信作者:商怀帅(1980-),男,山东青岛人。博士,教授,主要从事混凝土与钢筋混凝土结构方面的研究。  
E-mail: shanghuaishuai@163.com。

laws of change of time-dependent slips between the two reinforcement materials and concrete are similar, but the slip between GFRP bar and concrete is much greater than that between ordinary rebar and concrete.

**Key words:** GFRP bar; marine concrete; sustained load; beam specimen; bond strength; slip

海洋环境条件恶劣,氯离子侵蚀、海浪冲刷等因素会导致海工混凝土结构中钢筋锈蚀,从而对海工混凝土结构性能产生较大影响,而钢筋的锈蚀产物体积膨胀也会导致混凝土产生锈胀裂缝,影响钢筋与混凝土间的黏结性能<sup>[1-2]</sup>。目前,钢筋锈蚀被认为是影响混凝土结构耐久性的主要因素<sup>[3]</sup>,不仅造成了巨大的经济损失,还带来许多安全隐患,受到从业人员和研究人员的广泛关注。纤维增强塑料筋(Fiber Reinforced Polymer,简称FRP)是一种非金属加固筋材,因其强度高、质量轻、耐腐蚀以及施工方便等优点<sup>[4-7]</sup>被人们应用于海洋工程中,以此来解决钢筋锈蚀带来的混凝土结构耐久性问题。其中GFRP筋(Glass-FRP,玻璃纤维复合材料)因其较高的性价比,已被广泛应用于实际工程中。

FRP筋与混凝土之间的黏结力主要由化学胶结力、摩擦力和机械咬合力三部分组成<sup>[8-10]</sup>,其黏结性能受混凝土强度、FRP筋直径、筋材表面形式、服役环境(温度、湿度、干湿循环等)等因素影响<sup>[11-15]</sup>。目前,国内外学者针对FRP筋与混凝土间的黏结性能开展了大量试验研究。YAN等<sup>[16]</sup>通过拉拔试验得到当黏结长度小于GFRP筋直径的6倍时,试件将会发生拔出破坏。DONG等<sup>[17]</sup>对海水浸泡环境下BFRP筋、CFRP筋、GFRP筋与混凝土间的黏结强度展开了研究,试验得出BFRP筋和GFRP筋黏结强度降低,而CFRP筋的黏结强度略有增大。单波等<sup>[18]</sup>对比研究CFRP筋与海水海砂混凝土、普通混凝土间的黏结强度,发现CFRP筋-海水海砂混凝土的黏结强度是CFRP筋普通混凝土黏结强度的0.87~0.91倍。薛伟辰等<sup>[19]</sup>研究了不同环境介质之间的黏结性能,得出FRP筋的黏结强度略低于钢筋的黏结强度。KATZ<sup>[20]</sup>通过试验研究得出疲劳加载后FRP筋-混凝土试件的黏结强度相较于静力黏结强度有明显的下降。胡成超<sup>[21]</sup>研究了往复荷载作用下GFRP筋-混凝土的黏结强度,得出:在达到峰值滑移前往复荷载不会引起黏结强度的退化,而达到峰值滑移后随着循环位移加载幅值的增加,GFRP筋的黏结性能退化明显。

由此可见,对于FRP筋与混凝土间黏结性能的研究多集中在环境影响或荷载类型上,而对长期荷载作用下FRP筋与混凝土黏结性能的研究较少,因此,本文通过对梁式试件施加120 d持续荷载,研究持续荷载作用下GFRP筋与海工混凝土间黏结性能的变化,从而为GFRP筋-海工混凝土间黏结强度的研究提供试验依据和理论指导。

## 1 试验概况

### 1.1 试件材料

本试验采用混凝土强度等级为C40,抗冻等级为F300的海工混凝土。水泥采用P·O42.5普通硅酸盐水泥,粗骨料采用5~25 mm连续级配的石灰石碎石,细骨料采用细度模数为2.8的Ⅱ区中砂,水采用自来水,此外还添加了矿粉、引气剂、聚羧酸高性能缓凝减水剂。具体配合比见表1。试件浇筑完毕后放入标准养护室养护28 d,混凝土立方体抗压强度平均值为48.9 MPa。受拉区筋材采用表面缠绕纤维股的GFRP筋,直径为14 mm。

表1 混凝土配合比

水灰比	各组分含量/(kg·m <sup>-3</sup> )							强度等级
	水泥	砂	石	水	矿粉	减水剂	引气剂	
0.48	347	716	910	167	156	11	1	C40

### 1.2 试件设计

本试验制作了16个GFRP筋-海工混凝土梁式试件,试件尺寸为100 mm×150 mm×550 mm,底部保护层厚度为40 mm。试件分为左右两个半梁,通过梁底的GFRP筋及顶部的钢铰相连。黏结段长度为

5d(d 为 GFRP 筋直径),为使黏结应力均匀分布保证试验的准确性,在非黏结段采用直径略大于 GFRP 筋直径的 PVC 管套住,并将两端利用泡沫双面胶封住,以防止混凝土倒灌。梁式试件底部纵筋采用直径为 14 mm 的 GFRP 筋,长度约为 750 mm,横截面积为 153.9 mm<sup>2</sup>。试件两侧各配置 3 个箍筋,采用直径为 6 mm 的 GFRP 筋,间距为 60 mm。梁式试件构造如图 1 所示。

1.3 试验分组

本试验共设计 4 个不同的持载等级,每组设置 4 个试件,试验编号及分组见表 2。

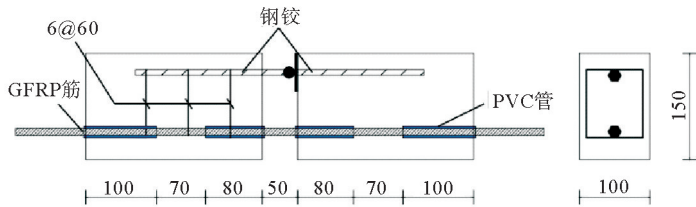


图 1 梁式试件构造(单位:mm)

表 2 试件分组

试件编号	持续荷载等级/%	试件数量/个
G-0	0	4
G-25	25	4
G-45	45	4
G-65	65	4

注:字母“G”代表 GFRP 筋;数字“0”“25”“45”“65”分别代表 0% P<sub>u</sub>,25% P<sub>u</sub>,45% P<sub>u</sub>,65% P<sub>u</sub>

1.4 持续荷载的施加方式

通过弯曲黏结试验测得梁式试件的极限承载力(P<sub>u</sub>)为 42.53 kN,因此所施加的 25%P<sub>u</sub>,45%P<sub>u</sub>及 65%P<sub>u</sub>持续荷载值分别为 10.63,19.14 及 27.46 kN。采用图 2 所示的加载装置,两个持载等级相同的梁式试件为一组,对称固定于加载架上,使其互为反力架。顶部通过千斤顶对梁式试件施加荷载,每次增加 2 kN,至施加到目标值时停止施加荷载并立即拧紧螺母。

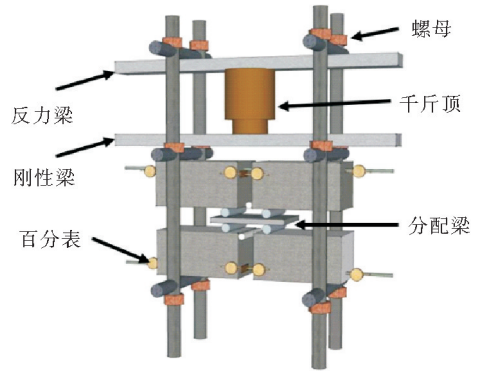


图 2 持续荷载加载

2 试验结果与分析

2.1 持续荷载试验结果

2.1.1 瞬时滑移分析

试验初期,对各组试件施加持续荷载时产生的滑移量,称为 GFRP 筋与海工混凝土间的瞬时滑移量(S<sub>0</sub>)。表 3 为各组平行试件的瞬时滑移量均值。

由表 3 可知,试件 G-45,G-65 的自由端(加载端)瞬时滑移量是 G-25 的 1.583(1.738)倍、3.450(2.898)倍。试件 G-25,G-45,G-65 的加载端瞬时滑移量分别是自由端瞬时滑移量的 2.450 倍、2.689 倍、2.058 倍。试验数据表明:随着持续荷载等级的提高,试件自由端和加载端的瞬时滑移量增大,这是因为施加荷载后 GFRP 筋与混凝土间的界面遭到破坏,GFRP 筋与混凝土间的化学附着力丧失,且所施加的荷载越大效果越明显<sup>[22-23]</sup>;荷载等级一致时,加载端滑移量远大于自由端,这是因为黏结应力在向自由端传递过程中的应力损失和黏结应力沿传递方向上分布不均导致的<sup>[12,24]</sup>。

文献[25]通过同样的试验方法研究了钢筋混凝土梁式试件在持续荷载作用下的黏结性能,表 4 为各组试件的瞬时滑移量均值。

对比表 3、表 4 可知,在相同的持载等级下,GFRP 筋与混凝土间的滑移量远大于钢筋与混凝土间的滑移量,这主要是因为钢筋与 GFRP 筋的表面形态不同导致其黏结机制不同,表面缠绕纤维股的 GFRP 是以摩擦力为主要黏

表 3 瞬时滑移量 mm

试件编号	自由端	加载端
G-25	0.120	0.294
G-45	0.190	0.511
G-65	0.414	0.852

表 4 文献[25]瞬时滑移量 mm

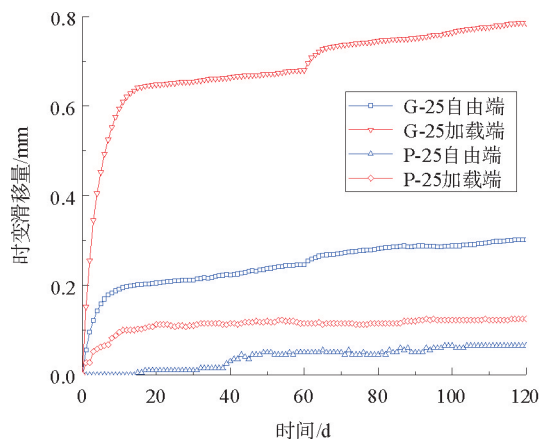
试件编号	自由端	加载端
P-25	0.015	0.063
P-45	0.020	0.120
P-65	0.030	0.193

注:字母“P”代表钢筋;数字“25”“45”“65”分别代表 25% P<sub>u</sub>,45% P<sub>u</sub>,65% P<sub>u</sub>

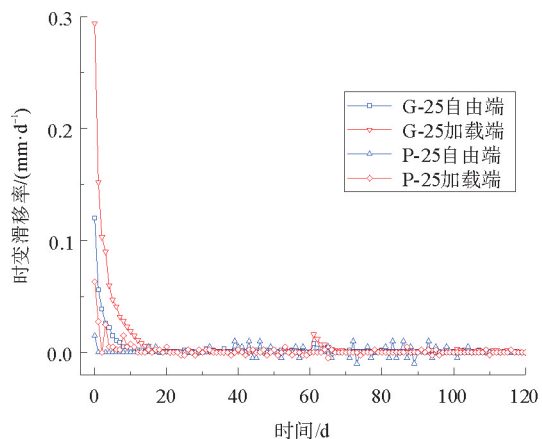
结机制,而带肋钢筋则以摩擦力和机械咬合力为主<sup>[26]</sup>。

### 2.1.2 时变滑移分析

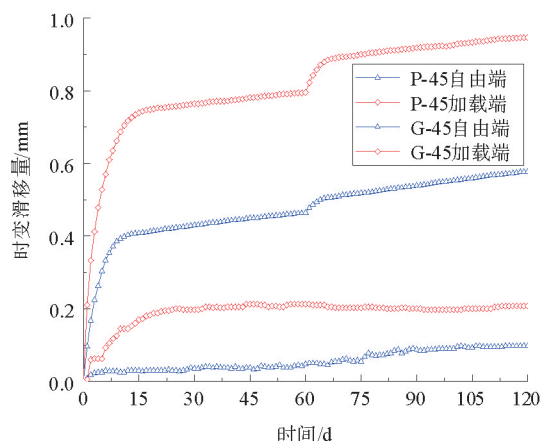
长期持续荷载作用下 GFRP 筋与海工混凝土间随时间变化的滑移量称为时变滑移量( $\Delta S$ ),持续荷载作用下 GFRP 筋与海工混凝土间每天产生的滑移量称为时变滑移率。图 3 为不同荷载等级作用下试件的时变滑移量曲线及时变滑移率曲线。



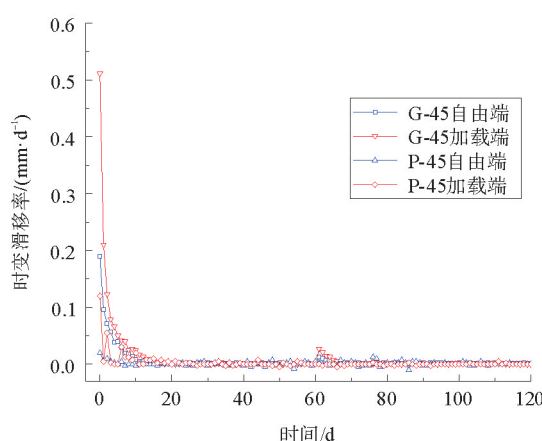
(a) 25%  $P_0$ 时变滑移量曲线



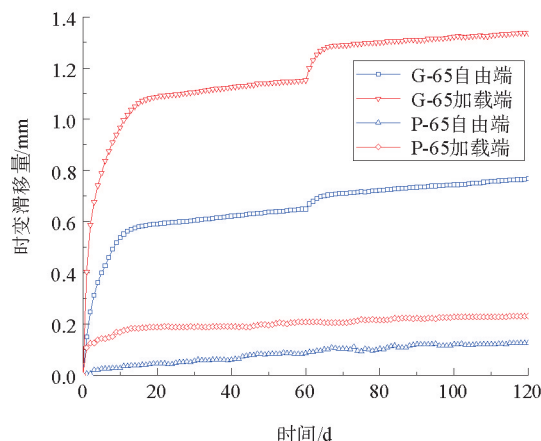
(b) 25%  $P_0$ 时变滑移率曲线



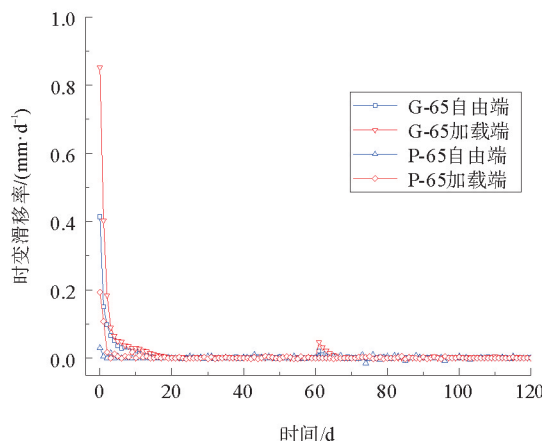
(c) 45%  $P_0$ 时变滑移量曲线



(d) 45%  $P_0$ 时变滑移率曲线



(e) 65%  $P_0$ 时变滑移量曲线



(f) 65%  $P_0$ 时变滑移率曲线

图 3 持续荷载作用下滑移量与时间的关系

从图 3 中可以看出,GFRP 筋与混凝土间的时变滑移曲线和钢筋与混凝土间的时变滑移曲线有着相似的变化趋势,均为在试验初期增长较快,随后增长速度逐渐减小,试验后期趋于稳定。此外,各组时变滑移在 60 d 时均有明显的增长,这是因试验周期较长,持载装置发生松弛,会造成持续荷载降低,为提高试验精确度,在 60 d 时对试件进行一次补载所致。

表 5 为 GFRP 筋与海工混凝土持续加载第 30 天( $\Delta S_{30}$ )、60 天( $\Delta S_{60}$ )、90 天( $\Delta S_{90}$ )、120 天( $\Delta S_{120}$ )时的时变滑移量。表 6 为钢筋与混凝土持续加载第 30 天( $\Delta S_{30}$ )、60 天( $\Delta S_{60}$ )、90 天( $\Delta S_{90}$ )、120 天( $\Delta S_{120}$ )时的时变滑移量。由表 5 可知,G-25 组梁式试件在 30,60,90 d 时自由端(加载端)的时变滑移量是 120 d 的 70.10%(83.33%),81.73%(86.51%),95.35%(95.67%);G-45 组梁式试件在 30,60,90 d 时自由端(加载端)的时变滑移量是 120 d 的 74.52%(80.76%),80.42%(84.04%),93.41%(97.04%);G-65 组梁式试件在 30,60,90 d 时自由端(加载端)的时变滑移量是 120 d 的 82.43%(82.59%),84.62%(86.10%),95.70%(97.83%)。由此可见,滑移的增长主要发生在持载初期,梁式试件在受持续荷载的前 30 d 内,滑移量可达到最终滑移量的 80%左右。

表 5 GFRP 筋与海工混凝土间的时变滑移量

mm

试件编号	自由端				加载端			
	$\Delta S_{30}$	$\Delta S_{60}$	$\Delta S_{90}$	$\Delta S_{120}$	$\Delta S_{30}$	$\Delta S_{60}$	$\Delta S_{90}$	$\Delta S_{120}$
G-25	0.211	0.246	0.287	0.301	0.655	0.680	0.752	0.786
G-45	0.430	0.464	0.539	0.577	0.764	0.795	0.918	0.946
G-65	0.605	0.649	0.734	0.767	1.105	1.152	1.309	1.338

表 6 文献[25]钢筋与混凝土间的时变滑移量

mm

试件编号	自由端				加载端			
	$\Delta S_{30}$	$\Delta S_{60}$	$\Delta S_{90}$	$\Delta S_{120}$	$\Delta S_{30}$	$\Delta S_{60}$	$\Delta S_{90}$	$\Delta S_{120}$
P-25	0.010	0.050	0.050	0.065	0.110	0.115	0.120	0.125
P-45	0.035	0.048	0.088	0.098	0.198	0.213	0.200	0.208
P-65	0.055	0.085	0.120	0.125	0.188	0.208	0.223	0.230

从表 6 中可以看出,钢筋与混凝土间时变滑移的增长主要发生在试验前期。对比表 5、表 6 可以看出,无论是自由端还是加载端,钢筋与混凝土间的时变滑移量均远小于 GFRP 筋与海工混凝土间的时变滑移量。

### 2.1.3 总滑移分析

GFRP 筋与海工混凝土间的总滑移( $S$ )由初期施加持续荷载时产生的瞬时滑移量( $S_0$ )和长期持续荷载所引起的时变滑移量( $\Delta S$ )两部分组成,即:总滑移( $S$ )=瞬时滑移( $S_0$ )+时变滑移( $\Delta S$ )。

从表 3、表 5 中可以看出,GFRP 筋与海工混凝土间的总滑移随着荷载等级的提高而增大。在 30,60,90,120 d 时,G-45 自由端(加载端)总滑移量是 G-25 自由端(加载端)总滑移量的 1.873(1.344)倍、1.787(1.341)倍、1.791(1.366)倍、1.822(1.349)倍;在 30,60,90,120 d 时,G-65 自由端(加载端)总滑移量是 G-25 自由端(加载端)总滑移量的 3.079(2.062)倍、2.904(2.057)倍、2.805(2.066)倍、4.318(2.028)倍。这是因为在持续荷载作用下 GFRP 筋与海工混凝土间会产生徐变,且持载等级越大产生的滑移越大。

此外,从表 3、表 5 中还可以看出,试件的加载端总滑移始终远大于自由端的总滑移。G-25,G-45,G-65 组梁式试件在 60 d(120 d)时加载端总滑移是自由端总滑移的 2.661(2.565)倍,1.997(1.896)倍,1.885(1.854)倍。这是因为黏结应力在向自由端传递过程中的应力损失以及黏结应力沿传递方向上分布不均导致的<sup>[12,24]</sup>。

从表 4、表 6 中可以看出,钢筋与混凝土间的总滑移随着荷载等级的提高而增大,且加载端的总滑移

始终大于自由端的总滑移,这和 GFRP 筋与海工混凝土间的总滑移变化规律相似。

## 2.2 时变滑移模型

FRANKE<sup>[27]</sup>通过长期拉拔试验得出持续荷载作用下钢筋与混凝土间滑移与时间之间的关系式:

$$\Delta_t = \Delta_0 [1 + \varphi(t)] \quad (1)$$

$$\varphi(t) = (1 + 10t)^{0.08} \quad (2)$$

式中: $\Delta_t$  为第  $t$  天钢筋与混凝土间的时变滑移; $\Delta_0$  为由短期荷载所产生的滑移; $t$  为持载时间; $\varphi(t)$  为徐变系数。

本试验在式(1)(2)的基础上,考虑 GFRP 筋与钢筋的差异,得出如式(3)所示持续荷载作用下 GFRP 筋-海工混凝土间的时变滑移(自由端)模型:

$$S_t = a \cdot (1 + 10t)^b \quad (3)$$

式中: $S_t$  为时变滑移量,mm; $t$  为时间,d; $a, b$  为通过数据拟合得到的常数,见表 7。

表 7 拟合结果

试件编号	$a$	$b$	相关系数 $R^2$
G-25	0.058	0.234	0.954
G-45	0.128	0.211	0.926
G-65	0.195	0.195	0.921

持续荷载作用下 GFRP 筋-海工混凝土梁式试件自由端时变滑移拟合曲线如图 4 所示。由表 7 及图 4 可知,拟合结果较好,式(3)可以用来表征持续荷载作用下 GFRP 筋与海工混凝土间滑移量与持载时间的关系。

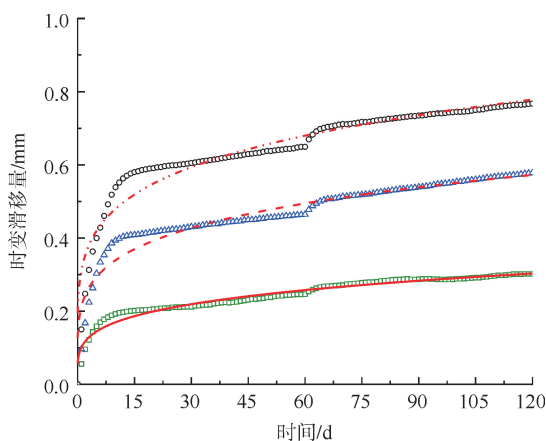


图 4 时变滑移拟合曲线

□ G-25; — G-25 拟合曲线;  
△ G-45; - - G-45 拟合曲线;  
○ G-65; ··· G-65 拟合曲线

## 3 结论

1) 随着持续荷载的增大,GFRP 筋与海工混凝土间的瞬时滑移增大,加载端的瞬时滑移远大于自由端的瞬时滑移。

2) GFRP 筋与海工混凝土间的时变滑移随时间呈非线性增长。持载初期总滑移增长较快,15 d 后增长缓慢并逐渐趋于稳定值。持续荷载等级越高,总滑移越大,且加载端的总滑移远大于自由端的总滑移。

3) 不同持载等级下试验值与本文所提出的时变滑移模型拟合程度较好,可为今后持续荷载作用下 GFRP 筋与海工混凝土间时变滑移的计算提供参考依据。

## 参考文献(References):

- [1] 梁新亚,何飞龙,李相坡,等. 锈蚀钢筋强度及黏结性能研究进展[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 1571-1575.  
LIANG Xinya, HE Feilong, LI Xiangpo, et al. Research progress on strength and bond properties of corroded steel bars[J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 1571-1575.
- [2] 李冰,张世义,王宏. 海洋环境下混凝土结构钢筋锈蚀率研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 18-23.  
LI Bing, ZHANG Shiyi, WANG Hong. Study on the steel structure corrosion rate of concrete structure in marine environment[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2021, 35(4): 18-23.
- [3] 赵捷. 钢筋混凝土基础设施的腐蚀与全寿命经济分析[J]. 农村经济与科技, 2016, 27(20): 231-235.  
ZHAO Jie. Corrosion of reinforced concrete infrastructure and life cycle economic analysis[J]. Rural Economy and Science, 2016, 27(20): 231-235.
- [4] DOLAGE D, DIAS M, ARIYAWANSA C. Offshore sand as a fine aggregate for concrete production[J]. British Journal of Applied Science & Technology, 2013, 3(4): 813-825.
- [5] FANG G, HO W K, TU W, et al. Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient

- temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172: 476-487.
- [6] SARASWATHY V, SONG H W. Improving the durability of concrete by using inhibitors[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(1): 464-472.
- [7] SÖYLEV T A, RICHARDSON M. Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22: 609-622.
- [8] ALTALMAS A, EL REFAI A, ABED F. Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 81: 162-171.
- [9] WEI W, LIU F, XIONG Z, et al. Bond performance between fibre-reinforced polymer bars and concrete under pull-out tests[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116803.
- [10] 张卫东, 王振波, 王成武. GFRP 筋与再生混凝土黏结性能试验研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2016 (9): 66-69.  
ZHANG Weidong, WANG Zhenbo, WANG Chengwu. Experimental study on bond performance between GFRP bar and recycled concrete[J]. *Composites Science and Engineering*, 2016 (9): 66-69.
- [11] 张彧. GFRP 筋与混凝土黏结性能理论及试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.  
ZHANG Yu. Experimental study on bond performance the cory between GFRP bar and concrete[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.
- [12] ACHILLIDES Z, PILAKOUTAS K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(2): 173-181.
- [13] BENMOKRANE B, TIGHIOUART B. Bond strength and load distribution of composite GFRP reinforcing bars in concrete[J]. *Materials Journal*, 1996, 93(3): 254-259.
- [14] OKELO R, YUAN R L. Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(3): 203-213.
- [15] TEPFERS R, DE LORENZIS L. Bond of FRP reinforcement in concrete: A challenge[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2003, 39(4): 315-328.
- [16] YAN F, LIN Z, YANG M. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 98: 56-69.
- [17] DONG Z, WU G, XU B, et al. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction[J]. *Materials & Design*, 2016, 92: 552-562.
- [18] 单波, 佟广权, 刘其元. CFRP 筋与海水海砂混凝土黏结性能试验[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(5): 113-123.  
SHAN Bo, TONG Guangquan, LIU Qiyuan. Experiment on bond performance of CFRP bars in seawater and sea sand concrete[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(5): 113-123.
- [19] 薛伟辰, 康清梁. 纤维塑料筋在混凝土结构中的应用[J]. *工业建筑*, 1999, 29(2): 19-21.  
XUE Weichen, KANG Qingliang. Application of fiber reinforced plastics in concrete structures[J]. *Industrial Construction*, 1999, 29(2): 19-21.
- [20] KATZ A. Bond to concrete of FRP rebars after cyclic loading[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2000, 4(3): 137-144.
- [21] 胡成超. 往复荷载作用下 GFRP 筋与混凝土黏结性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.  
HU Chengchao. Bond properties for GFRP bars in concrete under reversed cyclic loading[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [22] REHM G. Ber die grundlagen des verbundes zwischen stahl und beton[J]. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, 1961, 138: 59-59.
- [23] LUTZ L A. Analysis of stresses in concrete near a reinforcing bar due to bond and transverse cracking[J]. *Am Concrete Inst Journal & Proceedings*, 1970, 68(10): 778-787.
- [24] 秦帅. 钢筋混凝土间黏结滑移关系的解析模型及试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.  
QIN Shuai. Analytical model and experimental investigation on bond slip relationship between rebar and concrete[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [25] 任国盛. 持续荷载与氯离子侵蚀耦合作用下钢筋与混凝土间的黏结性能[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.  
REN Guosheng. Bond behavior between steel bar and concrete under sustained load coupled with chloride ion erosion[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [26] KANAKUBO T, KEISUKE Y, FUKUYAMA H, et al. Bond performance of concrete members reinforced with FRP bars[J]. *Architectural Institute of Japan*, 1993, 138: 767-767.
- [27] FRANKE L. Einfluss der belastungsdauer auf das verbundverhalten von stahl in beton (verbundkriechen)[M]. [S. l. ]:[s. n. ],1976.

(责任编辑 姜锡方;英文校审 程文华)