

文章编号:1671-8879(2016)05-0052-08

工作裂缝对 GFRP 筋混凝土梁 粘结耐久性的影响

杨文瑞,何雄君,代 力

(武汉理工大学 交通学院,湖北 武汉 430063)

摘 要:为了提供更准确的关于 GFRP 筋混凝土梁长期粘结耐久性影响规律的试验数据及设计理论指导,基于实际混凝土梁带工作裂缝持续受载的工作状态,通过对带工作裂缝 GFRP 筋混凝土梁加速老化后进行三点偏载试验,研究分析了工作裂缝对 GFRP 筋混凝土梁受室外环境、水溶液、60 ℃ 的碱性溶液等 3 种不同环境侵蚀 90、180、270 d 后的粘结耐久性影响,并提出关于不同滑移量计算粘结应力的理论计算方法;还依据试验数据及计算理论确定了环境作用 270 d 后各工况下的最大粘结应力。研究表明:带工作裂缝 GFRP 筋混凝土梁在碱性环境作用 270 d 后,滑移荷载损失高达 38.5%,挠度值增加 46.3%,最大粘结应力损失高达 59.4%;未带工作裂缝 GFRP 筋混凝土梁在任何侵蚀环境条件下,其滑移荷载及挠度值变化比例均小于带工作裂缝的 GFRP 筋混凝土梁;最大粘结应力值均大于带工作裂缝 GFRP 筋混凝土梁,且损失比例均小于带工作裂缝的 GFRP 筋混凝土梁;室外环境、水溶液、碱性溶液这 3 种环境中,碱性溶液对 GFRP 筋混凝土梁的粘结耐久性影响最为明显,且工作裂缝较大程度地加大了各种环境对 GFRP 筋混凝土梁粘结性能的劣化影响。

关键词:结构工程;GFRP 筋;混凝土梁;耐久性;粘结性能;工作裂缝

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Bond durability of glass fiber-reinforced polymer bars embedded concrete beams with work crack

YANG Wen-rui, HE Xiong-jun, DAI Li

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: To provide the more accurate experimental data and theory to guide the design of GFRP reinforced concrete beams for the long-term bond durability, based on the sustained load working state of the actual concrete beam with work crack, experimental and analytical investigations of bond performance of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars embedded in concrete beams with crack was presented. Beams were conditioned with sustained flexural loads in outdoor, tap water and 60 ℃ alkaline solution for 90, 180, 270 d, after which they were subjected to eccentric three-point flexure tests to evaluate bond performance, a theory calculation method of bond stress with different slip values was proposed, and the maximum bond stresses under various conditions

收稿日期:2016-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51178361)

作者简介:杨文瑞(1986-),女,江西南昌人,工学博士研究生,E-mail:wryang99@163.com。

after 270 d were determined according to the test data and theoretical calculation. The results show that the slip load loss, deflection values and the maximum bond stress reach to 38.5% and 59.4% respectively, and the deflection values increase 46.3% when beams are conditioned with alkaline environment for 270 d. The changing range of slip loads and deflection values of GFRP reinforced concrete beams without work crack is less than that of beams with work crack under any erosion environment condition. The maximum bond stress for GFRP reinforced concrete beams without work crack is bigger than that of beams with work crack, and the loss ratio is less than beams with work crack. Among the three enviroments, alkaline environment can obviously deteriorate the bond performance of GFRP reinforced concrete beam, and the environmental impact is largely intensified by work crack on the bond performance of GFRP reinforced concrete beams in the worse way. 3 tabs, 11 figs, 25 refs.

Key words: structural engineering; GFRP bar; concrete beam; durability; bond performance; work crack

0 引 言

国内外对 GFRP 筋混凝土的试验研究及工程应用始于 20 世纪 60 年代,并编制了相关规范。第 1 研究阶段主要以 GFRP 筋的力学性能为主;第 2 研究阶段主要以加固混凝土结构及钢结构的研究为主;第 3 研究阶段主要以 GFRP 加固混凝土结构的耐久性能为主^[1-9]。

由于实际混凝土结构在长期工作状态下不但承受持续荷载,而且在非预应力时常同时带裂缝工作。而目前国内外研究成果较少涉及承受持续应力同时带裂缝工作的 GFRP 筋混凝土梁性能的研究。考虑工作裂缝对受持续荷载与侵蚀溶液耦合作用下的 GFRP 筋混凝土梁的粘结性能、抗拉强度的影响,更为贴近 GFRP 筋混凝土梁的实际工作状态,因此带工作裂缝的 GFRP 筋混凝土梁在承受持续荷载的前提下,其耐久性问题是该学科研究的发展趋势。Jia 等采用带裂缝 GFRP 筋混凝土梁持续受 25% 的极限荷载,并置于 4 种不同环境作用下研究其耐久性能^[10];Bakis 等选择对带裂缝 GFRP 筋混凝土梁在不同环境下的粘结滑移变化及有效粘结长度进行了耐久性研究^[11];何雄君等对带裂缝 GFRP 筋混凝土梁的长期抗拉强度进行了大量试验研究,研究结果进一步表明,工作裂缝对 GFRP 筋混凝土梁长期性能变化具有不可忽略的影响^[12-15]。

鉴于此,本文从 GFRP 筋混凝土梁承受持续荷载并带裂缝工作的实际状态出发,进行加速老化耐久性能试验研究,并提供有关粘结应力的理论计算方法,为 GFRP 筋混凝土梁实际工程应用提供更准确、更具体的指导规范。

1 试验设计

1.1 试件制作

试验采用南京锋辉复合材料有限公司提供的螺旋状 GFRP 筋(图 1),筋材半径 $r=3.5\text{ mm}$,每段螺旋长度 $L=14\text{ mm}$,高 $h=0.325\text{ mm}$,GFRP 筋相关力学参数由抗拉试验确定(表 1)。依据规范 ACI 440.3R-04,抗拉试验由微机控制电液伺服万能试验机 SHT4106-G 控制,GFRP 筋两端各采用特制钢锚管锚固,防止 GFRP 筋材两端发生剪切破坏。

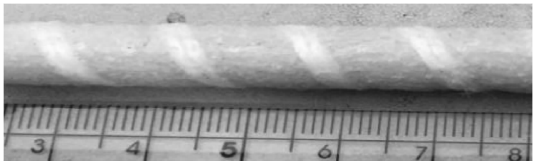


图 1 GFRP 筋

Fig. 1 GFRP bar

表 1 GFRP 筋的力学参数

Tab. 1 Mechanical properties of GFRP bar

直径/mm	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	极限抗 拉力/kN	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa
10	2.2	72	980	42

研究 GFRP 筋混凝土结构耐久性能的典型试验方法分别为 GFRP 筋直接浸泡于侵蚀溶液中与 GFRP 筋置于混凝土结构中,前期研究者们较多采用 GFRP 筋直接浸泡的方法,但经过许多研究者同时对 GFRP 筋浸泡于碱性溶液与 GFRP 筋置于混凝土梁中的试验结果进行对比发现,GFRP 筋直接浸泡于碱性溶液中的试验结果并不能说明 GFRP 筋置于混凝土结构中的真实反应,而是扩大了环境对 GFRP 筋的劣化影响,也忽略了混凝土结构对

GFRP 筋的保护作用^[16-19]。因此,有必要将 GFRP 筋置于真实混凝土结构中进行试验研究。本文根据《混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011),选用 C30 混凝土制作矩形截面混凝土梁(b (宽度) $\times h$ (高度) $\times l$ (长度)=80 mm \times 110 mm \times 1 100 mm)。为突出工作裂缝与环境因素对 GFRP 筋混凝土梁粘结耐久性能的影响,试验中仅在离混凝土梁底部 30 mm 处布置单根 GFRP 筋纵筋,以排除 GFRP 筋与混凝土梁粘结耐久性能的其他干扰因素,如箍筋直径大小、间距等剪切影响。

1.2 工作裂缝与持续荷载

试验采用自制反力架对 GFRP 筋混凝土梁试件进行预裂处理及施加持续荷载。自制反力架装置如图 2 所示,由钢板、螺母与弹簧组成,钢板距梁端部 50 mm,两端弹簧距钢板分别为 250 mm,钢板与底部螺母作为固定端,通过控制钢螺旋弹簧的压缩量实现对梁施加不同水平的荷载,钢螺旋弹簧的弹簧系数 $k=40$ N/mm。耐久性试验前采用自制反力架对 1 组 GFRP 筋混凝土梁进行四点弯曲破坏试验,并确定梁的极限荷载平均值为 1 000 kN。



图 2 试件预裂持续荷载装置

Fig. 2 Pre-splitting sustained loading device of specimen

对所有试验梁进行以下处理(图 3):

(1)GFRP 筋配置于混凝土梁内,每种工况留 1 对梁不预裂,以作参照,其余在达到预定龄期后进行四点试验预裂(预裂标准采用预裂弯矩控制,基于 ACI 440.1 R—06 规范确定为极限荷载的 50%^[20])。采用自制反力架对混凝土梁进行预裂加载,施加预裂弯矩,使其产生稳定裂缝。

(2)模拟混凝土梁持续受载工作状态,梁产生稳

定裂缝后将持续弯矩减小为极限承载力的 20%,持续荷载应避免混凝土梁的蠕变断裂^[21]。周期性地监测钢螺旋弹簧的压缩,使中跨部分持续弯矩在规定的误差范围内。

1.3 试验环境

受持续荷载 GFRP 筋混凝土梁同时置于室外、水、碱溶液 3 种环境中,以研究工作裂缝在不同环境与持续荷载耦合作用下对 GFRP 筋混凝土梁粘结耐久性的影响规律。

其中室外环境指将 GFRP 筋混凝土梁直接暴露于室外,室外场地为武汉理工大学实验室露天阳台,试验经历 1 个夏季与 1 个冬季,由中国气候网站可知,武汉年平均温度为 16.4 ℃,年最高温度为 42 ℃,年最低温度为 -3 ℃,年均降雨量为 1.30 m。水环境指未放入其他侵蚀介质的自来水,环境温度设置为(23 \pm 3) ℃;碱性溶液按照 ACI 440.3R—04 规范的规定进行配置,采用实测 pH 值为 13.5 的 NaOH 溶液,温度设置为 60 ℃。试验周期分别设置为 90、180、270 d。



图 3 试件处理

Fig. 3 Specimens processing

1.4 试件编号

为达到对比分析的目的,每种环境下试件分为预裂处理与非预裂处理 2 种工况,考虑到数据的离散性,每组试件制备 4 根梁以确保数据的可靠性。各试验工况及试验梁的编号如表 2 所示。

表 2 试验工况
Tab. 2 Test conditions

环境类型	工况	相应工况表示	对应梁编号	浸泡时间/d
室外	预裂+持续荷载	OPS	1~4 #、25~28 #、49~52 #	270、180、90
室外	持续荷载	OS	5~8 #、29~32 #、53~56 #	270、180、90
水溶液	预裂+持续荷载	WPS	9~12 #、33~36 #、57~60 #	270、180、90
水溶液	持续荷载	WS	13~16 #、37~40 #、61~64 #	270、180、90
碱性溶液	预裂+持续荷载	APS	17~20 #、40~44 #、65~68 #	270、180、90
碱性溶液	持续荷载	AS	21~24 #、45~48 #、69~72 #	270、180、90

1.5 粘结性能试验方案

试验采用三点弯曲方法,与传统拉拔粘结性能试验相比,考虑了实际构件存在的剪力或弯矩状况,更为贴近 GFRP 筋混凝土梁的实际受力形式。为消除与粘结滑移相关的其他不确定性因素,试验梁内部仅布置 1 根受力 GFRP 筋。试验过程中采用反力架及液压千斤顶对 GFRP 筋混凝土梁进行加载,依据文献[11]关于三点弯曲最佳锚固长度试验研究结果,本试验锚固段为 250 mm,即荷载 P 施加位置与梁端距离为 250 mm,试验装置布置如图 4 所示。

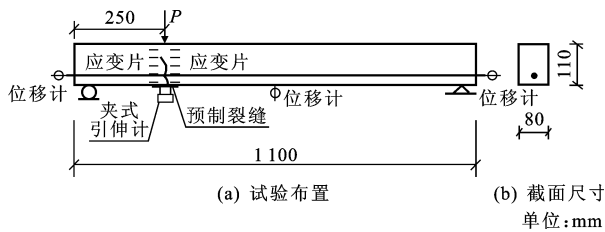


图 4 三点弯曲试验
Fig. 4 Three-point flexure test

2 试验结果

由于带裂缝的 GFRP 筋混凝土梁受力时在预裂处会产生一定的张力,GFRP 筋可抵抗该张力,因此高应变即发生在 GFRP 筋混凝土梁预裂处。继续施加荷载,高应变不断地向 GFRP 筋粘结端蔓延,直至 GFRP 筋发生粘结破坏。

2.1 破坏形态及裂缝发展状况

三点弯曲试验结果显示:各种环境作用下 GFRP 筋混凝土梁裂缝走势基本符合剪压破坏形式,呈现出剪压破坏特征,图 5 为 GFRP 筋混凝土梁的裂缝发展情况。



图 5 GFRP 筋混凝土梁裂缝发展
Fig. 5 Fracture development of GFRP reinforced concrete beams

(1)非预裂状况下:荷载施加前期,基本未见裂缝;荷载施加到 3~4 kN 时,裂缝开始显现并随着

荷载的施加不断延伸。

(2)预裂状况下:荷载施加初期,预裂裂缝随着荷载的施加开始延伸,并未出现其他裂缝;荷载施加到 2~3 kN 时,梁底部开始出现纵向裂缝,预裂荷载较非预裂工况下提前 30%~50%。

2 种状况下主裂缝出现时间不同,即开裂荷载不同,预裂状况下主裂缝较早出现,但主裂缝总是发生在受荷载点位置;当主裂缝形成时,梁体还能继续承载,荷载主要由剪切区混凝土和主筋共同承担。

2.2 滑移荷载

假定筋纵向发生偏离,则在有效粘结区域前达到的最大荷载定义为滑移荷载,其荷载小于筋的极限强度,本文中纵向粘结区域为加载端至梁端部,即 250 mm 长的锚固段区域。当梁发生剪压破坏时,可接近极限值,与 Freimanis 拉拔试验研究结果对比发现,除未考虑持续荷载、恶劣环境或粘结剂使用环氧树脂的情况外,10.2 mm 直径的 GFRP 拉拔试验中,对应的锚固长度分别为 24、48、95、143 mm,滑移荷载分别为 0.82、1.8、12.2、14.4 kN。同样在未考虑环境影响的情况下,本试验得出的自由端滑移比拉拔试验值更大。

图 6 给出了各工况状态下经过 90、180、270 d 腐蚀后滑移荷载的保留率,图中曲线斜率不一致说明 2 种工况下的劣化程度不同,且斜率越大表明对 GFRP 筋混凝土梁的劣化作用越明显。由图 6 可见:①同种环境下,预裂 GFRP 筋混凝土梁的滑移荷载损失更大,比非预裂梁平均损失高出 11.5%;②不同环境侵蚀过程中,碱的影响较为突出;③碱性环境与工作裂缝共同作用下,梁滑移荷载保留率最高损失可达 38.5%。

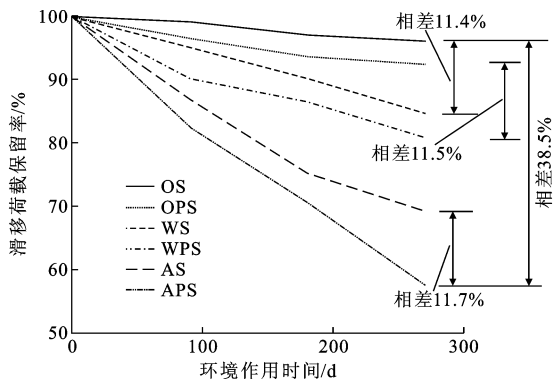


图 6 各工况作用下滑移荷载保留率
Fig. 6 Retention rate of load after slip under each condition

2.3 挠度值

从能量守恒原理可知,梁挠度与裂缝扩展的能

量主要由外力功提供,变形差值越小,裂缝扩展能量可能越大,该差值解释了预裂与非预裂梁在碱溶液环境下的内部能量分布。

图 7 为不同工况混凝土梁受荷载 7.5 kN 时的挠度与作用时间的关系,结果表明:①同种环境下,预裂梁挠度明显大于非预裂梁;②水溶液与室外环境下,GFRP 筋混凝土梁的挠度值相差较小;③碱性环境作用下梁变形挠度较室外环境增大 46.3%。由此可见,碱性环境对梁挠度变形影响最为明显,而预裂则加速了各种环境对梁挠度变形的影响。

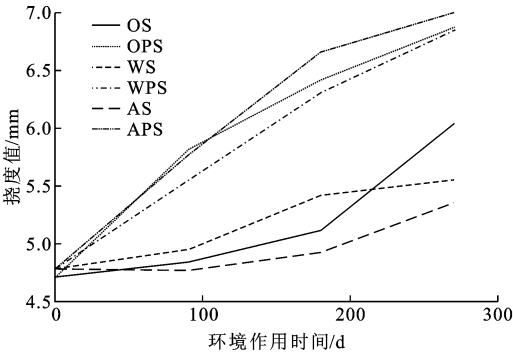


图 7 7.5 kN 荷载作用下的挠度值

Fig. 7 Deflection values under 7.5 kN load

2.4 荷载-滑移曲线

由于三点弯曲试验无法对 GFRP 筋与混凝土梁之间的实际滑移量进行直接测量,因此试验采用 GFRP 筋混凝土梁弯曲主裂缝宽度 W 计算梁的粘结滑移量 S

$$S=\frac{W}{2} \tag{1}$$

在以下 2 种情况范围内,可利用式(1)计算粘结滑移:①梁受剪区域裂缝未对主裂缝扩展产生干预;②自由端未产生滑移。

图 8 为腐蚀 270 d 后各工况下的试验荷载-滑移散点及相应的拟合曲线。反映了碱溶液、水溶液、室外环境中预裂处理对 GFRP 筋混凝土梁粘结性能的影响。非预裂状况下水溶液、碱性环境中 GFRP 筋混凝土梁施加荷载达一定值时,位移变化较之前更缓慢;预裂状况下水溶液、碱性环境中 GFRP 筋混凝土梁的位移基本呈现出随荷载增大而不断增大的趋势。

综上所述,碱溶液较水溶液、室外环境对梁粘结性能有更明显的劣化影响,而预裂处理后会加剧碱性溶液对 GFRP 筋混凝土梁粘结性能的影响。

3 粘结应力确定

GFRP 筋与混凝土之间的粘结应力无法通过试

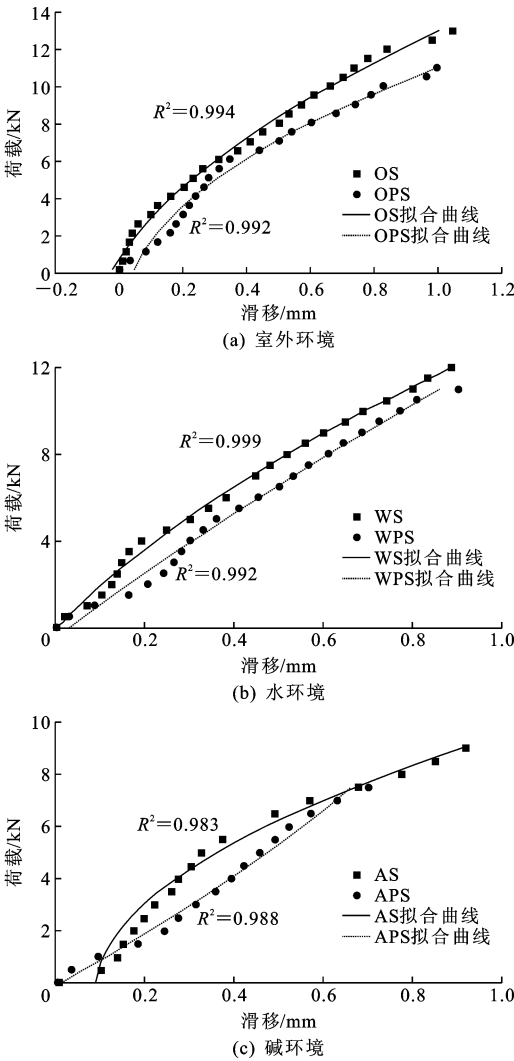


图 8 荷载-滑移散点及拟合曲线

Fig. 8 Load-slip scatter and fitted curves

验方法直接测量,传统假定平均应力不变的计算方法与粘结应力随两者间滑移的改变而改变的实际情况有所出入。本文粘结应力计算理论可显示不同滑移量对应的粘结应力的变化,并结合试验数据确定各工况作用 270 d 后的最大粘结应力。

大部分试验数据显示,随着梁的纵向开裂,裂缝将产生一定的滑移量^[22]。Nanni 等简化了径向界面应力引起的滑移量的计算方法^[23]。

当 $0 \leq S \leq l/2$,混凝土表面体积变化可等效于圆柱体半径变化 Δr ,并确定界面应力 σ_r

$$\Delta r=\frac{h}{l^2} S(l-S) \tag{2}$$

$$\sigma_r=1\,000 K \frac{\Delta r}{r} E_b \tag{3}$$

式中: h 、 l 分别为梁的高度和长度; K 为影响因子; r 为 GFRP 筋半径; $E_b=42\text{ GPa}$,为筋弹性模量。

影响因子 K 基于混凝土变形层径向直径变化

等于界面高度变化的假设,可得

$$K=1-\frac{E_b}{E_c} \tag{4}$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量。

当构件分裂裂缝延伸到整个界面时,所对应的径向界面应力作为临界应力 σ_{rmax} 考虑

$$\sigma_{rmax}=4.25f_{ct} \tag{5}$$

式中: f_{ct} 为混凝土梁抗拉强度^[24]。

根据混凝土抗压强度 f'_c 可估算每根梁的抗拉强度

$$f_{ct}=0.26f'_c{}^{0.73} \tag{6}$$

联立式(2)~式(6),可计算出相应的径向应力及最大径向应力所对应的滑移量 S_{max} ,解决了求滑移量时二次方程得到 2 个根而无法确定真值的问题。

1983 年,Eligehausen 等得出了 mBEP 模式的粘结滑移关系(图 9)^[25];2007 年,Bakis 等依据 mBEP 模型得到局部最大粘结应力 τ_{max} 、滑移荷载 N_s ^[11]

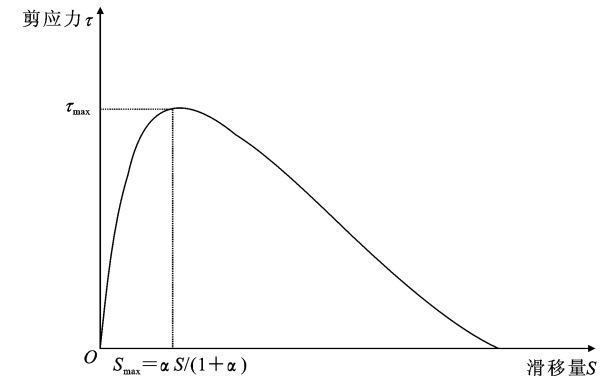


图 9 粘结-滑移关系的 mBEP 模型

Fig. 9 mBEP model of bond slip relationship

$$\tau_{max}=C\left(\frac{\alpha S}{1+\alpha}\right)^{\alpha}\frac{1}{1+\alpha} \tag{7}$$

$$N_s=\sqrt{2E_bA_b\pi dC\frac{S^{(1+\alpha)}}{(1+\alpha)(2+\alpha)}} \tag{8}$$

式中: C 、 α 为系数; A_b 为 GFRP 筋的截面面积; d 为 GFRP 筋的直径。

依据 270 d 不同环境条件下荷载滑移关系,确定相应的荷载及最终滑移量,并根据粘结滑移关系中滑移量 S 与 S_{max} 之间关系(图 10),可确定系数 α ,由式(8)可进一步确定系数 C 。表 3 为 GFRP 筋混凝土梁不同工况作用下粘结滑移曲线参数。

为验证模型的正确性及通用性,将得到的粘结模型参数代入式(8)可预测滑移荷载值,并与试验值进行比较分析。由图10可见预测值与试验值较为吻

合,拟合直线的判定系数 R^2 达到 0.985 53,因此可根据表 3 中的粘结参数,并利用式(7)确定腐蚀 270 d 后各种工况下的最大粘结应力 τ_{max} ,并比较碱性溶液、水溶液、室外环境情况下带工作裂缝与未带工作裂缝时,GFRP 筋与混凝土之间最大粘结应力的变化。

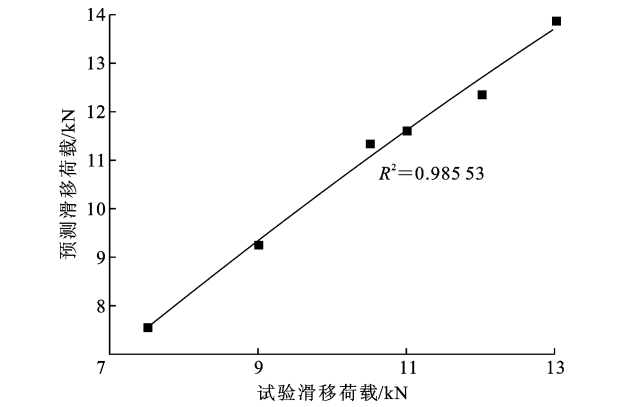


图 10 模型预测与试验值对比

Fig. 10 Comparison on model prediction and experimental values

表 3 各工况粘结滑移参数

Tab. 3 Bond-slip parameters under different working conditions

滑移参数	OPS	OS	WPS	WS	APS	AS
α	0.470	0.477	0.486	0.434	0.510	0.490
C	2.240	1.960	2.390	1.710	1.765	1.080
S	1.040	0.997	0.886	0.901	0.918	0.701

图 11 为各工况粘结应力值,对比分析可知,碱性溶液对最大粘结应力影响最大;同种环境下,预裂使 GFRP 筋混凝土梁的 τ_{max} 损失更大,预裂状况下碱性环境作用后,GFRP 筋混凝土梁 τ_{max} 损失高达 59.4%。粘结应力的大小直接表征了 GFRP 筋混凝土梁粘结耐久性的强弱,可见工作裂缝对 GFRP 筋混凝土梁的粘结耐久性能存在劣化影响。

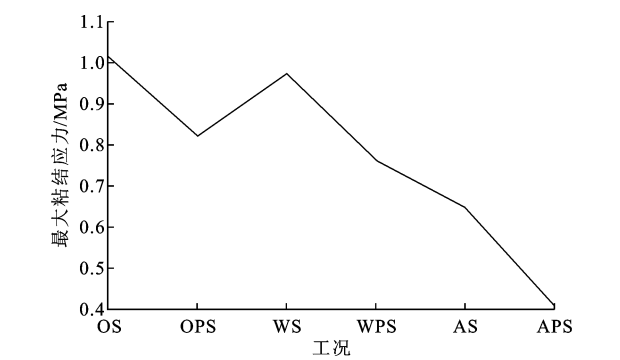


图 11 各工况最大粘结应力

Fig. 11 Maximum bond stresses under different working conditions

4 结 语

(1)碱性环境较室外环境、水溶液环境对 GFRP 筋混凝土梁的开裂荷载、滑移荷载、变形挠度及滑移劣化影响更大,且随作用时间的增加而增大。

(2)同种环境作用下,工作裂缝对 GFRP 筋混凝土梁开裂荷载、滑移荷载、变形挠度及滑移的劣化具有不同程度的影响,其中滑移荷载、挠度值最高损失可达 40%左右。

(3)根据粘结应力计算理论及试验数据,确定粘结滑移参数并计算各工况作用 270 d 后得到的最大粘结应力可知,带工作裂缝的条件下,各 GFRP 筋混凝土梁粘结应力出现不同程度的损失。其中碱性环境作用 270 d 后,带工作裂缝 GFRP 筋混凝土梁的粘结应力损失高达 59.4%。

(4)工作裂缝较大程度地加大了各种环境对 GFRP 筋混凝土梁粘结耐久性能的影响。

(5)为进一步提出 GFRP 筋混凝土结构裂缝宽度规范的理论指导意见,下一步研究可采用初始工作裂缝宽度作为衡量标准,研究不同工作裂缝宽度对 GFRP 筋混凝土结构耐久性能的影响规律,最终建立 GFRP 筋混凝土结构的允许裂缝值。

参考文献:

References:

- [1] SAYED M S, EL-KARMOUTY H Z, ABD-ELHAMID G D. Structural performance of circular columns confined by recycled GFRP stirrups and exposed to severe conditions[J]. HBRC Journal, 2012, 8(2): 107-114.
- [2] ZHOU J K, CHEN X D, CHEN S X. Durability and service life prediction of GFRP bars embedded in concrete under acid environment[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(10): 4095-4102.
- [3] 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(1): 274-284.
- [4] 付 凯, 薛伟辰. 模拟混凝土环境下 GFRP 筋抗压性能加速老化试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 17(1): 35-41.
FU Kai, XUE Wei-chen. Accelerated aging tests for evaluations of tensile properties of GFRP bars under artificial seawater environment[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 25-41. (in Chinese)
- [5] ALSAYED S, AL-SALLOUM Y, ALMUSALLAM T, et al. Performance of glass fiber reinforced polymer bars under elevated temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(5): 2265-2271.
- [6] 张晓亮, 屈文俊. 无腹筋 GFRP 筋混凝土梁抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 51-57.
ZHANG Xiao-liang, QU Wen-jun. Shear behavior test of GFRP-reinforced concrete beams without stirrups[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 51-57. (in Chinese)
- [7] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2014 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 1-96. (in Chinese)
- [8] 孙 丽, 王世光, 侯 娜, 等. GFRP 筋混凝土短柱偏压性能试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4): 23-28.
SUN Li, WANG Shi-guang, HOU Na, et al. Experiment research on mechanical behavior of eccentrically loaded short concrete column reinforced with GFRP bars[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 23-28. (in Chinese)
- [9] 王 丹, 郭志昆, 邵 飞, 等. 混杂纤维布加固轻骨料混凝土梁的试验研究[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36(2): 52-58.
WANG Dan, GUO Zhi-kun, SHAO Fei, et al. Experimental study on LC beams strengthened with hybrid fiber sheet[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(2): 52-58. (in Chinese)
- [10] JIA J H, BOOTHBY T E, BAKIS C E, et al. Durability evaluation of glass fiber reinforced-polymer-concrete bonded interfaces[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(4): 348-359.
- [11] BAKIS C E, BOOTHBY T E, JIA J H. Bond durability of glass fiber-reinforced polymer bars embedded in concrete beams[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(3): 269-278.
- [12] HE X J, YANG J N, BAKIS C E. Tensile strength characteristics of GFRP bars in concrete beams with work cracks under sustained loading and severe environments[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Material Science Edition, 2013, 28(5): 934-937.
- [13] 代 力, 何雄君, 杨文瑞, 等. 考虑初始裂缝的 GFRP

- 筋混凝土梁受弯性能试验[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(9): 85-89.
- DAI Li, HE Xiong-jun, YANG Wen-rui, et al. Experimental study on flexural behavior of concrete beams embedded with GFRP bar with initial crack[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(9): 85-89. (in Chinese)
- [14] YANG W R, HE X J, DAI L. Shear performance of GFRP bars embedded in concrete beams with crack in different environments[C]//FRPRCS-12. The 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures. Nanjing: FRPRCS-12, 2015: 14-16.
- [15] YANG W R, HE X J, DAI L, et al. Fracture performance of GFRP bars embedded in concrete beams with cracks in an alkaline environment [J]. Journal of Composites for Construction, 2016(4): 1-9.
- [16] KARBLIARI V M, CHU W. Degradation kinetics of pultruded e-glass/vinylester in alkaline media [J]. ACI Materials Journal, 2005, 102(1): 34-41.
- [17] 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(1): 101-111.
- [18] 孙 璨, 丘文浩, 曾宪彬, 等. 不同环境条件下 GFRP 筋长期力学性能实验对比研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(8): 88-91.
- SUN Can, QIU Wen-hao, ZENG Xian-bin, et al. Experimental research on long-term mechanical behavior of GFRP bars in different environmental conditions[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(8): 88-91. (in Chinese)
- [19] DEJKE V. Durability of FRP reinforcement in concrete[D]. Chalmers: Chalmers University of Technology, 2001.
- [20] ACI 440. 1R-06, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars[S].
- [21] ACI 440. 3R-04, Guide test methods for fiber-reinforced polymers FRP for reinforcing or strengthening concrete structures[S].
- [22] FREIMANIS A J. Tensile and bond behavior of FRP reinforcement rods[D]. Central County: The Pennsylvania State University, 1997.
- [23] NANNI A, LIU J. Modeling of bond behavior of hybrid rods for concrete reinforcement[J]. Structural Engineering Mechanics, 1997, 5(4): 355-368.
- [24] CARINO N J, LEW H S. Re-examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete[J]. ACI Journal, 1982, 79(3): 214-218.
- [25] ELIGEHAUSEN R, POPOV E P, BERTERO V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations[C]//Technical Chamber of Greece. Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering. Athens: Technical Chamber of Greece, 1982: 69-80.
- ~~~~~
- (上接第 21 页)
- SHA Ai-min, WANG Zhen-jun. Microstructure of mastics-aggregate interface in cement emulsified asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 1-6. (in Chinese)
- [18] 梅塔 P K, 蒙特罗 P J M. 混凝土微观结构、性能和材料[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- MEHTA P K, MONTEIRO P J M. Concrete microstructure, properties and materials [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese)
- [19] 王振军, 沙爱民. 水泥乳化沥青复合胶浆微观结构特征[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(3): 11-14.
- WANG Zhen-jun, SHA Ai-min. Microstructure characters of cement emulsified asphalt composite mastics[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 11-14. (in Chinese)
- [20] 王发洲, 刘云鹏, 胡曙光. 硅酸盐水泥与阳离子乳化沥青颗粒的相互作用机理[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(2): 186-190.
- WANG Fa-zhou, LIU Yun-peng, HU Shu-guang. Interaction mechanism between Portland cement and cationic asphalt emulsion droplets[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2013, 31(2): 186-190. (in Chinese)
- [21] 王振军, 杜少文, 肖晶晶, 等. 水泥乳化沥青混合料性能的影响因素[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4): 497-501, 511.
- WANG Zhen-jun, DU Shao-wen, XIAO Jing-jing, et al. Influence factors on properties of cement asphalt emulsion mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4): 497-501, 511. (in Chinese)