

DOI:10.11918/202211109

PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结性能试验分析

武芳文¹,段钧淇¹,何岚清¹,梅韵歌¹,卞正容¹,张智举^{1,3},刘来君¹,杨 飞²

(1. 长安大学 公路学院,西安 710064;2. 长安大学 建筑工程学院,西安 710061;
3. 中铁工程设计咨询集团郑州设计院,郑州 450000)

摘 要: 为研究聚乙烯醇纤维增强工程水泥基复合材料 (polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites, PVA-ECC) 与玄武岩纤维增强复材筋 (basalt fiber reinforced polymer bars, BFRP 筋) 的黏结性能,以 BFRP 筋表面形式 (缠绕带肋、喷砂缠绕带肋)、锚固长度 ($5d$, $7d$, $9d$)、直径 (8、10、12 mm)、PVA-ECC 保护层厚度 (70、25、15、5 mm) 和 PVA-ECC 强度 (C50、C80) 为参数,设计制作 28 个 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结锚固试件进行拔出试验。通过观察和分析各试件的破坏形态、黏结强度和黏结滑移曲线,探究了各因素对 PVA-ECC 和 BFRP 筋的黏结性能的影响规律。最后,通过分析已有本构模型的适用性,根据试验结果建立了 BFRP 筋与 PVA-ECC 的黏结滑移本构模型。研究结果表明:较小保护层厚度 (5 mm) 的试件容易发生劈裂破坏,且黏结强度仅为正常试件的 39.59%;BFRP 筋表面喷砂可提高最大平均黏结应力;随着锚固长度的降低,BFRP 筋与 PVA-ECC 黏结强度逐渐提高;增大筋材直径的同时保证相对肋高不变可以避免 BFRP 筋直径增大对黏结性能带来的不利影响;当 PVA-ECC 强度从 50.5 MPa 提高至 81.3 MPa 时,黏结强度提高了 45.53%。避免 BFRP 筋较小的保护层厚度,或增加 BFRP 筋直径的同时保证相对肋高不变可以保证 PVA-ECC 与 BFRP 筋有足够的黏结强度。

关键词: 聚乙烯醇纤维增强工程水泥基复合材料;玄武岩纤维增强复材筋;拔出试验;黏结性能;本构模型

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)07-0070-10

Experimental analysis on bond properties of PVA-ECC and BFRP bars

WU Fangwen¹, DUAN Junqi¹, HE Lanqing¹, MEI Yunge¹, BIAN Zhengrong¹,
ZHANG Zhiju^{1,3}, LIU Laijun¹, YANG Fei²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To investigate the bond properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites (PVA-ECC) and basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars, the surface form of BFRP bars (wrapped ribbed, sandblasted wrapped ribbed), anchorage length ($5d$, $7d$, $9d$), diameter (8, 10, 12 mm), thickness of PVA-ECC protective layer (70, 25, 15, 5 mm) and PVA-ECC strength (C50, C80) are taken as parameters, and 28 bond anchorage specimens of PVA-ECC and BFRP bars were designed and manufactured by pull-out test. By observing and analyzing the failure mode, bond strength and bond-slip curve of each specimen, the influence of various factors on the bond performance of PVA-ECC and BFRP bars were explored. Finally, by analyzing the applicability of the existing constitutive model, the bond-slip constitutive model of BFRP bars and PVA-ECC were established with reference to the test results. The results show that the specimens with smaller protective layer thickness (5 mm) are prone to fracture failure, and the bond strength is only 39.59% of that of normal specimens. Sandblasting on the surface of BFRP bars could increase the maximum average bond stress. With the decrease of anchorage length, the bond strength between BFRP bars and PVA-ECC increase gradually. Keeping the relative rib height unchanged while increasing the diameter of BFRP bars could avoid the negative effects of increasing the diameter of BFRP bars on the bond properties. When the strength of PVA-ECC increases from 50.5 MPa to 81.3 MPa, the bond strength increases by 45.53%. Avoiding the smaller protective layer thickness of BFRP bars or increasing the diameter of BFRP bars while keeping the relative rib height unchanged could ensure that PVA-ECC and BFRP bars exhibit sufficient bond strength.

Keywords: polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites; basalt fiber reinforced polymer bars; pull-out test; bond properties; constitutive model

收稿日期: 2022-11-30; 录用日期: 2022-12-25; 网络首发日期: 2023-02-23

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230222.1725.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2601000); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2022JZ-32); 中央高校基本科研业务费资金(300102212212)

作者简介: 武芳文(1980—),男,副教授,博士生导师

通信作者: 杨 飞, f.yang@chd.edu.cn

钢筋混凝土结构经常带裂缝工作,导致混凝土内部钢筋更加容易遭受锈蚀,从而影响结构的耐久性和安全性^[1-2]。纤维增强复材筋(fiber reinforced polymer bars, FRP 筋)具有轻质、高强、耐腐蚀和易加工等优点,因此,FRP 筋被普遍认为可以代替普通钢筋服役^[3-4]。另外,鉴于玄武岩纤维增强复材筋(basalt fiber reinforced polymer bars, BFRP 筋)与其他 FRP 筋相比更加环保且制作成本低,BFRP 筋已逐渐成为其他种类 FRP 筋的替代品^[5-6]。BFRP 筋的弹性模量较低,其配筋结构在服役时平均裂缝宽度远大于普通钢筋混凝土,同时 BFRP 筋的本构关系为线弹性,没有屈服点,导致 BFRP 筋增强混凝土梁呈现脆性破坏的特征,缺少安全性能^[7]。因此,有必要采用高延性的混凝土改善 FRP 筋混凝土结构的脆性特性。

聚乙烯醇纤维增强工程水泥基复合材料(polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites, PVA-ECC)具有高延性、多裂缝发展特性和微小裂缝宽度优点^[8]。PVA-ECC 代替普通混凝土可以有效弥补 BFRP 筋与混凝土复合结构裂缝多且宽度大的缺陷。鉴于 PVA-ECC 多裂缝发展和 BFRP 筋抗拉强度高特性,采用 PVA-ECC 与 BFRP 筋复合结构,可以将两种材料的优势互补,解决传统钢筋混凝土结构易开裂且耐久性差的缺陷,同时可以提高结构的延性,提高结构抗震性能^[9]。工程结构中,为保证 PVA-ECC 与 BFRP 筋之间协同工作,两者之间必需有足够的黏结强度。若 PVA-ECC 与 BFRP 筋的黏结强度不足,则结构将缺乏足够的承载力,影响结构安全性。因此,研究 PVA-ECC 与 BFRP 筋之间的黏结性能尤为重要。

FRP 筋与 PVA-ECC 黏结滑移性能不同于钢筋与普通混凝土,不少学者对 FRP 筋与 ECC 的黏结性能开展了研究。Zhao 等^[10]研究了 ECC 与玻璃纤维增强复材筋(glass fiber reinforced polymer bars, GFRP 筋)、碳纤维增强复材筋(carbon fiber reinforced polymer bars, CFRP 筋)和普通钢筋的黏结

性能,结果表明,黏结强度与 ECC 强度成比例增加,高肋钢筋比低肋钢筋表现出更高的黏结强度。吴丽丽等^[11]研究了 GFRP 筋与 ECC 的黏结性能,结果表明,增加 GFRP 筋表面复杂程度,或增加 ECC 的强度、基体保护层厚度,有助于提高两者的黏结强度。Li 等^[12]在加固钢筋混凝土梁试验研究中发现,与 BFRP 筋增强聚合物砂浆加固梁相比,BFRP 筋增强 ECC 基体加固梁具有更高的屈服强度和极限荷载。Hossain 等^[13]通过 GFRP 筋与 ECC 和普通混凝土拔出试验研究发现,ECC 黏结强度高于普通混凝土,高弹性模量 GFRP 筋黏结强度低于低弹性模量 GFRP 筋。

综上,PVA-ECC 与 FRP 筋结构相比传统钢筋混凝土结构具有非常显著的优势,但是目前关于 PVA-ECC 与 FRP 筋的黏结性能研究多集中于其他 FRP 筋。因此,需要进一步研究 PVA-ECC 与 BFRP 筋之间的黏结性能和黏结滑移本构模型。本文考虑 BFRP 筋表面形式、直径、锚固长度和 PVA-ECC 保护层厚度、强度 5 个因素,制作了 28 个 PVA-ECC 与 BFRP 筋的黏结锚固试件进行拔出试验,分析其破坏形态和破坏特征,揭示 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结破坏机理,探讨各因素对 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结性能影响规律,建立 PVA-ECC 与 BFRP 筋的黏结滑移本构模型。

1 试 验

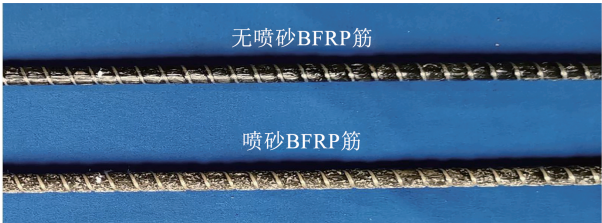
1.1 试验材料

1.1.1 BFRP 筋

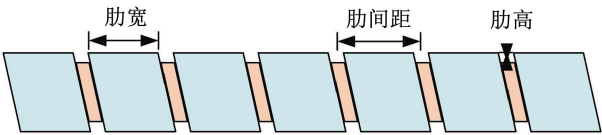
试验采用的 BFRP 筋由树脂和玄武岩纤维通过拉挤成型工艺制成,且喷砂 BFRP 筋经过人工表面喷砂处理,具体 BFRP 筋参数及实测力学性能见表 1。其中,BFRP 筋直径包括肋高,B 表示缠绕带肋 BFRP 筋,BS 表示喷砂缠绕带肋 BFRP 筋。BFRP 筋表面形式如图 1 所示,无喷砂 BFRP 筋表面光滑,喷砂 BFRP 筋表面粗糙,不同直径筋材的肋高有所不同,但相对肋高(肋高/直径)均约为 6.7%。

表 1 BFRP 筋的物理力学性能参数
Tab. 1 Physical and mechanical properties of BFRP bars

表面形式	直径/mm	肋宽/mm	肋间距/mm	肋高/mm	相对肋高/%	极限拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa
B	8	8	9.5	0.54	6.75	1 348	49.3
B	10	8	9.5	0.67	6.70	921	45.2
B	12	8	9.5	0.80	6.67	953	44.3
BS	10	8	9.5	0.67	6.70	963	53.9



(a) 无喷砂及喷砂BFRP筋



(b) 筋肋参数

图 1 BFRP 筋表面特性

Fig. 1 Surface characteristics of BFRP bars

1.1.2 PVA-ECC 材料

本试验采用的 PVA-ECC 强度等级为 C50 和 C80,配合比见表 2,两种强度的 PVA-ECC 均采用聚乙烯醇纤维,且纤维体积率均为 2%。按照 JC/T 2461—2018《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》^[14]进行了 PVA-ECC 的单轴拉伸试验和立方体抗压试验。PVA-ECC 拉伸强度超过了 4.5 MPa,极限拉伸应变超过 3%。两种类型 PVA-ECC 的实测抗压强度为 50.5 MPa 和 81.7 MPa。

表 2 PVA-ECC 配合比

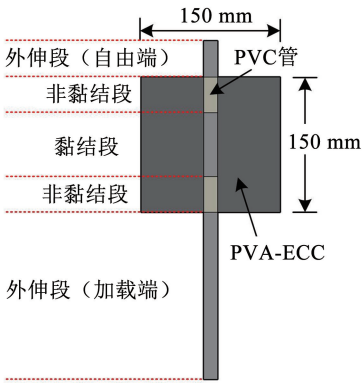
Tab. 2 PVA-ECC Mixture proportions (kg·m⁻³)

型号	水泥	粉煤灰	硅灰	外加剂	减水剂	石英砂	水
C50	600	600	100	20	2.0	678	400
C80	600	500	200	20	3.0	677	360

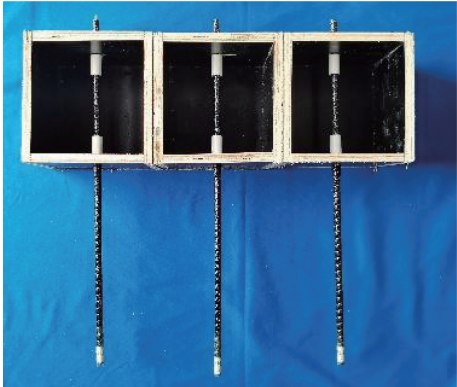
1.2 试件设计与制作

为探究 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结性能的影响因素,设置锚固长度(5*d*、7*d*、9*d*,*d* 表示筋材直径)、直径(8、10、12 mm)及 PVA-ECC 强度(C50、C80)、保护层厚度(70、25、15、5 mm)为变量,对 28 个 PVA-ECC 与 BFRP 筋拔出试件开展试验。试验参考《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[15]和 ACI 440.3R-04 规范^[16],采用边长为 150 mm 的单向拔出立方体试件。根据锚固长度的不同,将 BFRP 筋截取为 500 mm 并划分成黏结段、非黏结段、外伸段。锚固长度即筋材在 PVA-ECC 中黏结段的长度。其中,非黏结段 BFRP 筋表面缠绕胶布并套上 PVC 管,防止 PVA-ECC 浆体进入 PVC 管中产生黏结应力影响试验结果。由于 BFRP 筋属于各向异性材料,抗剪强度低,因此,在 BFRP 筋外

伸段套上无缝钢管,采用环氧树脂填充使二者黏结可靠,避免试验机夹具对 BFRP 筋端部造成剪切破坏,影响试验结果。此外,为了方便养护脱模,试件采用可拆卸木制模具,并根据试件设计需要的保护层厚度,在木模具前后相应位置进行打孔。具体试件结构如图 2 所示。



(a) 试件构造



(b) 模具

图 2 试件结构

Fig. 2 Specimen structure

1.3 试件加载与测量

试验采用量程为 100 kN 电伺服万能试验机进行加载,试验加载速率为 0.5 mm/min,加载装置如图 3 所示。反力架下层 T 形钢板用夹具夹紧并进行调平,将拔出试件穿入反力架上层钢板中,试验机上夹具夹住筋材,当试验机横梁移动时,荷载即施加于试件上。BFRP 筋自由端和加载端位移采用量程为 30 mm 的电子式位移计测量,使用东华 DH3816N 采集数据,采样频率 5 Hz。自由端滑移量 *S_f* 由自由端位移计测量得出,由于 BFRP 筋的弹性模量较低,试件脱黏部分至加载端位移计处的 BFRP 筋的弹性变形不可忽略,则加载端滑移量计算公式为

$$S_j = S_w - S_b = S_w - \frac{Fl_b}{E_b A_b}$$

(1)

式中: S_j 为加载端滑移量, S_w 为加载端位移计的数值(取两个加载端位移计读数的平均值), S_b 、 l_b 分别为试件脱黏部分至加载端位移计处 BFRP 筋的伸长量和长度, F 为外荷载, E_b 、 A_b 分别为 BFRP 筋的弹性模量和有效横截面积。

PVA-ECC 与 BFRP 筋平均黏结应力计算见式(2),最大平均黏结应力称为黏结强度。

$$\tau = F / \pi dl$$

(2)

式中: τ 为平均黏结应力; d 为 BFRP 筋直径; l 为黏结长度。

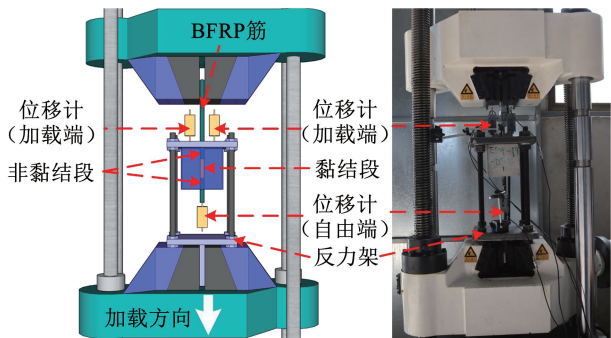


图 3 拔出试验装置
Fig.3 Pull out test device

2 试验结果与分析

2.1 试验破坏形态

本次试验只有保护层厚度为 5 mm 的试件发生 PVA-ECC 劈裂破坏,其余试件均发生 BFRP 筋拔出

破坏,并未出现筋材拉断现象。

1)拔出破坏。试件发生拔出破坏时,BFRP 筋随着外荷载增加从 PVA-ECC 中缓慢拔出,加载至结束 PVA-ECC 表面无明显裂缝。加载结束后观察黏结界面,无喷砂 BFRP 筋肋表面磨损严重,破坏主要发生在 BFRP 筋树脂层,PVA-ECC 黏结滑移段处有 BFRP 筋表面树脂材料残留,如图 4(a)和图 4(b)所示。该现象与普通钢筋与 PVA-ECC 发生黏结破坏时不同。普通钢筋发生黏结破坏时,筋肋剪碎黏结界面附近的 PVA-ECC 材料,黏结界面发生破坏^[12]。这是由于 BFRP 筋肋抗剪强度远小于普通钢筋。喷砂 BFRP 筋表面磨损程度较小,筋表面覆盖一层 PVA-ECC,筋表面 PVA-ECC 覆盖层与周围 PVA-ECC 发生剪切破坏,如图 4(c)所示。

2)劈裂破坏。加载过程中发生劈裂破坏时,试验机荷载曲线出现骤降,伴有 PVA-ECC 的开裂声,裂缝出现在试件表面黏结段区域并向非黏结段延伸,最终贯穿试件表面。在卸载后,PVA-ECC 表面两端非黏结段裂缝收缩,如图 4(d)所示。只有保护层厚度为 5 mm 的试件发生 PVA-ECC 劈裂破坏,这主要是因为 BFRP 筋肋与 PVA-ECC 相互挤压,使 PVA-ECC 一定范围内环向受拉,当环向拉应力大于 PVA-ECC 的开裂强度时,PVA-ECC 出现裂纹,并且裂纹随着拉应力的增大而逐渐向外扩展,当保护层厚度较小时,裂纹容易扩展到 PVA-ECC 表面而发生劈裂破坏。

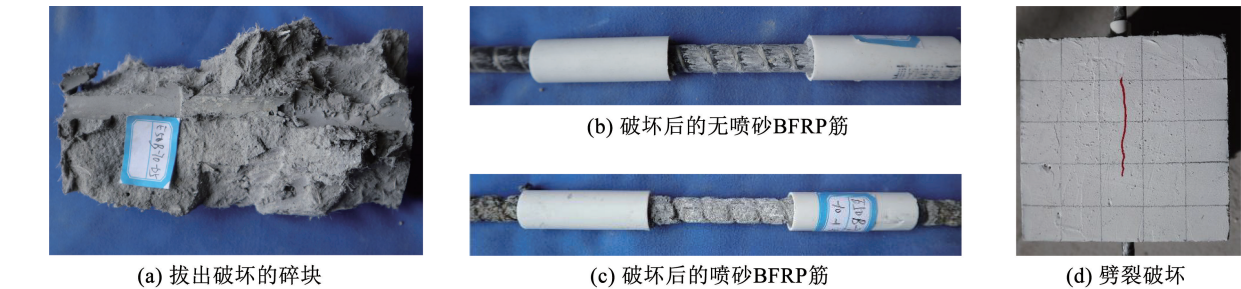


图 4 黏结破坏形态
Fig.4 Bond failure pattern

2.2 黏结强度结果

PVA-ECC 与 BFRP 筋拔出试件加载结果见表 3。其中,P 为拔出破坏,S 为劈裂破坏。试件编号含义为:PVA-ECC 强度和 BFRP 筋表面形式-保护层厚度-锚固长度-BFRP 筋直径,如 E50BS-70-D5-10 表示直径为 10 mm,锚固长度为 5 倍直径,表面喷砂的 BFRP 筋,PVA-ECC 保护层厚度为 70 mm 且强度为

C50 的拔出试件。

2.3 黏结滑移曲线

筋材与基体材料之间的黏结应力主要由化学胶结力、摩擦力及机械咬合力组成。根据试验结果分析,PVA-ECC 与 BFRP 筋拔出破坏过程可分为微滑移阶段、滑移阶段、下降阶段及残余应力阶段,BFRP 筋与 PVA-ECC 拔出破坏黏结滑移曲线如图 5 所示。

表 3 PVA-ECC 与 BFRP 筋拔出试验结果

Tab. 3 Result of pull-out test of PVA-ECC and BFRP bars

试件编号	F_u/kN	$\bar{F}_u/\text{kN}$	τ_u/MPa	$\bar{\tau}_u/\text{MPa}$	破坏类型
E50B-70-D5-10-1	20.05	20.90	12.77	13.31	P
E50B-70-D5-10-2	23.64	20.90	15.05	13.31	P
E50B-70-D5-10-3	19.00	20.90	12.10	13.31	P
E50BS-70-D5-10-1	30.80	27.77	19.61	17.68	P
E50BS-70-D5-10-2	24.74	27.77	15.75	17.68	P
E50B-70-D7-10-1	24.55	25.89	11.16	11.77	P
E50B-70-D7-10-2	26.96	25.89	12.26	11.77	P
E50B-70-D7-10-3	26.15	25.89	11.89	11.77	P
E50B-70-D9-10-1	33.29	29.98	11.77	10.60	P
E50B-70-D9-10-2	32.35	29.98	11.44	10.60	P
E50B-70-D9-10-3	24.30	29.98	8.59	10.60	P
E50B-69-D5-12-1	32.65	35.78	14.44	15.82	P
E50B-69-D5-12-2	38.90	35.78	17.20	15.82	P
E50B-71-D5-8-1	7.60	7.38	7.56	7.34	P
E50B-71-D5-8-2	7.50	7.38	7.46	7.34	P
E50B-71-D5-8-3	7.05	7.38	7.01	7.34	P
E50B-25-D5-10-1	24.89	23.92	15.84	15.23	P
E50B-25-D5-10-2	24.53	23.92	15.62	15.23	P
E50B-25-D5-10-3	22.33	23.92	14.22	15.23	P
E50B-15-D5-10-1	17.80	17.94	11.30	11.41	P
E50B-15-D5-10-2	17.15	17.94	10.91	11.41	P
E50B-15-D5-10-3	18.88	17.94	12.02	11.41	P
E50B-5-D5-10-1	11.55	9.47	7.35	6.03	S
E50B-5-D5-10-2	8.10	9.47	5.17	6.03	S
E50B-5-D5-10-3	8.75	9.47	5.57	6.03	S
E80B-70-D5-10-1	30.13	30.43	19.18	19.37	P
E80B-70-D5-10-2	35.65	30.43	22.70	19.37	P
E80B-70-D5-10-3	25.50	30.43	16.23	19.37	P

注： F_u 和 τ_u 分别表示试件的峰值荷载和峰值黏结应力； $\bar{F}_u$ 和 $\bar{\tau}_u$ 分别表示试件的平均峰值荷载和平均峰值黏结应力。

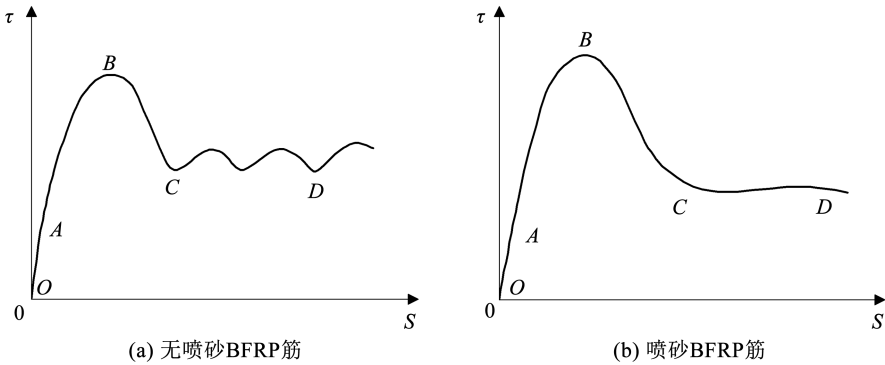


图 5 拔出破坏黏结滑移曲线

Fig. 5 Bond-slip curves of pull-out failure

1)微滑移阶段(OA 段)。加载初期,加载端滑移量非常小,自由端不发生滑移。此时,试件处于线弹性阶段,黏结滑移曲线斜率较大,接近直线。此时

试件的黏结强度主要来自 BFRP 筋与 PVA-ECC 之间的化学胶结力。

2)滑移阶段(AB 段)。随着荷载增大,局部脱

黏首先发生在 BFRP 筋与 PVA-ECC 的加载端附近, 然后逐渐向自由端发展。脱黏界面上的化学胶结力在埋置长度上从加载端向自由端递减, BFRP 筋与 PVA-ECC 产生相对滑移。黏结滑移曲线斜率逐渐减小, 呈非线性。随着黏结应力继续增加至峰值, 黏结滑移曲线逐渐平缓。此时, 黏结强度主要由 PVA-ECC 与 BFRP 筋肋的机械咬合力和摩擦力提供。

3) 下降阶段 (BC 段)。黏结应力达到峰值后, 随着滑移量的增加, BFRP 筋肋磨损愈发严重, 机械咬合力减小, 黏结应力开始逐渐下降。

4) 残余应力阶段 (CD 段)。此阶段随着滑移量的增加, 无喷砂的 BFRP 筋的黏结应力存在波动性变化, 整个黏结滑移曲线近似于周期递减的正弦曲线。然而喷砂 BFRP 黏结滑移曲线在此阶段没有表现出明显的波动性变化, 这是由于残余应力阶段的黏结强度主要靠界面残余摩擦力提供, 而喷砂 BFRP 筋材表面的 PVA-ECC 覆盖层已发生层间剥离, 导致黏结强度呈现一直下降趋势。

2.4 黏结性能影响因素研究

2.4.1 BFRP 筋表面形式

表面喷砂及无喷砂 BFRP 筋的自由端黏结滑移曲线如图 6 所示。在外荷载作用下, 表面喷砂 BFRP 筋达到黏结应力峰值时对应的滑移值比无喷砂 BFRP 筋更小。与无喷砂 BFRP 筋相比, 喷砂 BFRP 筋在 PVA-ECC 中黏结强度提高约 32.8%。喷砂 BFRP 筋发生黏结破坏时, BFRP 筋表面的 PVA-ECC 覆盖层发生剪切破坏而拔出, 并且 BFRP 筋表面喷砂层磨损程度较小, 可见砂颗粒与 BFRP 筋表面黏结可靠。高超等^[17]采用人工喷砂的 BFRP 筋与混凝土, 其黏结强度提高约 12% 左右, 发生黏结破坏时, BFRP 筋表面喷砂层磨损严重。由此可见, 喷砂对黏结强度的提高大小是受到砂颗粒和筋材表面黏

结的牢固程度的影响, 当砂颗粒黏结更牢固时, BFRP 筋与 PVA-ECC 的黏结强度提升越高。

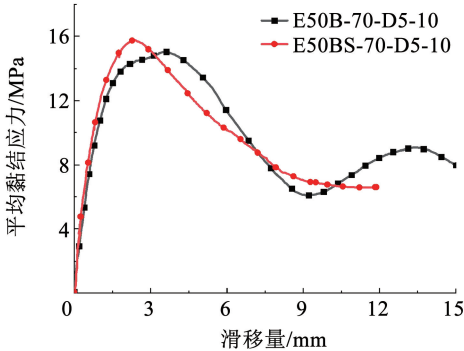


图 6 不同表面形式下自由端黏结滑移曲线

Fig. 6 Bond-slip curves of free ends with different surface forms

2.4.2 BFRP 筋锚固长度

BFRP 筋黏结强度随锚固长度增加而降低。相比锚固长度为 5d 的试件, 7d、9d 试件黏结强度分别降低了 11.57% 和 20.3%, 黏结强度变化与锚固长度之间存在线性关系。黏结强度随锚固长度增加而降低是由黏结应力沿黏结段的非线性分布和泊松效应引起的。锚固长度越长, 非线性分布越明显。当锚固长度较小时, 高黏结应力分布区域较大, 筋材锚固长度上的应力分布比较均匀, 平均黏结应力较大; 而当锚固长度较大时, 高黏结应力分布区域较窄, 筋材埋置长度上的应力分布不均匀, 平均黏结应力较小。此外泊松效应的存在使筋材在拉伸过程中直径降低, 进而导致 BFRP 筋与 PVA-ECC 间的摩擦力降低。

图 7 为锚固长度为 5d、7d、9d 条件下 BFRP 筋的加载端和自由端黏结滑移曲线。3 种不同锚固长度下试件达到黏结应力峰值时, 自由端滑移量均在 3 mm 左右, 加载端滑移量则随锚固长度增加而提高。

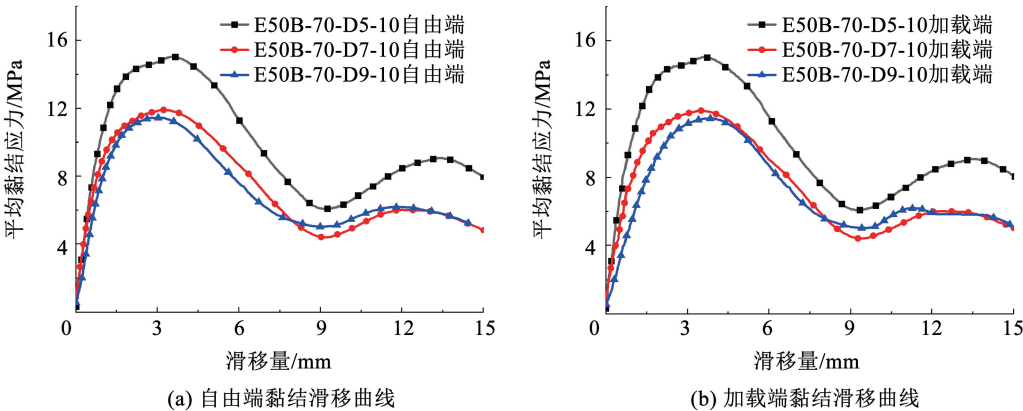


图 7 不同锚固长度下黏结滑移曲线

Fig. 7 Bond-slip curves under different anchorage lengths

2.4.3 BFRP 筋直径

本试验中 BFRP 筋肋宽、肋间距保持不变,肋高随 BFRP 筋直径增加而增加,但相对肋高随筋材直径的增大而保持不变。3 种直径 BFRP 筋的黏结滑移曲线如图 8 所示,当 BFRP 筋的相对肋高均为 6.7% 时,试件的黏结强度表现出随着直径的增大而增大。黏结段 FRP 筋的应力呈现非线性分布的特点,当 FRP 筋的直径越大,其非线性应力分布越不均匀^[18],在筋材的肋参数不变的情况下,较大直径的 FRP 筋需要更大的锚固长度才能获得相同法向黏结应力。因此,在其他条件不变时,FRP 筋与混凝土的黏结强度应随着 FRP 筋直径的增大而降低^[11,18]。这不同于本试验的结论,其主要原因是本试验采用筋材的相对肋高保持不变,当增加 BFRP 筋的直径时,筋肋高度变高,则筋肋与 PVA-ECC 的接触面积增加,进而提高了二者之间的机械咬合力,使黏结强度增大。因此,增加 BFRP 筋肋高可以有效避免筋材直径增大对黏结强度的不利影响。

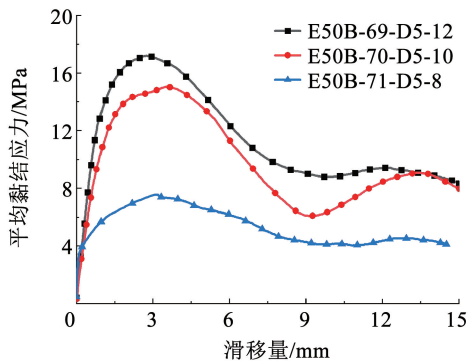


图 8 不同直径下自由端黏结滑移曲线

Fig. 8 Bond-slip curves of free ends with different diameters

2.4.4 PVA-ECC 保护层厚度

本试验通过设置不同的保护层厚度来模拟实际工程中保护层厚度不足带来的影响。对于保护层厚度为 25、15、5 mm 的试件, BFRP 筋黏结强度随着保护层厚度的降低而降低,呈正相关。当保护层厚度为 5 mm 时,黏结强度为 6.03 MPa,仅为保护层厚度为 25 mm 时的 39.59%。实际工程中需要足够的保护层厚度对筋材产生约束,而保护层厚度的不足或漏筋会严重影响 BFRP 筋与 PVA-ECC 的黏结强度,继而影响结构的承载力。

根据图 9 可知,保护层厚度为 70 mm 和 25 mm 的试件黏结应力峰值出现时, BFRP 筋滑移量约 3 mm。保护层厚度为 15、5 mm 试件的黏结应力达到峰值时, BFRP 筋滑移量比保护层厚度 70、25 mm 的试件小。当保护层厚度不足发生黏结破坏时,黏结滑移曲线会发生骤降,试件覆盖层出现裂缝。通过判断黏结强度峰值出现时的黏结滑移值可以有效

判断保护层厚度是否满足要求。对于直径不超过 10 mm 的 BFRP 筋,保护层厚度建议 25 mm 以上。

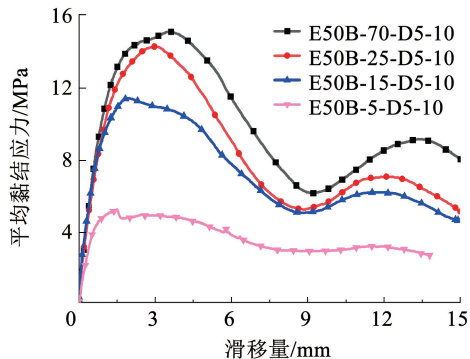


图 9 不同保护层厚度下自由端黏结滑移曲线

Fig. 9 Bond-slip curves of free ends under different protective layer thicknesses

2.4.5 PVA-ECC 强度

当 PVA-ECC 强度从 C50 提高到 C80 时, BFRP 筋黏结强度从 13.31 MPa 提高到 19.37 MPa,强度提高 45.53%。已有研究^[19]表明, FRP 筋在普通混凝土中的黏结破坏是由于二者之间的黏结界面产生滑移而破坏;高强混凝土中,黏结破坏主要由 FRP 筋树脂与纤维剪切破坏造成的。在高强度 PVA-ECC 中,黏结强度由 BFRP 筋中树脂与纤维之间的剪切力控制,继续增加 PVA-ECC 强度并不能大幅提高黏结强度。

对比 BFRP 筋在两种强度的 PVA-ECC 中加载端和自由端的黏结滑移曲线图 10 可知,高强度 PVA-ECC 中在黏结滑移曲线进入非线性阶段后,自由端的滑移量滞后于加载端,黏结损伤从加载端开始,然后逐渐转移到自由端,黏结应力在黏结滑移段呈不均匀分布。

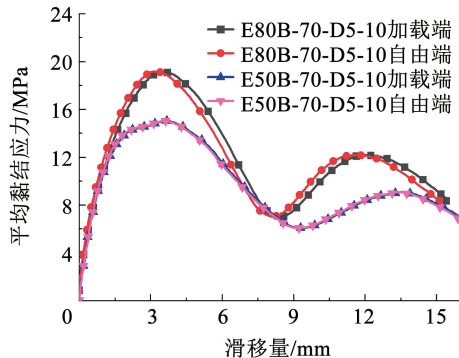


图 10 不同 PVA-ECC 强度下黏结滑移曲线

Fig. 10 Bond-slip curves of under different PVA-ECC strengths

3 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结滑移本构

3.1 已有本构模型及适用性

PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结滑移本构是设计

PVA-ECC 与 BFRP 筋结构和进行有限元模拟的重要理论依据。目前国内外学者已经在 FRP 筋与混凝土黏结滑移本构研究方面建立了多种模型^[20-23]。其中 Malvar 模型表达式^[20]为

$$\tau = \tau_u \frac{F(s/s_u) + (G-1)(s/s_u)^2}{1 + (F-2)(s/s_u) + G(s/s_u)^2} \quad (3)$$

改进 BPE 模型表达式^[21]为

$$\tau = \begin{cases} \tau_u (s/s_u)^\alpha, & 0 \leq s \leq s_u \\ \tau_u - \tau_u p (s/s_u - 1), & s_u \leq s \leq s_r \\ \tau_r, & s_r \leq s \end{cases} \quad (4)$$

连续曲线模型表达式^[22]为

$$\tau = \begin{cases} 2\tau_u \sqrt{\frac{s}{s_u}} - \tau_u \frac{s}{s_u}, & 0 \leq s \leq s_u \\ \tau_u \frac{(s_r - s)^2 (2s + s_r - 3s_u)}{(s_r - s_u)^3} + \\ \tau_r \frac{(s - s_u)^2 (3s_r - 2s - s_u)}{(s_r - s_u)^3}, & s_u \leq s \leq s_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: τ_u 、 s_u 为峰值黏结应力及对应滑移值, τ_r 、 s_r 为

残余应力及对应滑移值, F 、 G 、 α 、 p 均为试验结果确定的常数。

Malvar 模型、改进 BPE 模型以及连续曲线模型均不是以 PVA-ECC 与 BFRP 筋的黏结滑移曲线构造的本构模型。因此, 本文仅考虑以上 3 种模型来讨论 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结滑移本构模型。3 种本构模型曲线与试验曲线拟合结果如图 11 所示。另外, 由于实际工程中为避免筋材保护层厚度不足的现象, 配置了一定量的箍筋, 结构不会发生劈裂破坏。因此, 本研究并未选择劈裂破坏试件的数据来探讨 PVA-ECC 与 BFRP 筋的黏结滑移本构模型。

3 种本构模型中, Malvar 模型在上升段能较好的描述 PVA-ECC 与 BFRP 筋的黏结滑移变化规律, 但结构式含有两个参数且较为复杂; 改进 BPE 模型在上升段与 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结滑移曲线差异较大, 且下降段为直线; 连续曲线模型表达形式简单, 但在上升段, 连续曲线模型的黏结应力要高于试验的黏结应力。

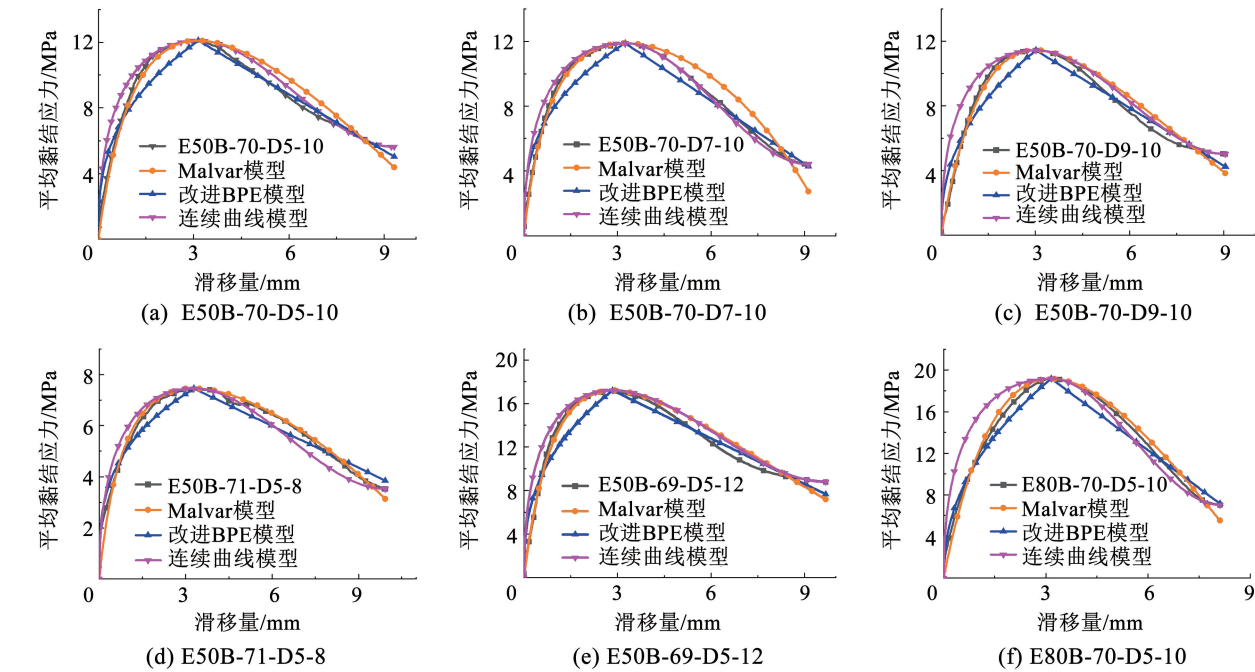


图 11 各本构模型与试验结果对比

Fig. 11 Comparison of constitutive models with the experimental results

3.2 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结滑移本构模型

本文依据连续曲线模型, 改进上升段, 获得适用于 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结滑移的本构模型。构造函数为

$$\tau = a \left(\frac{s}{s_u} \right)^k \tau_u + b \left(\frac{s}{s_u} \right) \tau_u \quad (6)$$

根据连续曲线模型思想, 有约束条件:

$$\begin{cases} \tau = 0, s = 0 \\ \tau = \tau_u, \frac{d\tau}{ds} = 0, s = s_u \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 求解可得

$$k = \frac{a-1}{a}, b = 1-a \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 可得

$$\frac{\tau}{\tau_u} = a \left(\frac{s}{s_u} \right)^{\frac{a-1}{a}} + (1-a) \left(\frac{s}{s_u} \right) \quad (9)$$

式中 a 是反映试验筋材和基体材料特性的常数,当筋材与基体材料确定时, a 为定值。 a 越小,黏结滑移曲线上升段斜率越大。对于 BFRP 筋与 PVA-

ECC 材料,根据试验数据, a 值建议取 7,改进后的本构模型黏结滑移曲线如图 12 所示,同连续曲线模型相比,本文模型与试验结果吻合更好。因此最终可得到适用于 PVA-ECC 与 BFRP 筋黏结滑移本构模型:

$$\begin{cases} \frac{\tau}{\tau_u} = 7 \left(\frac{s}{s_u} \right)^{\frac{6}{7}} - 6 \left(\frac{s}{s_u} \right), 0 \leq s \leq s_u \\ \tau = \tau_u \frac{(s_r - s)^2 (2s + s_r - 3s_u)}{(s_r - s_u)^3} + \tau_r \frac{(s - s_u)^2 (3s_r - 2s - s_u)}{(s_r - s_u)^3}, s_u \leq s \leq s_r \end{cases} \quad (10)$$

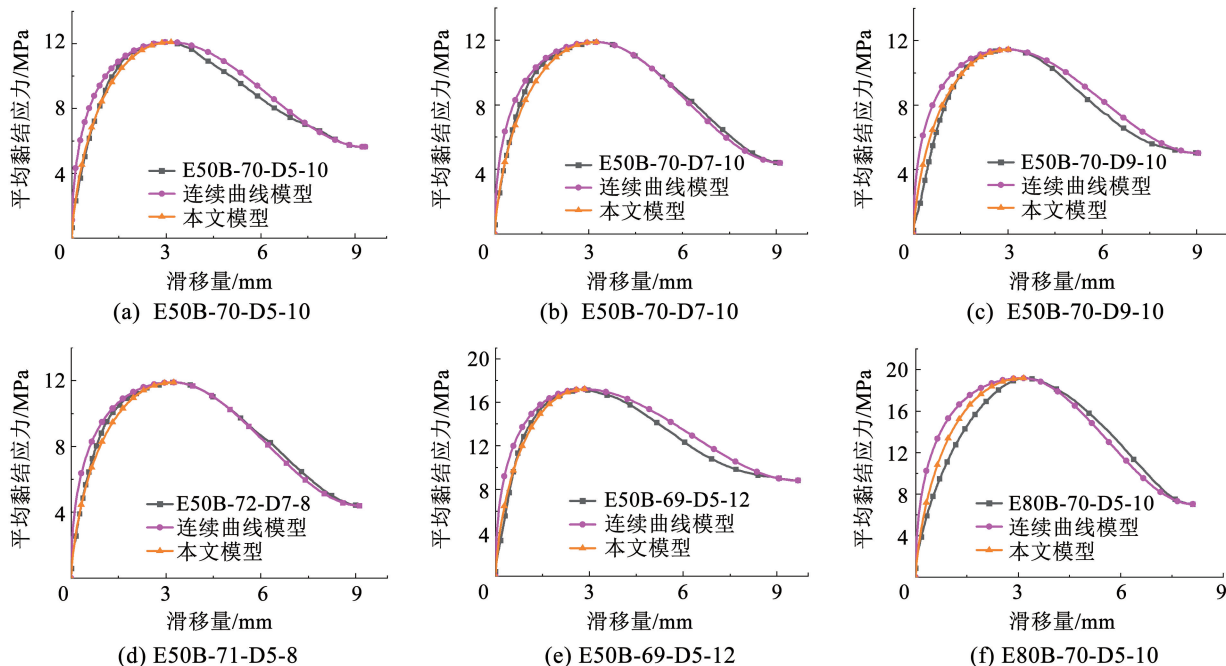


图 12 本构模型与试验结果对比

Fig. 12 Comparison of the constitutive model with the experimental results

4 结 论

设计 28 个 PVA-ECC 与 BFRP 筋拉拔试件进行拔出试验,通过分析破坏形态与破坏特征,揭示黏结滑移破坏机理,探究 PVA-ECC 及 BFRP 筋参数对黏结强度的影响规律,根据试验结果建立 PVA-ECC 与 BFRP 筋本构模型,得出以下结论:

1) 除保护层厚度为 5 mm 的试件发生劈裂破坏外,其余试件均为拔出破坏。无喷砂 BFRP 筋肋在外荷载作用下被 PVA-ECC 剪切破坏而丧失机械咬合力,可以通过提高 BFRP 筋肋的强度来提高筋材在 PVA-ECC 中的黏结强度。黏结滑移曲线可分为微滑移阶段、滑移阶段、下降阶段和残余应力阶段,在残余应力阶段无喷砂 BFRP 筋的黏结应力曲线有上下波动,而喷砂 BFRP 筋的黏结滑移曲线无明显波动。

2) 对 BFRP 筋表面进行喷砂处理可以提高筋材在 PVA-ECC 中黏结强度;BFRP 筋黏结强度随锚固

长度的增加而降低,近似呈线性关系;增大筋材直径的同时保证相对肋高不变可以有效避免因 BFRP 筋直径增大造成的黏结强度降低。

3) 当 PVA-ECC 保护层厚度从 25 mm 降至 5 mm 时,BFRP 筋黏结强度随保护层厚度降低而降低,两者呈正相关,保护层厚度 5 mm 时黏结强度仅为正常试件的 39.59%;PVA-ECC 强度从 50.5 MPa 提高至 81.3 MPa 时,黏结强度提高了 45.53%。

4) 提出了 PVA-ECC 与 BFRP 筋的黏结滑移本构模型,与试验结果吻合良好,且模型物理意义明确,可为 PVA-ECC 与 BFRP 筋结构数值模拟提供理论参考。

参考文献

- [1] SHANG Huaishuai, ZHOU Junhao, FAN Guoxi, et al. Study on the bond behavior of steel bars embedded in concrete under the coupling of sustained loads and chloride ion erosion[J]. Construction and Building Materials, 2021, 276 (Sup. 2): 121684. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2020. 121684

[2] RUI M F. Optimization of RC structure performance in marine environment[J]. Engineering Structures, 2010, 32 (5): 1489. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.02.011

[3] TORRESACOSTA A A, NAVARROGUTIERREZ S, TERANGUILLEN J. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams [J]. Engineering Structures, 2007, 29(6): 1145. DOI: 10.1016/j.engstruct.2006.07.018

[4] NKURUNZIZA G, DEBAIKY A, COUSIN P, et al. Durability of GFRP bars: a critical review of the literature [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2005, 7(4): 194. DOI: 10.1002/pse.205

[5] SIM J, PARK C. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(6/7): 504. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.02.002

[6] TAHA A, ALNAHHAL W, ALNUAIMI N. Bond durability of basalt FRP bars to fiber reinforced concrete in a saline environment[J]. Composite Structures, 2020, 243: 112277. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112277

[7] URBANSKI M, LAPKO A, GARBACZ A. Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures[J]. Procedia Engineering, 2013, 57: 1183. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.149

[8] LI V C, WANG Shuxin, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite PVA-ECC[J]. Materials Journal, 2001, 98(6): 483

[9] 余江滔, 史天成, 郁颀, 等. 高性能纤维增强混凝土与筋材复合体系拉伸性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 825

YU Jiangtao, SHI Tiancheng, YU Jie, et al. Experimental study of tensile properties of composite system of high performance concrete and reinforcements [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49 (6): 825. DOI: 10.11908/j.issn.0253 - 374x.20293

[10] ZHAO Debo, ZHOU Yingwu, XING Feng, et al. Bond behavior and failure mechanism of fiber-reinforced polymer bar-engineered cementitious composite interface [J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112520. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112520

[11] 吴丽丽, 王云飞, 谢灵慧, 等. 玻璃纤维增强聚合物复合材料筋与工程水泥基复合材料黏结性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(3): 696

WU Lili, WANG Yunfei, XIE Linghui, et al. Bonding behavior between glass fiber reinforced polymer composite bars and engineered cementitious composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37 (3): 696. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20190729.001

[12] LI Zhiqiang, HOU Wei, LIN Guan. Flexural strengthening of RC beams with BFRP or high strength steel bar-reinforced ECC matrix [J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 124404. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124404

[13] HOSSAIN K M A. Bond strength of GFRP bars embedded in engineered cementitious composite using RILEM beam testing[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 1

[14] 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法: JC/T 2461—2018 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018

Standard test method for the mechanical properties of ductile fiber reinforced cementitious composites: JC/T 2461—2018 [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2018

[15] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012

Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012

[16] ACI 440 Committee. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structure: ACI 440.3R-04 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2004

[17] 高超, 董伟伟, 陈杰, 等. BFRP 筋与纤维混凝土粘结性能研究 [J]. 低温建筑技术, 2019, 41(10): 19

GAO Chao, DONG Weiwei, CHEN Jie, et al. Research on the bonding properties of BFRP bars and fiber reinforced concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2019, 41 (10): 19. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2019.10.006

[18] 杨超, 杨树桐, 戚德海. BFRP 筋与珊瑚混凝土粘结性能试验研究 [J]. 工程力学, 2018, 35(增刊1): 172

YANG Chao, YANG Shutong, QI Dehai. Experimental study on bonding properties of BFRP bars and coral concrete [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(Sup.1): 172. DOI: 10.6052/j.issn.1000 - 4750.2017.06.S034

[19] ROLLAND A, ARGOU P, BENZARTI K, et al. Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 231: 117160. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117160

[20] 孙晓燕, 姚晨纯, 王海龙, 等. FRP 筋与混凝土粘结性能的研究进展 [J]. 低温建筑技术, 2012, 34(6): 49

SUN Xiaoyan, YAO Chenchun, WANG Hailong, et al. Research on bond properties between fiber reinforces polymer (FRP) bar and concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 34 (6): 49. DOI: 10.3969/j.issn.1001 - 6864.2012.06.021

[21] 张望喜, 胡彬彬, 王冠杰, 等. FRP 筋与混凝土粘结性能研究进展及本构模型改进 [J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文). (2021-06-03). <http://qks.cqu.edu.cn/cqdxbcn/article/abstract/202302010>

ZHANG Xiwang, HU Binbin, WANG Guanjie, et al. Research progress on bond behavior between FRP bars and concrete and improvement of constitutive model [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering. (2021-06-03). <http://qks.cqu.edu.cn/cqdxbcn/article/abstract/202302010>

[22] 高丹盈, 朱海堂, 谢晶晶. 纤维增强塑料筋混凝土粘结滑移本构模型 [J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 41

GAO Danying, ZHU Haitang, XIE Jingjing. The constitutive models for bond slip relation between FRP rebars and concrete [J]. Industrial Construction, 2003, 33(7): 41. DOI: 10.3321/j.issn: 1000 - 8993.2003.07.011

[23] 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

HAO Qingduo, WANG Yanlei, HOU Jilin, et al. Experimental study on bond behavior of GFRP ribbed rebars [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 158

(编辑 魏希柱)