

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2025.01.009

工程水泥基复合材料与锈蚀钢筋黏结性能研究

李鑫平¹, 车佳玲^{1,2}, 刘海峰^{1,2}, 王 丹¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750000; 2. 宁夏土木工程防震减灾工程技术研究中心, 银川 750021)

摘要:为研究工程水泥基复合材料(ECC)与锈蚀螺纹钢的黏结破坏机理,采用中心拉拔试验方法,分析钢筋锈蚀率、黏结锚固长度、钢筋直径和纤维掺量等因素对黏结性能的影响。结果表明,ECC与锈蚀钢筋的黏结应力-滑移曲线可分为微滑移阶段、滑移阶段、破坏阶段和残余阶段,试件破坏类型为剪切拔出破坏;黏结强度随钢筋锈蚀率的增加先增大后减小,存在临界锈蚀率使得黏结性能最好;钢筋锈蚀率为10%时,试件黏结强度随钢筋锚固长度和钢筋直径的增大而减小;随着纤维体积掺量的增加,黏结韧性指数和黏结强度先增大后减小,纤维体积掺量为2%时,纤维的增韧和阻裂效果最明显。

关键词:工程水泥基复合材料;锈蚀钢筋;拉拔试验;黏结强度;黏结韧性指数

中图分类号:TU502

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)01-090-08

Experimental study on bond performance between engineered cementitious composite and corroded rebars

LI Xinping¹, CHE Jialing^{1,2}, LIU Haifeng^{1,2}, WANG Dan¹

(1. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan 750000, P. R. China;

2. Ningxia Civil Engineering Research Center for Earthquake Prevention and Disaster Mitigation Engineering Technology, Yinchuan 750021, P. R. China)

Abstract: This study investigates the bond failure mechanism between engineered cementitious composite (ECC) and corroded rebars through pull-out experiments. The effects of corrosion rate, bond anchorage length, rebar diameter, and fiber content on bond performance are analyzed. The results show that the bond stress-slip curve can be divided into: micro-slip, slip, failure and residual phases. All specimens exhibit shear pull-out failure as the primary failure mode. The bond strength initially increases and then decreases with the corrosion rate and there is a critical corrosion rate resulting in the warimized bond strength. For rebars with a 10% corrosion rate, bond strength decreases as anchorage length and rebar diameter increase. Additionally, increasing the fiber content enhances the bond toughness index and bond strength initially, followed by a decline. The optimum performance, including maximum toughness and crack resistance, is observed at a fiber content of 2%.

Keywords: engineered cementitious composite; corroded rebar; pull-out experiment; bond strength; bond toughness index

收稿日期:2023-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52068060)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52068060)。

作者简介:李鑫平(1995—),男,硕士研究生,主要从事ECC加固研究,(E-mail)lxptgzy@126.com。

通信作者:车佳玲,女,博士,教授,(E-mail)che_jialing@126.com。

工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)是一种具有拉伸应变硬化行为且极限拉伸应变超过 3% 的高性能材料^[1],在单调和循环荷载下表现出优异的力学性能和裂缝控制能力^[2],正是因为 ECC 优良的材料性能,在建筑加固修复领域得到了广泛的应用^[3-4]。复杂环境下,钢筋混凝土结构内部钢筋在碳化和氯盐侵蚀作用下发生锈蚀,锈蚀产物破坏钢筋与水泥胶体间的化学胶结力,体积膨胀导致混凝土保护层脱落降低了混凝土对钢筋的约束作用,削弱甚至破坏钢筋与混凝土之间的黏结锚固作用,造成结构的破坏^[5-6]。为了保证结构的安全性和耐久性,需要对损伤的结构进行加固,在使用 ECC 加固钢筋锈蚀的混凝土结构时,ECC 与锈蚀钢筋间良好的黏结性能是保证加固效果的前提。近年来,国内外学者通过改变纤维体积掺量、锚固长度和配箍率等参数对 ECC 与钢筋的黏结性能展开一系列试验。刘曙光等^[7]提出存在最佳纤维体积掺量使得黏结性能最好,黏结强度在一定范围内随保护层厚度的增大而增大。米渊等^[8]提出黏结强度随着黏结长度的增大而减小,随着配箍率的提高而增大。Chao 等^[9]提出纤维能够有效增强钢筋与基体的黏结强度和控制裂纹宽度,减小变形钢筋与基体的锚固长度。蔡景明等^[10]分析得出 ECC 中的纤维可以参与拉伸荷载的传递,使得钢筋与 ECC 的黏结强度更高。目前,针对 ECC 与钢筋的黏结性能研究日趋成熟,但对 ECC 与锈蚀钢筋的黏结性能研究还不够深入。

笔者以银川地区的腾格里沙漠砂为细集料制备 ECC,并对其进行了单轴拉伸、单轴压缩力学性能试验和耐久性试验^[11-12]。在此基础上,进一步探究 ECC 与锈蚀钢筋的黏结性能,通过中心拉拔试验,研究钢筋锈蚀率、黏结锚固长度、钢筋直径和纤维掺量等因素对钢筋与 ECC 的黏结性能的影响。

1 试验概况

1.1 原材料的力学性能

ECC 所用材料分别是普通硅酸盐水泥、腾格里沙漠砂、PVA 纤维、粉煤灰、聚羧酸高效减水剂和水,纤维主要参数由厂家提供,如表 1 所示;钢筋的力学性能,如表 2 所示;试件同龄期力学性能,如表 3 所示。

表 1 PVA 纤维主要参数
Table 1 Main parameters of PVA fiber

纤维名称	长度/mm	直径/ μm	极限抗拉强度/MPa	密度/ $(\text{kL}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa
PVA	12	40	1 600	1 300	40

表 2 钢筋力学性能
Table 2 Mechanical properties of rebars

钢筋型号	直径/mm	屈服强度平均值/MPa	抗拉强度平均值/MPa	伸长率/%
HRB400	10	439	625	24
	12	465	625	22
	14	465	605	25
	16	465	636	24
	18	420	608	24

表 3 ECC 和混凝土的力学性能
Table 3 Mechanical properties of ECC and concrete

混凝土种类	纤维体积掺量/%	抗压强度 f_{cu}/MPa		
E1	2.00	53.25	52.34	53.24
E2	1.75	54.04	54.59	54.80
E3	2.25	49.03	48.36	49.27
C1	—	53.59	54.51	53.89

注:E1、E2、E3 分别是 3 种纤维掺量不同的 ECC;C1 是普通混凝土。

1.2 试件设计及试验装置

对12组ECC与锈蚀钢筋中心拉拔试件和1组混凝土与锈蚀钢筋的对比试件进行黏结性能试验,每组3个试件,控制变量是钢筋锈蚀率、黏结锚固长度、钢筋直径和纤维掺量,试件主要设计参数,如表4所示。为了保证钢筋黏结锚固长度,试件尺寸分别取为150 mm×150 mm×150 mm和150 mm×150 mm×200 mm。钢筋位于试件中心,钢筋黏结锚固长度分别设置为5 d、8 d和12 d,在钢筋锚固区两端埋置PVC套管以消除端部效应并控制锚固长度,试件浇筑前PVC管与钢筋缝隙填充玻璃胶密封,防止浆体进入管内以保证钢筋与混凝土的黏结长度,试件尺寸如图1所示。中心拉拔试验在1 000 kN电液伺服万能试验机上进行,在钢筋自由端和加载端分别对称布置2个LVDT,以测量加载端和自由端钢筋与试件的相对滑移。加载全程采用位移控制加载方式,加载速率为1 mm/min,连续加载直至试件破坏;试验后,取下试件观察钢筋拔出情况及混凝土裂缝展开状况,确定试件的破坏形式及拔出类型,加载装置如图2所示。

表4 试件主要设计参数及结果

Table 4 Design parameters and results of test specimens

试件编号	钢筋直径/mm	锚固长度/mm	理论钢筋 锈蚀率/%	实际钢筋 锈蚀率/%	极限黏结荷载/ kN	极限黏结应力/ MPa
E1-5 d12-10	12	60	10	9.95	47.53	21.02
E1-8 d12-10	12	96	10	10.32	62.48	17.27
E1-12 d12-10	12	144	10	10.24	63.56	11.72
E2-5 d12-10	12	60	10	9.68	38.81	17.17
E3-5 d12-10	12	60	10	9.85	37.13	16.42
E1-5 d10-10	10	50	10	9.76	38.65	24.61
E1-5 d14-10	14	70	10	9.68	75.31	18.74
E1-5 d16-10	16	80	10	10.35	50.79	16.50
E1-5 d18-10	18	90	10	10.28	64.10	12.60
E1-5 d12-0	12	60	0	0	48.87	21.61
E1-5 d12-5	12	60	5	5.16	49.78	23.02
E1-5 d12-15	12	60	15	14.79	41.43	18.32
C1-5 d12-10	12	60	10	9.84	43.04	19.02

注:E1-5 d12-10表示E1-黏结锚固长度(5 d)钢筋直径(12 mm)-钢筋理论锈蚀率(10%);d是钢筋直径。

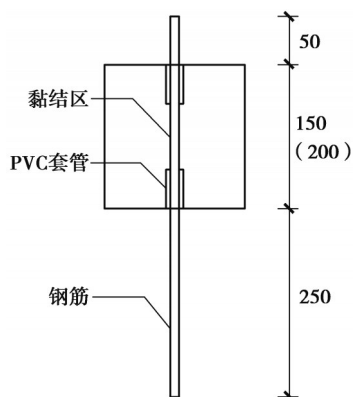


图1 拉拔试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Size of specimen (unit: mm)

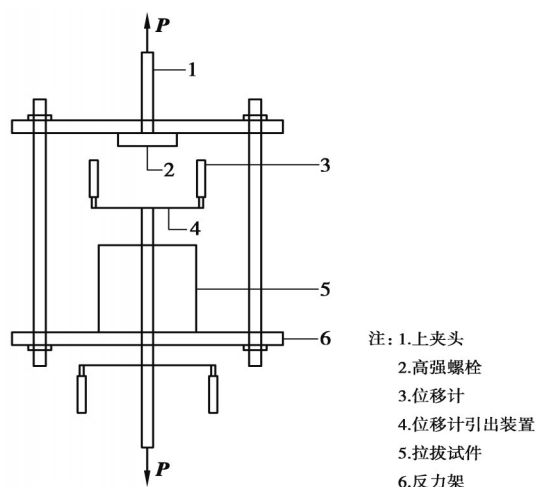


图2 拉拔试验装置

Fig. 2 Pull experiment device

1.3 加速锈蚀试验方法

钢筋锈蚀采用外加电流加速锈蚀法,根据法拉第定律控制钢筋锈蚀率,预锈蚀钢筋与直流电源正极相连,不锈钢片与直流电源负极相连,氯化钠溶液为传输介质,加速锈蚀钢筋试验装置如图3(a)所示,拉拔试验结束后,将拉拔试件中钢筋取出,截取黏结区段钢筋如图3(b)所示。通电时间 t 由式(1)计算确定:

$$t = \frac{zF\Delta m}{MI} \quad (1)$$

式中: Δm 为钢筋质量损失; F 为法拉第常数($F = 96\,500\text{ C/mol}$); z 为铁离子电荷数($z = 2$); M 为铁的摩尔质量($M = 56\text{ g/mol}$); I 为锈蚀电流强度($I = 200\text{ }\mu\text{A/cm}^2$)。

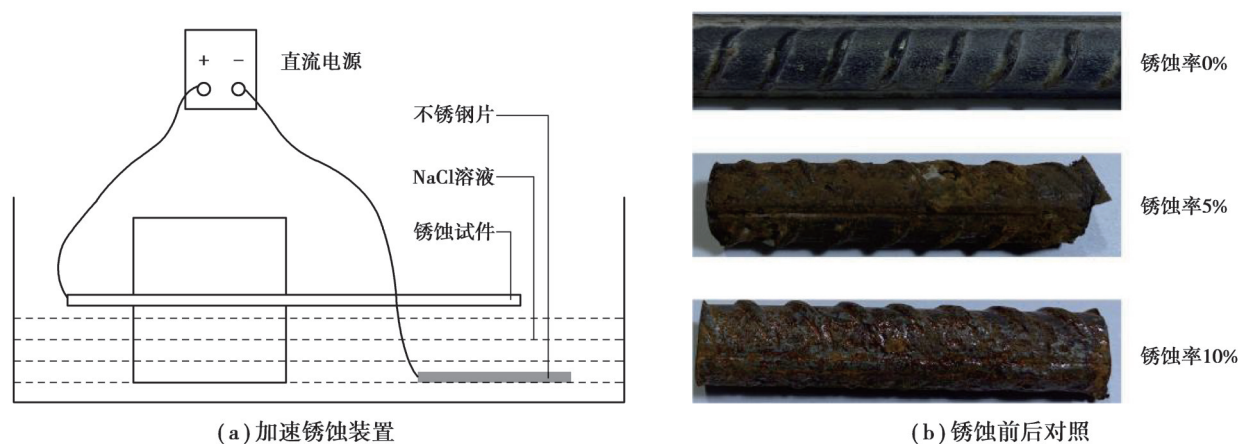


图3 加速锈蚀装置和锈蚀前后对照

Fig. 3 Accelerated corrosion device and corrosion control

2 黏结滑移机理分析

图4是ECC与锈蚀钢筋的典型黏结应力-滑移曲线,可分为微滑移阶段(OA)、滑移阶段(AB)、破坏阶段(BC)和残余阶段(CD),对照组锈蚀钢筋与混凝土的平均黏结应力-滑移曲线可分为上升阶段(OE),下降阶段(EF)和残余阶段(FG)。

1)微滑移阶段(OA):钢筋开始滑移,锈蚀层结构被挤压破坏,钢筋与ECC间的胶结力减小,此时黏结应力主要取决于机械咬合力和握裹力,黏结应力-滑移曲线基本呈线性上升趋势。

2)滑移阶段(AB):钢筋周围ECC产生不同程度的径向裂缝,锈蚀产物被挤压密实,钢筋与ECC间咬合齿逐渐被剪断挤压,ECC中的纤维被拔出或拉断,吸收耗散钢筋滑移过程中产生的能量,黏结应力-滑移曲线上升趋势放缓,直至黏结应力到达峰值点(黏结强度)。

3)破坏阶段(BC):钢筋与周围ECC间的咬合齿基本被破坏,钢筋与ECC的滑移量迅速增大,机械咬合力和摩擦力随之减小,接触界面也逐渐被磨平。试件内部破坏情况如图5所示,试件破坏类型为剪切-拔出破坏,由于ECC中的纤维抑制了混凝土中裂缝的发展,试件表面无明显裂缝。

4)残余阶段(CD):钢筋连同螺纹间ECC被缓缓拔出,黏结应力主要取决于拔出界面滑动摩擦力,由于钢筋的拔出界面趋向平滑,残余黏结应力变化较小。

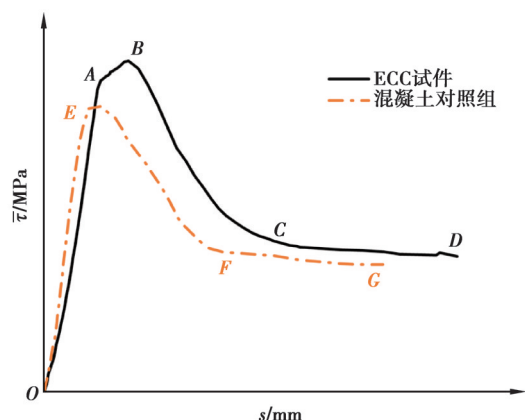


图4 典型黏结应力-滑移曲线

Fig. 4 Typical bond stress-slip curves



图5 试件内部破坏情况

Fig. 5 Internal damage of the specimens

3 影响黏结强度的因素

3.1 钢筋锈蚀率

图6是不同锈蚀率下锈蚀螺纹钢筋与ECC的平均黏结应力-滑移曲线,图7是不同锈蚀率下黏结强度对比。由图可知,当锈蚀率由0增加到5%,试件黏结强度提高了6.5%,残余黏结应力提高了10.37%,钢筋锈蚀率较小时,锈蚀产物体积膨胀,ECC提供的握裹力增强,黏结强度和残余黏结应力提高;当钢筋锈蚀率由5%增加到15%,试件的黏结强度下降了20.04%,残余黏结应力下降了57.91%,锈蚀率继续增大时,螺纹钢筋横肋有效高度减小,黏结应力传递速度加快,机械咬合力减小,黏结强度降低。试件黏结强度和残余黏结应力随钢筋锈蚀率的增加先增大后减小,说明存在钢筋临界锈蚀率使得试件黏结性能最好。

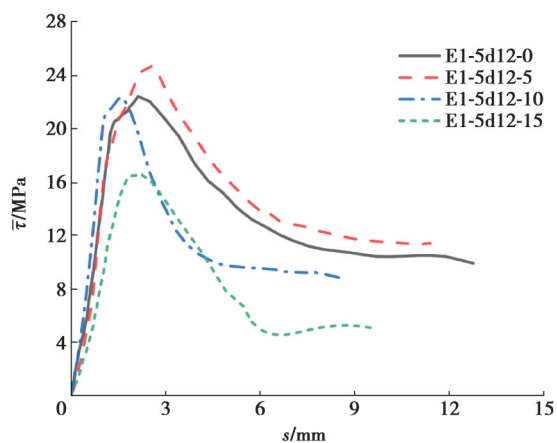


图6 不同锈蚀率下平均黏结应力-滑移曲线

Fig. 6 Bond stress-slip curve under different corrosion rates

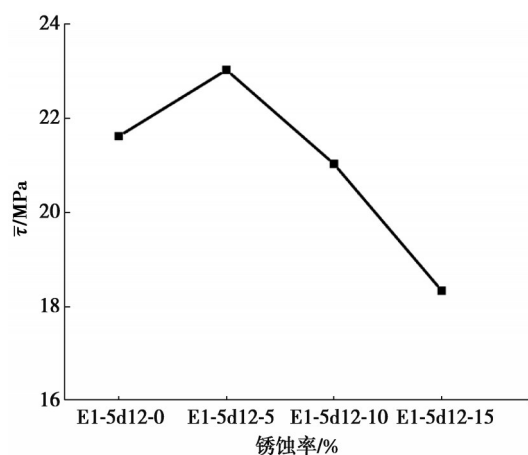


图7 不同锈蚀率下黏结强度对比

Fig. 7 bond strength under different corrosion rates

3.2 黏结锚固长度

图8为锈蚀率为10%时,不同锚固长度下平均黏结应力-滑移曲线。由图可知,随着锚固长度的增加,黏结强度减小,锚固长度5d试件的黏结强度是12d试件的1.81倍,这归因于黏结应力在黏结锚固区域内沿钢筋方向分布不均匀,随着黏结锚固长度的增加,高应力区长度减小,从而黏结强度减小。

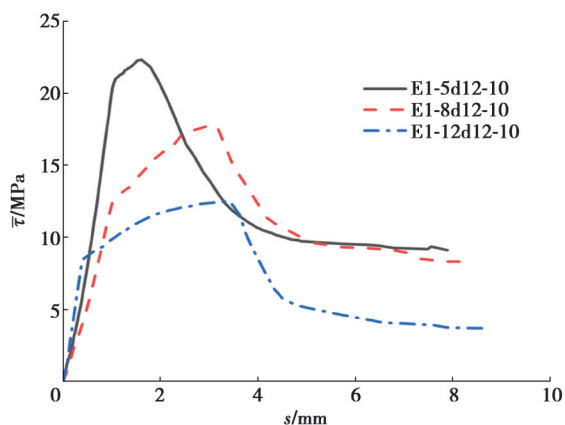


图 8 不同锚固长度下平均黏结应力-滑移曲线

Fig. 8 Bond stress-slip curve under different anchorage lengths

3.3 钢筋直径

图 9 为钢筋锈蚀率 10% 时,不同钢筋直径下平均黏结应力-滑移曲线,图 10 为试件黏结强度对比图。由图可知,钢筋直径增大,微滑移阶段曲线上升斜率减小,黏结刚度减小。黏结强度和残余黏结应力随钢筋直径的增大明显减小,钢筋直径 18 mm 与 10 mm 的试件相比,黏结强度和残余黏结应力分别下降了 48.81% 和 58.06%,这是由于钢筋的相对肋高和肋距随钢筋直径的增大而减小,相对黏结面积也随之减小,使得钢筋与 ECC 之间的机械咬合力相对较小,黏结强度和残余黏结应力降低。

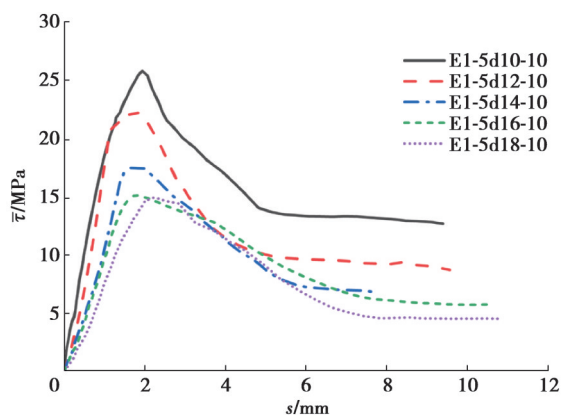


图 9 不同直径下平均黏结应力-滑移曲线

Fig. 9 Bond stress-slip curve under different rebar diameter

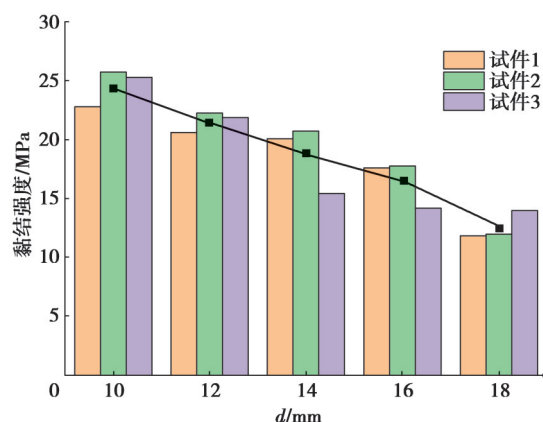


图 10 不同钢筋直径黏结强度对比

Fig. 10 bond strength under different rebar diameter

3.4 纤维掺量

图 11 为钢筋锈蚀率 10% 时,不同纤维掺量下平均黏结应力-滑移曲线对比图。由图可知,黏结强度随纤维体积掺量的增加先增大后减小,纤维体积掺量为 2% 时,ECC 与锈蚀钢筋的黏结强度和残余黏结应力最大。这是因为拉拔过程中黏结应力主要取决于 ECC 与钢筋的机械咬合力和 ECC 对钢筋提供的握裹力,纤维体积掺量 2% 时,ECC 的综合力学性能最优^[13-15]。

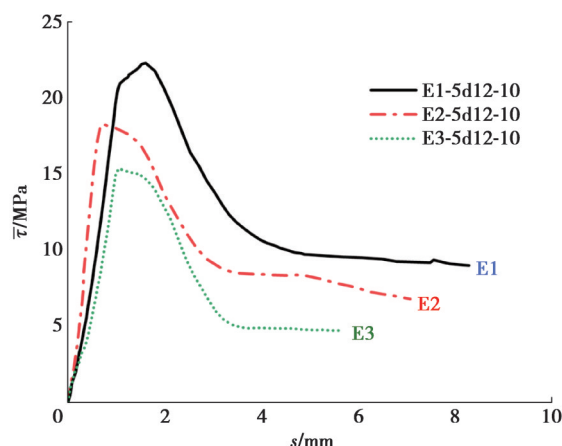


图 11 不同纤维掺量下平均黏结应力-滑移曲线

Fig. 11 Bond stress-slip curve under different fiber content

4 黏结韧性指数

美国材料与试验协会 (ASTM) C1018 利用能量比值法计算黏结韧性指数^[16], 文中依据能量比值法并结合 ECC 与锈蚀钢筋平均黏结应力-滑移曲线的特点, 提出适用于 ECC 与锈蚀螺纹钢筋的黏结韧性指数计算方法, 计算公式为

$$I_{1.0} = \frac{S_{OABE}}{S_{OAD}}, \quad (2)$$

$$I_{0.5} = \frac{S_{OAGF}}{S_{OAD}}, \quad (3)$$

式中: $I_{1.0}$ 和 $I_{0.5}$ 分别为达到黏结强度时和黏结强度下降至 50% 时, 对应的黏结韧性指数, 如图 12 所示, S_{OAD} 为纤维桥接作用开始对应曲线下的面积 ($\text{kN} \cdot \text{mm}$); S_{OABE} 和 S_{OAGF} 分别为达到黏结强度时和黏结强度下降至 50% 时对应曲线下的面积 ($\text{kN} \cdot \text{mm}$)。

表 5 是黏结韧性指数的计算结果, 在钢筋直径、钢筋外形、锈蚀率相同情况下, 黏结韧性指数 $I_{1.0}$ 和 $I_{0.5}$ 都随纤维体积掺量的增加先增大后减小, 在纤维体积掺量为 2% 时, 黏结韧性指数最高, 曲线最饱满, 纤维的增韧和阻裂效果最明显。

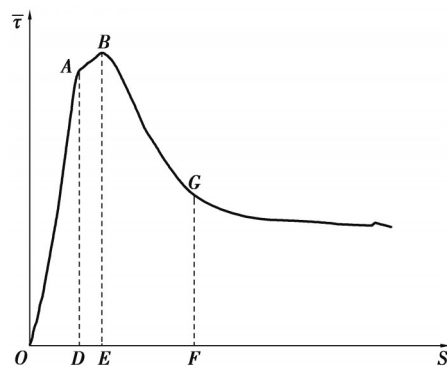


图 12 韧性指数定义

Fig. 12 Definitions of toughness indices

表 5 黏结韧性指数计算结果

Table 5 Calculation results of toughness indices

试件	纤维掺量/%	S_{OAD}	S_{OABE}	S_{OAGF}	$I_{1.0}$	$I_{0.5}$
E2-5d12-10	1.75	8.36	16.30	40.17	1.95	4.81
E1-5d12-10	2.00	10.35	21.86	63.38	2.18	6.12
E3-5d12-10	2.25	7.28	13.75	28.78	1.89	3.96

5 结 论

1) ECC 与锈蚀钢筋的典型黏结应力-滑移曲线可分为微滑移阶段、滑移阶段、破坏阶段和残余阶段。纤维的桥接作用大量吸收和耗散滑移过程中产生的能量, 抑制了裂缝的发展, 试件破坏类型为剪切-拔出破坏。

2) 试件黏结强度和残余黏结应力随着钢筋锈蚀率的增加先增大后减小, 存在临界钢筋锈蚀率使得锈蚀钢筋与 ECC 的黏结性能最好。

3) 钢筋锈蚀率为 10% 时, 试件黏结强度随钢筋锚固长度和钢筋直径的增大而减小, 其中, 锚固长度 5 d 试

件的黏结强度是12 d试件的1.81倍。

4)随着纤维体积掺量的增加,黏结韧性指数和黏结强度先增大后减小,纤维体积掺量2%时纤维的增韧和阻裂效果最明显。

参考文献

- [1] Victor C, Li S W, Cynthia W. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483-492.
- [2] Li M, Li V C. High-early-strength engineered cementitious composites for fast, durable concrete repair-material properties[J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(1):3-12.
- [3] Rokugo K, Kanda T, Yokota H, et al. Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan[J]. Materials & Structures, 2009, 42(9):1197-1208.
- [4] 陈文永, 陈小兵, 丁一. ECC高性能纤维增强水泥基材料及其应用[J]. 工业建筑, 2010, 40(S1): 768-772.
Chen W Y, Chen X B, Ding Y. ECC high performance fiber reinforced cement-based material and its application[J]. Industrial Construction, 2010, 40(S1): 768-772.(in Chinese)
- [5] 林红威, 赵羽习. 变形钢筋与混凝土黏结性能研究综述[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 11-27.
Lin H W, Zhao Y X. Bond behavior between concrete and deformed steel bar: a review[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 11-27.(in Chinese)
- [6] 林红威, 赵羽习, 郭彩霞, 等. 锈胀开裂钢筋混凝土粘结疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 98-107.
Lin H W, Zhao Y X, Guo C X, et al. Fatigue of the bond behavior of corroded reinforced concrete with corrosion-induced cracks[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 98-107.(in Chinese)
- [7] 刘曙光, 邓轶涵, 张菊, 等. PVA纤维水泥基复合材料与钢筋粘结性能研究[J]. 功能材料, 2016, 47(1): 1110-1116.
Liu S G, Deng Y H, Zhang J, et al. Research on bond behavior between PVA fiber reinforced cementitious composites and rebar [J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(1): 1110-1116.(in Chinese)
- [8] 米渊, 潘金龙, 周青山. 钢筋与纤维增强水泥基复合材料粘结性能试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(15): 69-73.
Mi Y, Pan J L, Zhou Q S. Experimental study on bond behavior between steel bars and patterned vertical alignment engineered cementitious composite[J]. Building Structure, 2016, 46(15): 69-73.(in Chinese)
- [9] Chao S H, Naaman A E, Parra-Montesinos G J. Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fiber-reinforced cement composites[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(6): 897-906.
- [10] Cai J M, Pan J L, Tan J W, et al. Bond behaviours of deformed steel rebars in engineered cementitious composites (ECC) and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119082.
- [11] Che J, Wang D, Liu H, et al. Mechanical Properties of desert sand-based fiber reinforced concrete (DS-FRC) [J]. Applied Sciences, 2019, 9(9):1857.
- [12] An X, Che J L, Liu H F, et al. Study on freeze-thaw resistance with NaCl of desert sand engineering cement composites[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2021, 121: 102954.
- [13] 白亮, 周枫, 谢鹏飞, 等. 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 108-113.
Bai L, Zhou F, Xie P F, et al. Experimental research on mechanical properties of engineered cementitious composites[J]. Industrial Construction, 2017, 47(6): 108-113.(in Chinese)
- [14] 生兆亮, 辛欣, 夏多田, 等. 纤维增强水泥基材料强度和微结构的影响因素研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3108-3114.
Sheng Z L, Xin X, Xia D T, et al. Influence factors of strength and microstructure of fiber reinforced cement-based materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(10): 3108-3114.(in Chinese)
- [15] 谢磊, 李庆华, 徐世琅. 纤维掺量对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料动态压缩性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 3086-3100.
Xie L, Li Q H, Xu S L. Influence of fiber volume fraction on dynamic compressive properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 3086-3100.(in Chinese)
- [16] ASTM C1018-97 Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading) [S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 1997.

(编辑 陈移峰)