复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

外部粘贴CFRP-ECC粘结性能的影响因素试验

丛龙宇 张方 钱永久

Test of factors affecting bonding performance of externally bonded CFRP-ECC

CONG Longyu, ZHANG Fang, QIAN Yongjiu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240617.006

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

木材表面初始损伤对CFRP-木材界面粘结性能的影响

Effects of preexisting surface damage on bonding performance at CFRP-wood interfaces

复合材料学报. 2023, 40(8): 4720-4732 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.003

端部嵌贴CFRP板加固钢筋混凝土结构的斜嵌段粘结性能试验

Experiment of bonding performance of inclined embedded section of RC structure reinforced with near-end enhanced embeded CFRP strip

复合材料学报. 2024, 41(2): 871-883 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230530.001

BFRP筋与钢-PVA混杂ECC粘结性能

Adhesion properties of BFRP reinforcement and steel-PVA hybrid ECC

复合材料学报. 2023, 40(6): 3499-3512 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220819.004

钢绞线网增强ECC与混凝土刻槽式界面粘结性能试验

Experimental on bond properties of grooved interface between high-strength steel wire mesh reinforced ECC and concrete

复合材料学报. 2023, 40(5): 2913-2925 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220721.001

固化与试验温度对环氧树脂及表层嵌贴CFRP-混凝土界面粘结性能的影响

Effect of curing and ambient temperature on properties of epoxy resin and bond behavior of near-surface-mounted CFRP-concrete interface

复合材料学报. 2022, 39(11): 5512-5524 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220801.001

冻融循环对CFRP-烧结粘土砖界面粘结性能影响

Effects of freeze-thaw cycles on interfacial bonding property of CFRP-sintered clay brick

复合材料学报. 2020, 37(9): 2294-2302 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200111.002

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 42 卷 第 3 期 3 月 2025 年
Vol. 42 No. 3 Mar 2025

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20240617.006

外部粘贴 CFRP-ECC 粘结性能的影响因素试验

分享本文

丛龙宇，张方*，钱永久
（西南交通大学 土木工程学院，成都 610031）

摘 要：外部粘贴碳纤维增强聚合物 (CFRP) 的加固方法常常由于 CFRP 的过早脱粘而造成加固效果不佳。在 CFRP 与混凝土之间设置一层工程水泥基复合材料 (ECC) 能够改善这一状况。为研究外部粘贴 CFRP-ECC 粘结性能的影响因素，对 20 个试件进行双剪试验，考虑的因素包括 ECC 表面是否打磨、ECC 拉伸强度、CFRP 宽度、厚度、粘贴长度、粘结层剪切模量等。结果表明：ECC 表面打磨对粘结关系有显著影响，打磨组试件的极限载荷提高了 58.34% 至 101.44%。增加 CFRP 的厚度是提高 CFRP-ECC 粘结性能的一项非常有效的方法，将 CFRP 的厚度从 0.127 mm 增加到 0.217 mm 后，极限载荷提高了 54.34%。将 ECC 的抗拉强度从 0.8 MPa 提高到 2.8 MPa 后，极限载荷增加了 25.40%。当抗拉强度超过 2.8 MPa 时，由于 ECC 的强度较高，ECC 中持力长度变短，导致有效粘结长度减少，最终导致极限载荷降低。此外，粘结层剪切模量对粘结关系的影响较小。

关键词：ECC；CFRP；双剪试验；粘结性能；参数敏感性分析

中图分类号：U445.6；TB332 **文献标志码**： A **文章编号**： 1000-3851(2025)03-1532-17

Test of factors affecting bonding performance of externally bonded CFRP-ECC

CONG Longyu , ZHANG Fang* , QIAN Yongjiu
(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The reinforcement method of externally applied carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is often ineffective due to premature debonding of CFRP. This situation can be improved by placing a layer of engineered cementitious composite (ECC) between CFRP and concrete. In order to investigate the factors affecting the bond performance of externally applied CFRP-ECC, twenty specimens were subjected to double shear tests, and the factors considered included whether the ECC surface was polished or not, the tensile strength of ECC, the width and thickness of CFRP, the length of adhesion, and the shear modulus of the adhesive layer, etc. The results show that the ECC surface is not polished, and the ECC is not polished. The results show that ECC surface sanding has a significant effect on the bond relationship, and the ultimate loads of the sanded group of specimens increase by 58.34% to 101.44%. Increasing the thickness of CFRP is a very effective way to improve the bonding performance of CFRP-ECC. Increasing the thickness of CFRP from 0.127 mm to 0.217 mm increases the ultimate load by 54.34%. Increasing the tensile strength of ECC from 0.8 MPa to 2.8 MPa increases the ultimate load by 25.40%. When the tensile strength exceeds 2.8 MPa, the holding length in the ECC becomes shorter due to the higher strength of the ECC, which leads to the reduction of the effective bond length, and ultimately leads to the reduction of the ultimate load. In addition, the shear modulus of the bond layer has a small effect on the bond relationship.

收稿日期：2024–04–17; **修回日期**：2024–05–21 ; **录用日期**：2024–06–11 ; **网络首发时间**：2024–06–18 14:56:22
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240617.006
基金项目：国家自然科学基金 (51778532); 中国工程院重点咨询项目 (2015-05-ZD-002)
National Natural Science Foundation of China (51778532); Key Consultancy Projects of the Chinese Academy of Engineering (2015-05-ZD-002)
通信作者：张方, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为应用工程水泥基复合材料的混凝土桥梁结构性能提升技术
E-mail: fangzhang@home.swjtu.edu.cn
引用格式：丛龙宇, 张方, 钱永久. 外部粘贴 CFRP-ECC 粘结性能的影响因素试验 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(3): 1532-1548.
CONG Longyu, ZHANG Fang, QIAN Yongjiu. Test of factors affecting bonding performance of externally bonded CFRP-ECC[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(3): 1532-1548(in Chinese).

Keywords：ECC；CFRP；double shear test；bonding performance；parametric sensitivity analysis

桥梁是基础交通设施的重要组成部分，随着中国经济持续发展以及基础建设工作的稳健推进，中国已成为世界桥梁数量最多的国家之一。虽然我国桥梁建造事业热火朝天，但是在桥梁运营阶段，随着车辆数量激增、车辆超载日益频发以及超期限服役、外部环境侵蚀、结构性能劣化等一系列问题，我国一大批桥梁将提前达到使用寿命[1]。传统加固方法，诸如增大截面法[2-3]、外贴钢板法[4]以及体外预应力法[5]等，虽然能够提高结构的承载能力，但是由于方法本身的缺陷和施工过程中暴露出的诸多问题，限制了其应用前景。与传统混凝土桥梁加固方法相比，外部粘贴(Externally bonded，EB)碳纤维增强聚合物(Carbon fiber reinforced polymer，CFRP)加固技术具有许多重要的优势：(1) CFRP 的弹性模量与钢材接近，而抗拉强度可达到钢材的 10 倍，密度仅为钢材的 15%~20%[6-7]；(2) 具有良好的耐久性，尤其表现在耐腐蚀性方面[8]；(3) 能够承受重复载荷和疲劳荷载[9]；(4) 易于加工并保障施工质量，最大限度地利用材料性能[10-11]。

然而，外部粘贴 CFRP 的加固方法在实际应用时，往往出现粘结层的破坏，进而造成 CFRP 过早脱粘的现象。此时 CFRP 还未达到抗拉强度，加固梁就已经破坏[12]，因此，CFRP 的材料利用率通常都较低。造成这一现象的原因是混凝土开裂后，裂缝与粘结层间的相对运动将引发平行于粘结层方向的剪应力集中现象。随着裂缝的产生与发展，剪应力也将随之增加，当达到粘结层的极限强度后，CFRP 出现脱粘现象。为解决这一问题，科研人员从改变 CFRP 的粘贴方式和附加锚固两个方面进行了研究。Abdallah 等[13]和 Al-Abdwais 等[14]发现近表面安装技术(Near surface mounted，NSM)优于外部粘贴技术，能够提高 CFRP 的利用率。Hosen 等[15]对侧面近表面安装技术(Side near surface mounted，SNSM)进行研究，研究发现，SNSM-CFRP 梁的承载能力得到了显著的提升，同时具有一定的延性性能。附加锚固主要包括锚钉[16-17]、扇形锚[18]、U 型锚[19]和纵向槽[20]等方式。附加锚固的方法不仅极大地提升了 CFRP 的利用率，而且提升了加固梁的承载能力。但是，改变 CFRP 粘贴方式和附加锚固的方法，使得 CFRP 加固梁虽然能够在钢筋屈服后出现强化阶段的特征，但是在极限状态下往往伴随着一声巨响，CFRP 发生剥离或者脱粘，试件发生破坏[21-22]，这对于加固结构是非常不利的。

因此，诞生出在 CFRP 与混凝土之间设置过渡层以减小粘结层中剪应力的新方法。工程水泥基复合材料(Engineered cementitious composite，ECC)是理想的过渡层材料。ECC 不同于混凝土材料，在拉伸作用下，ECC 表现出多裂缝开裂和类似金属的应变硬化特性[23-24]。当 ECC 材料掺入 2% 的纤维时，其单轴拉伸应变可达 3%[25-27]。因此，ECC 具有很高的延展性和裂缝控制能力。通过使用不同的纤维长度、不同的纤维含量或不同的加固技术，ECC 可以满足各种建筑的要求，例如自密实 ECC[28]、喷涂 ECC[29]、早强 ECC[30]和轻质 ECC[31]。Li 等[32]对 CFRP-ECC 复合材料加固梁的使用进行了实验研究。结果表明，CFRP-ECC 梁的抗弯承载力、抗剪承载力、延性和损伤容限(裂缝宽度和剥离程度)均有明显改善。然而，CFRP-ECC 粘结界面仍然是整个加固系统中最脆弱的部分，在 CFRP-ECC 加固梁的损坏模式中仍可观察到 CFRP 脱粘的现象[33-34]，而混凝土与 ECC 之间的剥离现象并不常见。因此，影响加固结构力学特性的主要因素是 ECC 和 CFRP 之间的相互粘结关系。

关于纤维增强聚合物(FRP)-混凝土粘结界面的研究比较多，从单纯受剪下的界面性能研究[35-39]到各种复杂条件下的界面性能研究[40-45]。FRP-混凝土的粘结关系主要与以下几个方面有关：(1) 混凝土强度；(2) FRP片材与混凝土的粘结长度；(3) FRP 片材刚度；(4) FRP 片材和混凝土界面的宽度比；(5) 胶层的性能。有关 CFRP-ECC 界面粘结性能的研究在近几年才出现，并且有关研究大多与 CFRP-ECC-混凝土复合界面有关。管品武等[46]对 CFRP-ECC-混凝土复合界面进行单剪试验，所有试件均出现 CFRP 与 ECC 层之间的剥离破坏。研究发现，试件破坏后 CFRP 片材上附着的 ECC 厚度为 3~5 mm，而且 ECC 层厚度的增加有利于提高复合界面的粘结关系。Sui 等[47]对 FRP-ECC-混凝土界面的粘结性能开展剪切试验，发现凿槽处理比开槽处理能更好地提高 FRP-ECC-混凝土界面的极限承载力，而且采用环氧树脂胶作为 FRP 与 ECC 之间的粘结剂效果最好。王娜娜[48]对 CFRP-

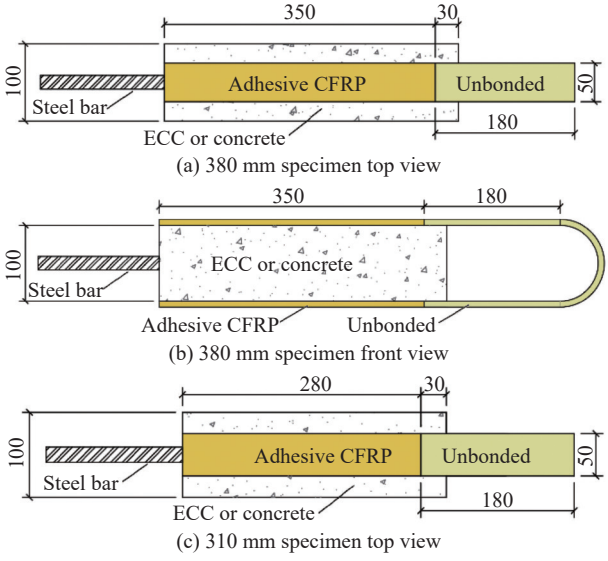
ECC-混凝土的界面性能开展单剪试验研究，考虑不同的 ECC 高度、不同的 ECC 施工方式和不同的混凝土表面处理方式因素的影响，也得到了类似的结论。陈启壮[49] 和 Zhang 等[50] 对冻融环境下 CFRP-ECC-混凝土复合界面粘结性能退化进行剪切试验，考虑混凝土和 ECC 强度、ECC 厚度、CFRP 板厚度、混凝土表面处理方式和冻融循环次数因素的影响。研究发现，使用高压水枪冲射后的表面，粘结关系最好，随着混凝土和 ECC 强度的增加，界面粘结强度有着明显的增加，而随着冻融循环次数的增加，界面极限承载力与界面粘结强度呈下降的趋势。Nie 等[51] 对磷酸镁水泥基 CFRP-ECC 的粘结关系进行试验研究，发现与环氧树脂胶粘剂相比，采用 MPC-ECC 作为粘结剂可以获得更高的复合材料界面承载力，此外，高压水枪处理后粘结界面具有良好的粘结性能。

以往的研究主要集中于 CFRP-ECC-混凝土这 3 种材料之间的粘结关系。对于 CFRP-ECC 复合加固结构而言，CFRP-ECC 的粘结部分是结构的失效点。因此，研究 CFRP-ECC 界面粘结性能的影响因素，开展参数分析和理论研究具有重要的科学意义和应用价值。本文设计并制作了 20 个 CFRP-ECC 试件，用于研究 ECC 拉伸强度、CFRP 厚度与宽度、粘结层长度与剪切模量、ECC 表面是否打磨等因素对粘结关系的影响。进一步地，借助有限元分析软件 ABAQUS，本文建立了 105 个参数分析模型，用于多变量复合影响粘结关系的深入研究。

1 试验设计

1.1 试件参数

制作了 4 个 CFRP-混凝土试件和 16 个 CFRP-ECC 试件，试件的详细构造如图 1 所示，试件的参数信息汇总于表 1。选择的变量包括 ECC 表面是否打磨、ECC 拉伸强度、CFRP 宽度和粘贴层数、CFRP 粘贴长度和粘结层剪切模量。考虑到试件的变形和拉伸试验机的行程限制，试件的尺寸分别为 380 mm×100 mm×100 mm 和 310 mm×100 mm×100 mm。与之对应的 CFRP 长度分别为 350 mm 和 280 mm，层数设置为 1、2 或 3 层，宽度设置为 50 mm、75 mm 或 100 mm。为了防止应力集中而造成破坏，在距离加载端 30 mm 处粘贴 CFRP。通过改变粘结层的厚度来改变剪切模量，粘结层选用环氧树脂，厚度设置为 1 mm 或 2 mm。为了便于加载，在试件中心穿入了一根直径为 18 mm、长度为 540 mm 的钢筋。所有试件分为 3 个系列，系列 I 为 CFRP-混凝土组。系列 II 是未打磨 ECC 表面的 CFRP-ECC 组。系列 III 为 ECC 表面打磨后粘贴 CFRP 组。



CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; ECC—Engineered cementitious composite

图 1 典型梁试件的细节 (单位：mm)

Fig. 1 Details of a typical beam specimen (Unit: mm)

1.2 材料性能

混凝土标号为 C30 和 C60，使用 MTS201 电动液压伺服压力试验机进行了混凝土强度材料性能测试，测得 C30 和 C60 标准立方体试块的平均抗压强度值分别为 31 MPa 和 62 MPa，弹性模量分别为 30 GPa 和 36 GPa。

使用了 3 种 ECC 材料，其混合比例如表 2 所示。ECC 材料的纤维含量不同，获得的拉伸强度和极限拉伸率也不同。在拉伸实验中，每种混合比例都铸造了 3 个骨头试件，狗骨头尺寸以及 ECC2 材料的应力-应变曲线如图 2 所示，单轴拉伸实验结果汇总见表 3。

CFRP 为 CJT-300I 级单向碳纤维布和环氧树脂粘合剂由制造商生产，材料参数由制造商提供，如表 4 所示。

1.3 双剪试验与数据测量

使用 WAW-300B 电液伺服万能试验机进行双面剪切试验。试验机使用的夹具是自行设计的，如图 3 所示。夹具由一个设计锚具和一个圆形滚筒组成。锚具固定在万能试验机的顶部。取下圆

表 1 试件设计

Table 1 Specimens design

Series	Number	Specimen ID	Material	Adhesive thickness/mm	Bonding length/mm	CFRP layer	CFRP width/mm
I	1	C30-1	C30	1	350	1	50
	2	C30-2	C30	1	350	2	50
	3	C60-1	C60	1	350	1	50
	4	C60-2	C60	1	350	2	50
II	5	E1-1	ECC1	1	280	1	50
	6	E1-2	ECC1	1	280	2	50
	7	E2-1	ECC2	1	280	1	50
	8	E2-2	ECC2	1	280	2	50
	9	E2-3	ECC2	1	280	3	50
	10	E2-4	ECC2	1	280	1	75
	11	E2-5	ECC2	1	280	1	100
	12	E2-6	ECC2	1	350	1	50
	13	E2-7	ECC2	2	350	1	50
	14	E3-1	ECC3	1	280	1	50
III	15	E1-1m	ECC1	1	280	1	50
	16	E1-2m	ECC1	1	280	2	50
	17	E2-1m	ECC2	1	280	1	50
	18	E2-2m	ECC2	1	280	2	50
	19	E2-4m	ECC2	1	280	1	75
	20	E3-1m	ECC3	1	280	1	50

Notes: In specimen ID, Series I uses C30 and C60 grade concrete, while Series II and III use three different ECC materials as E1, E2, E3; The specimens of the harmonized materials are differentiated by numbers; Series III specimen ID ‘m’ stands for polished. In material, ECC1, ECC2, and ECC3 represent the use of ECC materials with different PVA fiber mixing ratios, 19.5, 26, and 21.5 kg/m^3 respectively.

表 2 ECC 配合比 (单位：kg/m^3)

Table 2 Mix proportion of ECC (Unit: kg/m^3)

ID	Water	Cement	Fly ash	Fine sand	Middle sand	Grit sand	PVA fiber	Water reducer
ECC1	378	467	933	126	252	126	19.5	1.4
ECC2	378	467	933	126	252	126	26	1.4
ECC3	378	467	933	126	252	126	32.5	1.4

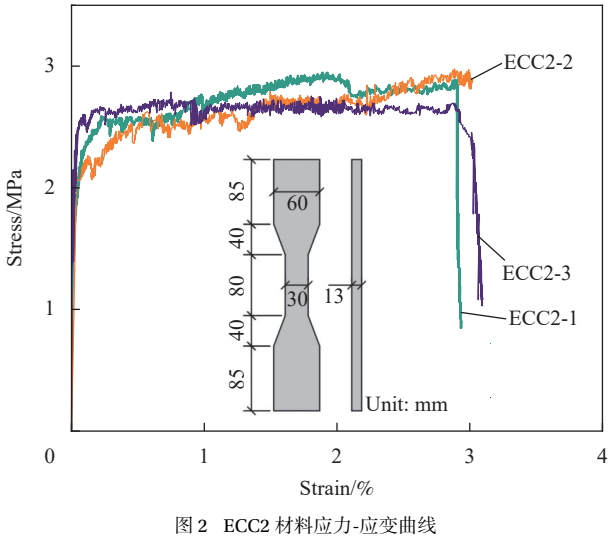


图 2 ECC2 材料应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of ECC2 material

表 3 ECC 拉伸性能参数

Table 3 Tensile property parameters of ECC

ID	Cracking strength/MPa	Ultimate strength/MPa	Ultimate strain/%
ECC1	2.10	1.94	2.2
ECC2	2.25	2.75	3
ECC3	2.30	3.09	3.4

表 4 CFRP 和粘合剂的性能参数

Table 4 Performance parameters of CFRP and adhesive

Material	Tensile strength/MPa	Tensile modulus of elasticity/GPa	Elongation/%	Bending strength/MPa
CFRP	3 525	249	1.7	744
Epoxy resin adhesive	31	2.535	1.55	53
Normal tensile bond strength of fiber-reinforced composites to concrete under external bonding conditions			3.3 MPa	

形滚筒后，试件上的 CFRP 穿过圆形滚筒，然后装回锚具上。试件上的钢筋固定在万能试验机下方。加载方案为先加载至 2 kN，用以消除 CFRP 与试验机之间的非弹性变形，随后以 0.3 mm/min 的速度继续加载至试件破坏。荷载与试验机行驶

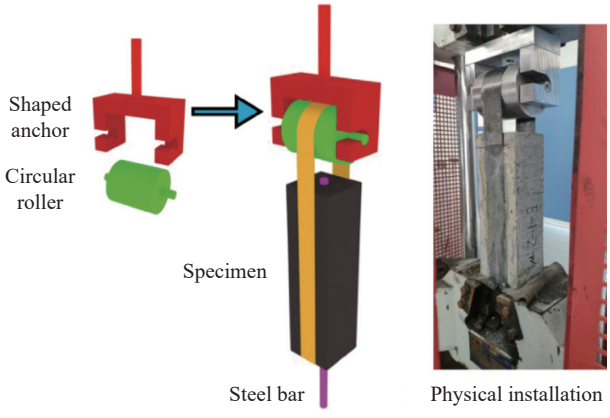
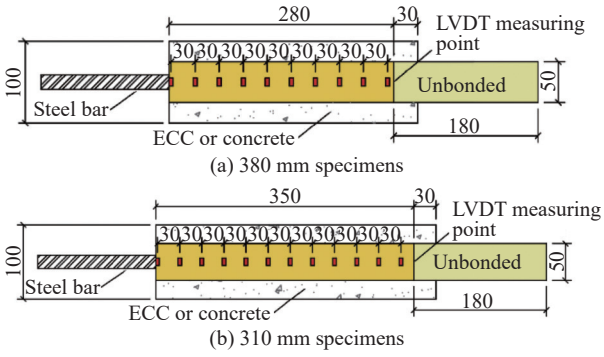


图 3　测试设备

Fig. 3　Test setup



LVDT—Linear variable differential transformer

图 4　CFRP 应变片布置 (单位：mm)

Fig. 4　CFRP strain gauge arrangement (Unit: mm)

距离由试验机采集，另外在 CFRP 上设置一个直线式位移传感器 (LVDT) 用于采集粘贴 CFRP 从 ECC 上滑移的总距离，此外，CFRP 上每间隔 30 mm 安装一个 BX120-3AA 应变片，如图 4 所示。

2　试验现象与分析

2.1　CFRP 粘贴效果与破坏模式

所有试件的破坏模式都是 CFRP 在剪切荷载下的剥离破坏，部分试件的破坏现象如图 5 所示。从 E1-1、E2-1 和 E3-1 或 E1-1m、E2-1m 和 E3-1m 的破坏模式可以发现，随着试件纤维含量的增加，从 CFRP 表面剥离的 ECC 逐渐变厚，从表面拉出的聚乙烯醇纤维 (PVA) 也越来越多，开裂时的细微拉断声也越来越明显。这说明在剥离过程中，PVA 纤维能将 CFRP 上的力传递到试件表面，并且 PVA 纤维能提供比混凝土粗骨料更大的变形。从试件 E2-1、E2-2 和 E2-3 的破坏形态可以发现，随着 CFRP 层数的增加，CFRP 撕裂出的 ECC 明显变厚，裸露的纤维变长。从试件 E2-1、E2-4 和 E2-5 的破坏形态可以发现，随着 CFRP 层的宽度变宽，CFRP 撕裂出的 ECC 也明显变厚，裸露的纤维变长。系列 III 的粘结性能最佳，在对 ECC 表面进行打磨后，CFRP 从 ECC 中剥离出来的部分明显

(a) E1-1 failure mode　(b) E1-1m failure mode

(c) CFRP stripped out ECC　(d) Fibers pulled out of the ECC surface

图 5　CFRP-ECC 界面破坏模式

Fig. 5　CFRP-ECC interface destruction model

变厚 (最大厚度约为 3 mm)，外露的纤维也变长，这是由于打磨后 ECC 与粘结层的接触面积更大，能更好地提高粘结质量。

2.2 荷载-滑移曲线

2.2.1 系列 I

系列 I 共有 4 个试件，按混凝土强度和 CFRP 层数进行区分。图 6 显示了系列 I 中试件的荷载-滑移曲线。试件的极限荷载随着混凝土强度和 CFRP 层数的增加而增加，但极限滑移的变化趋势并不明显。这是由于除了两种材料的相对刚度外，极限载荷也会对 CFRP-混凝土部分的滑移产生影响。对于两个 C60 试件，荷载-滑移曲线上有两个拐点，即软化点和剥离点。在软化点之前，粘结层处于弹性阶段，载荷-滑移曲线呈现一条直线。超过软化点后，CFRP-混凝土粘结面的刚度逐渐降低。一旦 CFRP 到达剥离点，就会开始从混凝土表面剥离，粘结截面的刚度也会显著降低。这种刚度下降一直持续到试件破坏。不过，在 C30 试件中只能观察到剥离点。

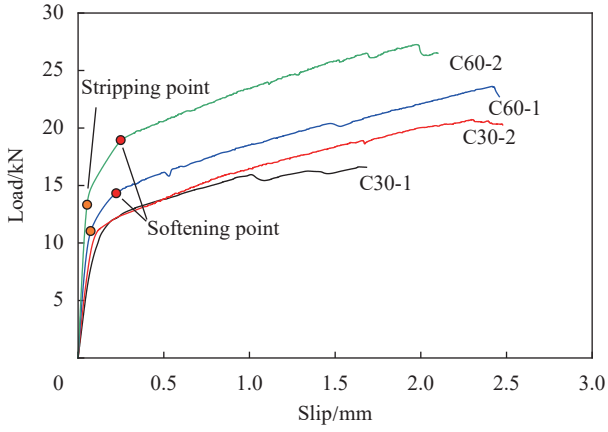


图 6 系列 I 试件 CFRP-混凝土的荷载-滑移曲线

Fig. 6 CFRP-concrete load-slip curves for series I specimens

2.2.2 系列 II

系列 II 包含 10 个 ECC 表面未打磨的试件，这些试件的 CFRP 宽度、ECC 拉伸强度和 CFRP 层数各不相同。10 个试件分为 4 组，荷载-滑移曲线如图 7 所示。图 7(a) 显示了粘结层厚度和 CFRP 粘合长度的影响。试件 E2-6 的载荷-滑移曲线是试

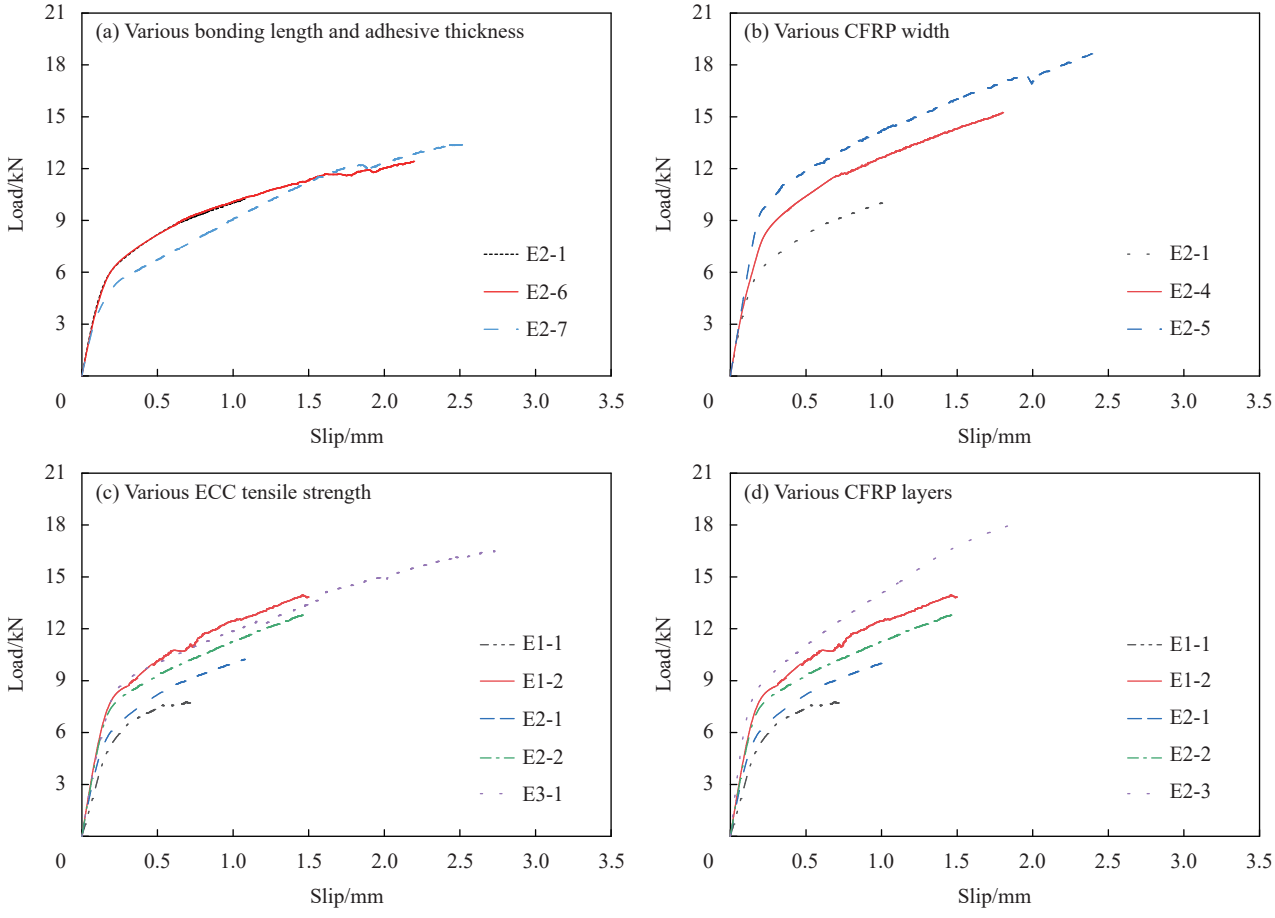


图 7 系列 II 试件 CFRP-ECC 的荷载-滑移曲线

Fig. 7 CFRP-ECC load-slip curves for series II specimens

件 E2-1 的延伸，这表明延长 CFRP 粘结长度可以延伸载荷-滑移曲线，提高极限载荷和极限滑移。随着粘结层厚度的增加，界面刚度在早期阶段降低得更快，而在后期阶段降低得更慢，这在一定程度上改善了极限载荷和极限滑移。图 7(b) 显示了 CFRP 宽度对结果的影响。试件的极限载荷和极限滑移随 CFRP 宽度的增加而增加。在 CFRP 开始剥离后，粘结层刚度降低，3 条曲线基本平行，这表明界面刚度基本不受 CFRP 宽度的影响。从图 7(c) 中可以看出，随着 ECC 拉伸强度的提高，试件的极限滑移量大幅增加，而极限载荷的变化不大。如图 7(d) 所示，随着 CFRP 层数的增加，试件的极限强度和极限滑移量随之增加，粘结截面刚度的下降速度随之减缓。

2.2.3　系列 III

系列 III 由 6 个 ECC 表面打磨试件组成，这些试件具有不同的 ECC 材料、CFRP 粘合剂宽度和 CFRP 层数，如图 8(a) 所示。总体而言，极限载荷和极限滑移会随着 ECC 抗拉强度的增加以及 CFRP 的宽度和厚度的增加而增加。具有两层 CFRP 和抗拉强度最低的 ECC 的试件 E1-2m 的结合关系最好。其原因是两层 CFRP 和 ECC 的刚度相近，使它们能够相互配合，通过协同变形而充分利用材料的抗拉强度。图 8(b) 显示了 ECC 表面打磨的效果，ECC 表面打磨对极限载荷和极限滑移有重要影响，尤其是在 ECC 材料抗拉强度较低时。当 ECC 表面的砂浆涂层被打磨后，其内部的纤维会裸露出来，能够更牢固地附着在环氧树脂粘合剂上，从而加强粘结界面。

2.3　极限荷载

所有试件的极限荷载如图 9 所示。随着混凝土强度的提高和 CFRP 厚度的增加，系列 I 试件的极限荷载也随之增加，且变化规律非常明显。由于 E2-3 试件有 3 层 CFRP，E2-5 试件的 CFRP 宽度为 100 mm，因此系列 II 试件 E2-3 和 E2-5 的极限荷载最高。通过增加 ECC 拉伸强度、CFRP 宽度、CFRP 层数和粘合剂层厚度，可以提高极限荷载。但其改善效果不如表面打磨，E1-1m 的极限荷载高于系列 II 中一半的试件，足以说明这一点。与前述结论相矛盾的是，系列 III 中试件 E1-2m 的极限荷载略高于试件 E2-2m，其原因在于 E1-2m 在加工过程中获得了更好的打磨质量。

2.4　CFRP 应变与粘结滑移

图 10 所示坐标系用于分析 CFRP 的应变。如下式所示，CFRP-ECC 的界面滑移可通过 CFRP 的应变累积得到：

$$S_i = S_{i-1} + \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2}(x_i - x_{i-1}) \tag{1}$$

式中：S_i 为 CFRP 距离自由端 x 处的滑移；ε_i 为 CFRP 距离自由端 x 处的应变；x_i 为应变点与自由端之间的距离。

双剪切试验显示了一边剥落而另一边未剥落的破坏模式。由于 CFRP 应变片仅粘贴在试件的一侧，因此只能收集到单个试件的一组数据。因此，与不同试件应变相关的破坏模式可能存在差异。部分试件在不同荷载下的界面滑移分布如图 11 所示。试件 E1-1 和 E2-1 出现非剥离破坏，试件 E2-2 和 E2-6 出现了剥离损坏。根据 CFRP 应变计算出的滑移与试验中测得的实际滑移相符合。剥

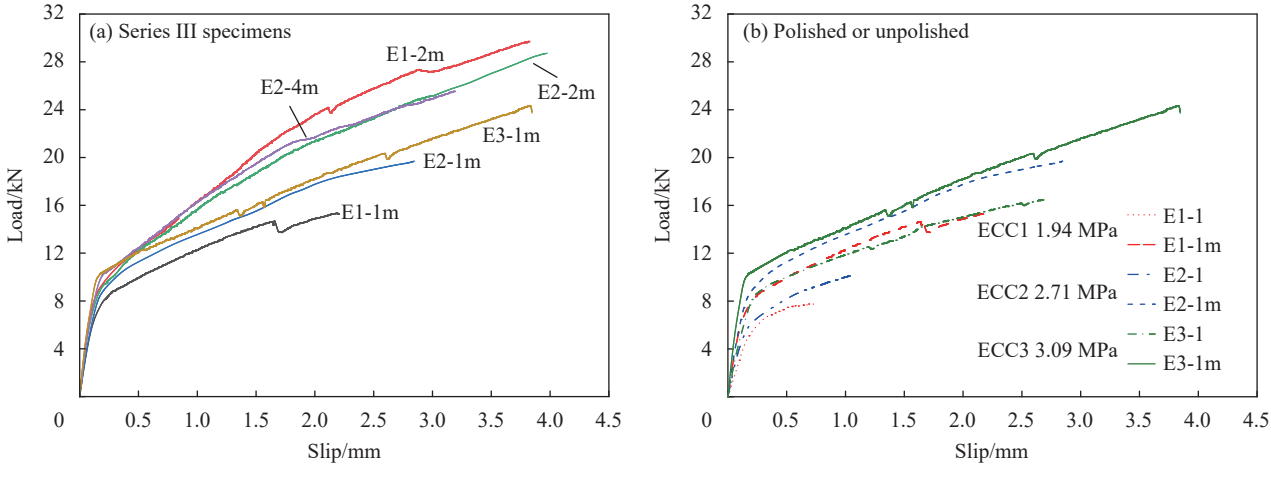


图 8　系列 III 试件 CFRP-ECC 的荷载-滑移曲线

Fig. 8　CFRP-ECC load-slip curves for series III specimens

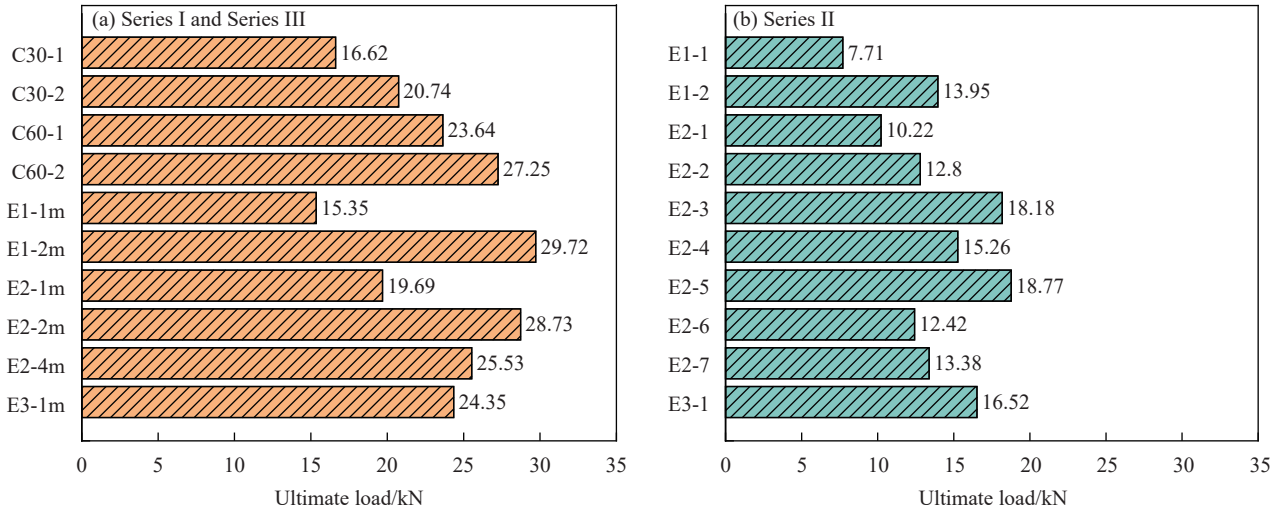


图 9　CFRP-ECC 试件和 CFRP-混凝土的极限荷载

Fig. 9　Ultimate load of CFRP-ECC specimens and CFRP-concrete specimens

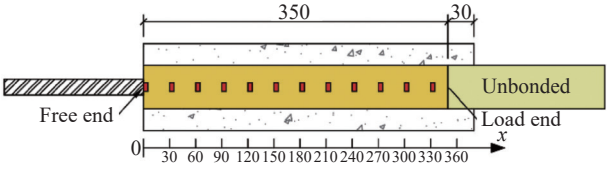


图 10　坐标系示意图 (单位：mm)

Fig. 10　Coordinate system schematic (Unit: mm)

离表面的滑移分布更类似于线性变化，而未剥离表面的滑移则呈指数分布。指数形式的滑移分布可承受有限的断裂能量，但此时 CFRP 承受载荷的长度较小，因此不会发生剥离损坏。线性滑移分布虽然可以承受较大的断裂能量，但 CFRP 有效粘结长度较大，当超过 CFRP 实际粘结长度时，就会出现 CFRP 剥离现象。因此，在分析 CFRP 与 ECC 的粘接性能时，应关注有效粘接长度 (CFRP 承受荷载的长度)。

2.5　粘结-滑移曲线

粘结-滑移关系反映了界面局部剪应力和相对滑移的发展规律。界面的剪应力可以通过用相邻测点应变的变化率来表示，如下式所示：

$$\tau(x)\,\mathrm{d}x = t_{\mathrm{f}}\,\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{f}}(x) = t_{\mathrm{f}}\,\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{f}}E_{\mathrm{f}} \tag{2}$$

式中：τ 为剪应力；σ_{f} 为 CFRP 正应力；ε_{f} 为 CFRP 应变；t_{f} 为 CFRP 的厚度；E_{f} 为 CFRP 的弹性模量。

进一步地，可以推到出相邻两应变测点间的应力计算公式：

$$\tau(x_i) = E_{\mathrm{f}}t_{\mathrm{f}}\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \tag{3}$$

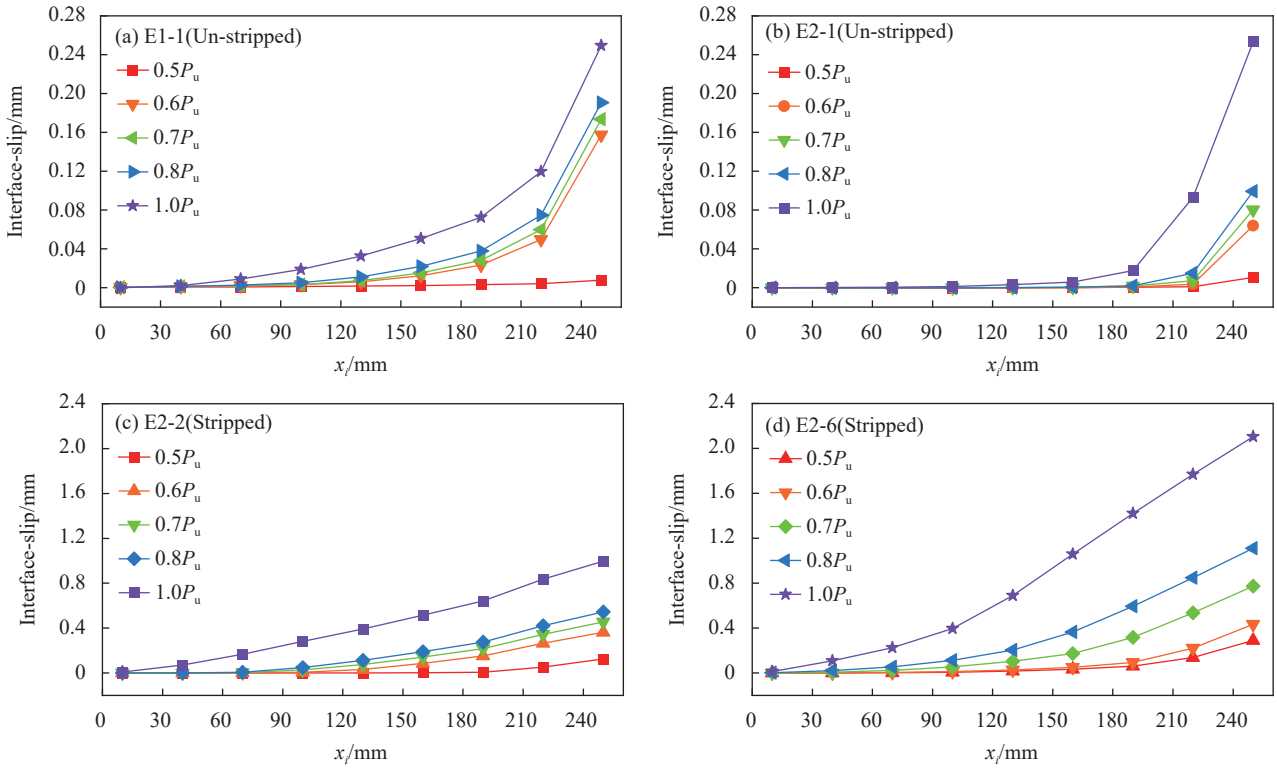
式中，$\tau(x_i)$为距离自由端x_i处碳纤维布的剪应力。选取典型试件计算得到粘结应力，得到了如图 11 所示的粘结-滑移曲线。

典型试件的粘结-滑移曲线如图 12 所示。由于试件 E1-1 和 E2-1 出现了非剥离破坏，其粘结-滑移曲线与常见粘结-滑移曲线的分布规律并不一致。两个试件的曲线表现出加载端附近的测点处剪切应力较大，而离开加载端 60 mm 后，几乎没有剪应力的存在。这是由于该表面未剥离，其受力范围仅停留在加载点附近，这与 2.4 节中截面滑移的分布形式相吻合。试件 E2-2 和 E2-6 剪应力基本符合随滑移值的增大先增大后减小的规律。曲线可以分为两个阶段，近似为双折线模型。第一阶段为从试件开始加载至达到剪应力峰值的弹性阶段，此阶段应力-滑移曲线为一段上升的直线，试件没有出现塑性损伤。随着荷载进一步地增加，剪应力开始下降，CFRP-ECC 界面出现塑性损伤，滑移开始急剧增加。当剪应力逐渐减小直至 0 时，试件达到极限滑移，CFRP 从 ECC 表面剥离。

3　有限元参数敏感性分析

3.1　基本假设

利用有限元分析软件 ABAQUS 对 CFRP-ECC 界面的粘结特性进行有限元参数分析。双剪试验模型经过了一定程度的简化，它基于以下基本假设：(1) 试件具有对称性，取 1/4 试件模型进行有限元分析；(2) 不考虑加载过程中 ECC 与钢筋之间的粘结滑移；(3) 材料的本构模型满足 3.2 节中相关理论。



P_u—Ultimate load; x_i—The horizontal coordinates shown in Fig. 10

图 11　典型试件的 CFRP-ECC 界面滑移分布

Fig. 11　Slip distribution at the CFRP-ECC interface of typical specimens

3.2　本构模型

3.2.1　ECC

现行规范中没有 ECC 材料本构的定义。考虑到 ECC 材料的塑性破坏和受压变化规律与混凝土相似，区别在于 ECC 的应变硬化特性。采用两阶段应变硬化模型模拟 ECC 的应变硬化特性[52]，如图 13(a) 所示。ECC 单轴拉伸本构模型如下所示：

$$\sigma_t^E=\begin{cases}\dfrac{\varepsilon_t^E}{\varepsilon_{tc}^E}\sigma_{tc}^E, & 0<\varepsilon_t^E<\varepsilon_{tc}^E\\ \sigma_{tc}^E+\dfrac{\varepsilon_t^E-\varepsilon_{tc}^E}{\varepsilon_{tu}^E-\varepsilon_{tc}^E}\left(\sigma_{tu}^E-\sigma_{tc}^E\right), & \varepsilon_{tc}^E<\varepsilon_t^E<\varepsilon_{tu}^E\end{cases}\tag{4}$$

式中：σ_t^E为 ECC 的拉伸应力；ε_t^E为 ECC 的拉伸应变；σ_{tu}^E为 ECC 的极限拉伸强度；σ_{tc}^E为 ECC 拉伸开裂强度；ε_{tc}^E为 ECC 开裂应变；ε_{tu}^E为 ECC 极限拉伸应变。

3.2.2　钢筋和 CFRP

CFRP 和钢筋采用了理想弹塑性应力-应变模型，如图 13(b) 所示。钢筋和 CFRP 的应力-应变模型如下所示：

$$\sigma_t^S=\begin{cases}E_t^S\varepsilon_t^S, & 0<\varepsilon_t^S<\varepsilon_{ty}^S\\ f_{ty}^S, & \varepsilon_{ty}^S<\varepsilon_t^S<\varepsilon_{tu}^S\end{cases}\tag{5}$$

$$\sigma_t^F=\begin{cases}E_t^F\varepsilon_t^F, & 0<\varepsilon_t^F<\varepsilon_{tu}^F\\ 0, & \varepsilon_t^F<\varepsilon_{tu}^F\end{cases}\tag{6}$$

式中：σ_t^S为钢筋的应力；ε_t^S为钢筋的应变；E_t^S为钢筋弹性模量；f_{ty}^S为钢筋屈服强度；ε_{ty}^S为钢筋屈服应变；ε_{tu}^S为钢筋极限应变；σ_t^F为 CFRP 的应力；ε_t^F为 CFRP 的应变；E_t^F为 CFRP 弹性模量；ε_{tu}^F为 CFRP 极限应变。

3.2.3　粘结层

环氧树脂粘合剂使用 ABAQUS 内置的 Cohesive 单元进行模拟，该单元的优点是使用牵引分离定律模拟原子晶格的粘合内聚力，避免了裂纹尖端的奇异性。内聚单元中的力分为两个阶段，如图 13(c) 所示。第一阶段是线弹性模型，在此期间没有粘结层损坏。第二阶段为破坏阶段。下式说明了如何使用二次名义应力准则 (Quads Damage) 模拟该模型中的损伤，三角形所包围的区域是材料断裂时的破裂能量。有限元模型中参数设置如表 5 所示。

$$\left(\frac{t_n}{t_n^A}\right)^2+\left(\frac{t_s}{t_s^A}\right)^2+\left(\frac{t_t}{t_t^A}\right)^2=1\tag{7}$$

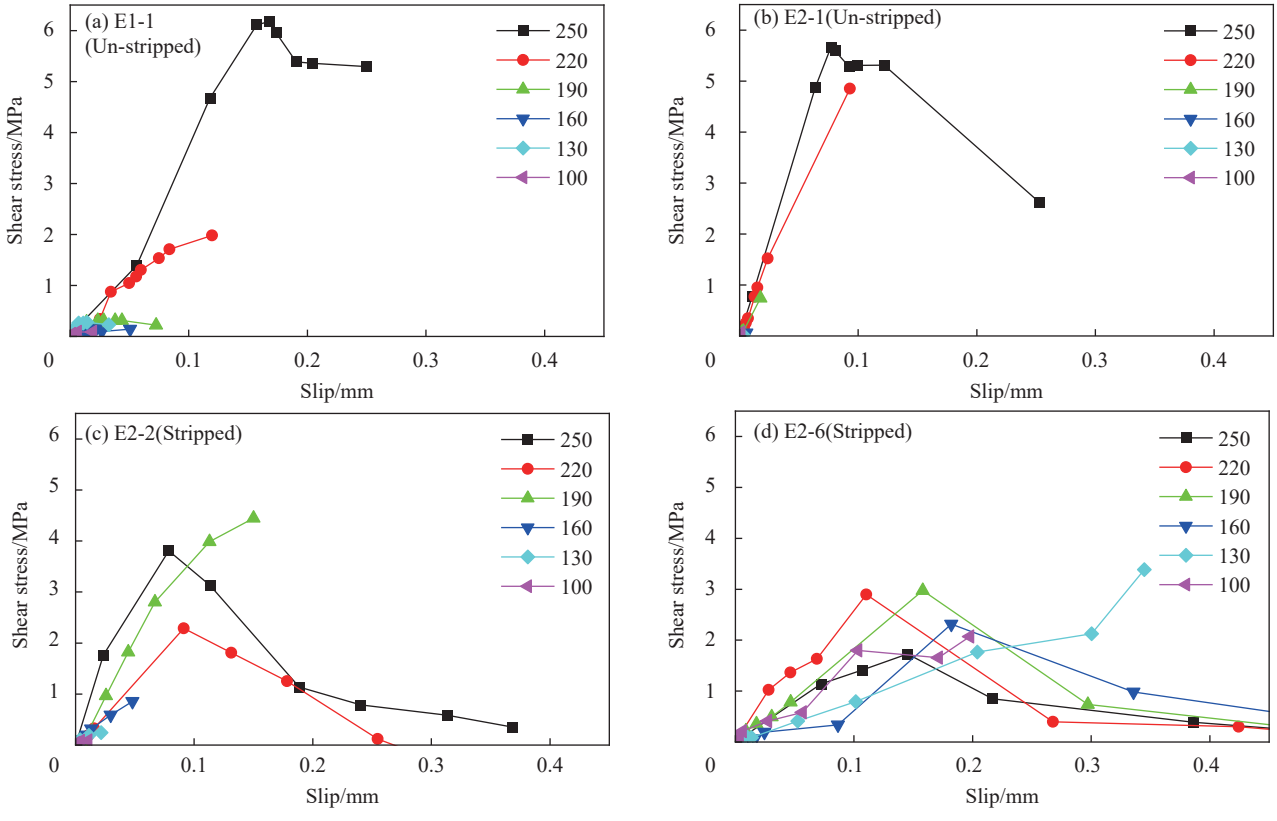
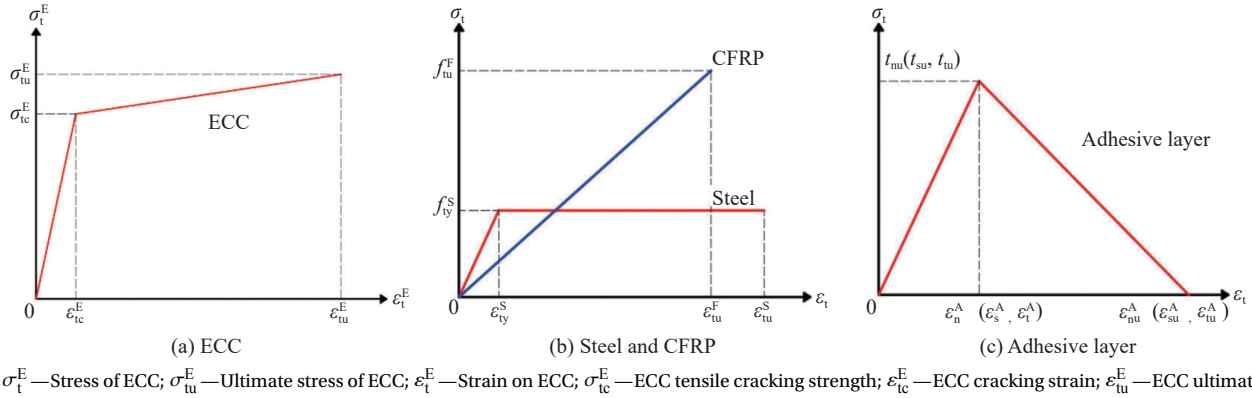


图 12　典型试件的 CFRP-ECC 粘结-滑移曲线 (图例中的数字表示图 10 所示的横坐标位置坐标)

Fig. 12　CFRP-ECC bond-slip curves for typical specimens (The numbers in the legend indicate the coordinates of the horizontal position shown in Fig.10)



σ_t^E—Stress of ECC; σ_{tu}^E—Ultimate stress of ECC; ε_t^E—Strain on ECC; σ_{tc}^E—ECC tensile cracking strength; ε_{tc}^E—ECC cracking strain; ε_{tu}^E—ECC ultimate tensile strength; σ_t—CFRP or reinforcement stress; ε_t—CFRP or reinforcement strain; f_{tu}^F—Ultimate stress of CFRP; f_{ty}^S—Yield strength of steel; ε_{ty}^S—Yield strain of steel; ε_{tu}^S—Ultimate strain of steel; ε_{tu}^F—Ultimate strain of CFRP; t_{nu} (t_{su}, t_{tu})—Pure type I (open), pure type II (slip-open) and pure type III (tear-open) stresses, respectively; ε_n^A (ε_s^A, ε_t^A)—Type I (open), type II (slide-open) and type III (tear-open) peak strain, respectively; ε_{nu}^A (ε_{su}^A, ε_{tu}^A)—Type I (open), type II (slide-open) and type III (tear-open) ultimate strain, respectively

图 13　ECC、CFRP、钢筋的本构关系

Fig. 13　Constitutive relationships of ECC, CFRP, and steel reinforcement

式中：t_n、t_s、t_t分别代表纯 I 型 (张开型)、纯 II 型 (滑开型) 和纯 III 型 (撕开型) 的应力；t_n^A、t_s^A、t_t^A 分别代表纯 I 型 (张开型)、纯 II 型 (滑开型) 和纯 III 型 (撕开型) 的极限应力。

3.3　模型建立与验证

虽然试件中两个表面的现象有所不同，但是有限元模型中两个表面以及表面的左右部分计算结果是对称分布的。因此，为了缩短有限元模型的计算时间，选取了试件的 1/4 进行计算，钢筋同样选取了 1/4 参与计算，如图 14 所示。使用位移控制加载过程，并在有限元模型的对称平面上，设置了对称约束。对称约束指约束对称平面法线

表 5　Cohesive 单元参数设置 (单位：MPa)

Table 5　Cohesive unit parameter settings (Unit: MPa)

K_{nn}	K_{ss}	K_{tt}	t_n^A	t_s^A	t_t^A
1 850	560	560	13.6	13.7	13.7

Notes: K_{nn}—Axial stiffness; K_{ss}, K_{tt}—Normal stiffness; t_n^A, t_s^A, t_t^A—Representing pure type I (open), pure type II (slip-open) and pure type III (tear-open) ultimate stresses, respectively.

方向的位移，以及约束对称平面所平行的两个坐标轴方向的转动约束。

选取 E2-6 和 E2-1m 试件进行模型验证，试件 E2-1m 的破坏过程如图 15 所示。为了便于观察，图 14 将 ECC 和胶层分开进行展示。整体来看，

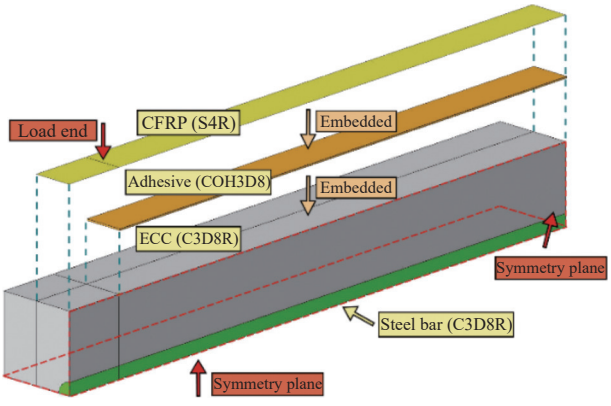
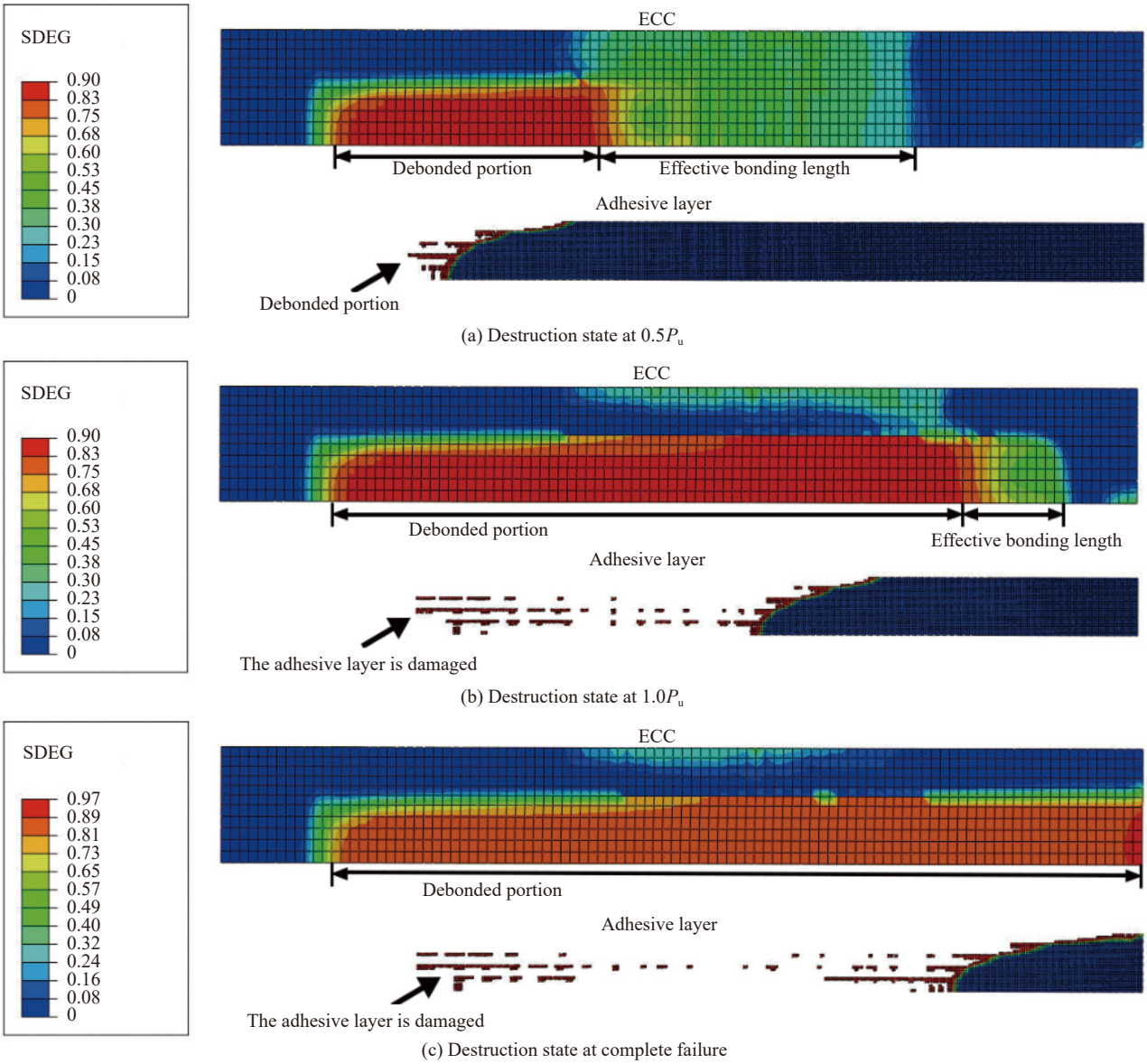


图 14　CFRP-ECC 模型构成和接触定义

Fig. 14　CFRP-ECC model composition and contact definition



(a) Destruction state at $0.5P_u$

(b) Destruction state at $1.0P_u$

(c) Destruction state at complete failure

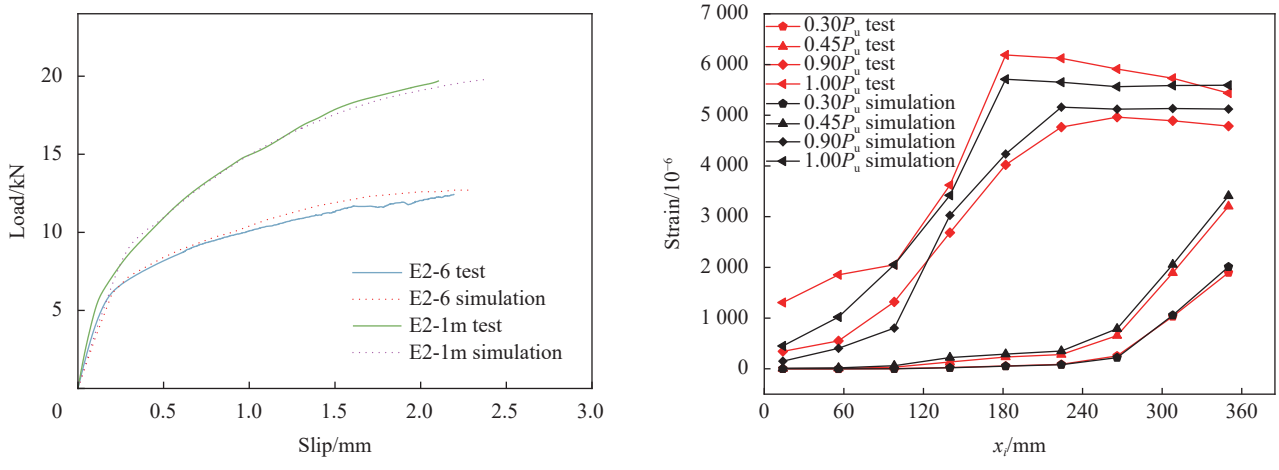
SDEG—Overall scalar stiffness degradation

图 15　CFRP-ECC 有限元模型破坏过程

Fig. 15　CFRP-ECC finite element model destruction process

模拟结果与试验现象吻合。图中 ECC 中红色部分为已经损伤无法承受荷载区域，绿色部分为正在承受剪力的部分，绿色部分的总长度即为有效粘结长度。可以发现，ECC 中红色区域的面积大于胶层中脱粘部分的面积，这是由于 ECC 中红色部分已经损伤失效，而此时粘结层仍未脱粘，因此。损伤的 ECC 表层将受到粘结层的作用而出现剥离现象。这充分解释了 CFRP 剥离时携带一层 ECC 材料的内在原因。

模拟的荷载-滑移曲线与试验结果基本一致，如图 16(a) 所示。在较低的滑移量下，测试斜率较大，而在较高的滑移量下，模拟结果较小。图 16(b) 显示了 E2-6 的 CFRP 应变分布值。在载荷较小时，它们的结果非常一致。随着荷载的增加，数据的离散度逐渐增大，但在应变突变时，两者表现出相同的变化趋势。和试验结果相比较，有限元模拟的结果是准确的。该模型能够用于对 CFRP-ECC 界面粘结性能进行参数敏感性分析。



(a) Load-slip curves (b) CFRP strain distribution

图 16 CFRP-ECC 模型测试数据与模拟数据的比较

Fig. 16 Comparison of CFRP-ECC model test data with simulated data

3.4 单变量参数分析

通过有限元模型对 3 个影响因素进行了参数敏感性分析，以确定它们如何影响 CFRP-ECC 粘合界面的性能，考虑的变量包括 CFRP 刚度、粘结层剪切刚度和 ECC 极限拉伸强度。为研究单一变量的影响，ECC 开裂强度和极限拉伸应变均保持不变。表 6 总结了所有分析模型的设计参数。总共建立了 105 个有限元模型，其中包含 30 个单变量模型和 75 个双变量模型。本小节仅讨论单一变量的影响，双变量的影响将用于后续的理论推导。

表 6 CFRP-ECC 参数分析试件信息

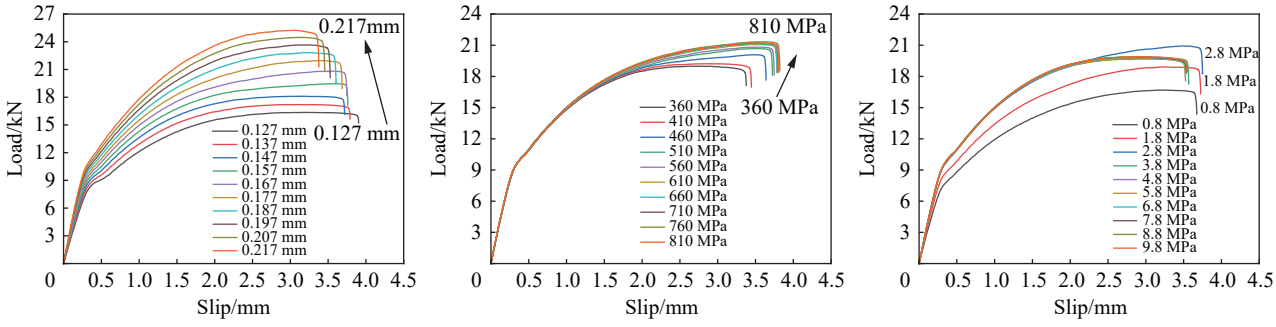
Table 6 Parametric analysis specimens information of CFRP-ECC

Variant	ID	ECC tensile strength/MPa	Adhesive layer shear modulus/MPa	CFRP thickness/mm
Single variable	1-10	3.8	560	0.127-0.217
	11-20	3.8	360-810	0.167
	21-30	0.8-9.8	560	0.167
Two variables	31-55	7	360-810	0.127-0.227
	56-80	3-12	360-810	0.167
	81-105	3-12	560	0.127-0.227

3.4.1 荷载-滑移曲线

图 17(a) 显示了 CFRP 厚度的影响。当 CFRP 的厚度从 0.127 mm 增加到 0.217 mm，极限载荷增加了 54.34%，如图 18(a) 所示。随着 CFRP 厚度的增加，CFRP 刚度也随之增加，极限滑移因此减小，而有效粘接长度逐渐增加。与极限载荷的增加相比，极限滑移的减少并不明显。因此，提高 CFRP-ECC 粘接性能的一个非常有效的方法就是增加 CFRP 的厚度。

图 17(b) 显示了粘结层剪切模量的影响。当剪



(a) CFRP thickness (b) Adhesive layer shear modulus (c) ECC tensile strength

图 17 单变量的 CFRP-ECC 荷载-滑移曲线

Fig. 17 Single variable CFRP-ECC load-slip curves

切模量从 360 MPa 增加到 810 MPa 时，极限载荷只增加了 12.34%，极限滑移几乎没有增加，如图 18(b) 所示。这表明 CFRP-ECC 粘结相互作用并没有受到粘结层剪切模量的显著影响。粘结层剪切模量增加所带来的承载能力提升与加固截面的效果类似。

图 17(c) 显示了 ECC 拉伸强度对情况的影响。ECC 拉伸强度从 0.8 MPa 增加到 2.8 MPa 后，极限载荷增加了 25.40%，如图 18(c) 所示。当抗拉强度超过 2.8 MPa 时，荷载-滑移曲线完全重叠，极限载荷出现下降。这是由于 ECC 的拉伸强度越大，ECC 的持力长度就越短。这导致了有效粘结长度的减少，因此极限荷载降低。

3.4.2 有效粘结长度

有效粘结长度是 CFRP 中参与受力而没有发生脱粘或剥离的长度，是影响粘结性能的一个重要性质。图 19 展示了不同影响因素下的有效粘结长度。随着 ECC 拉伸强度的增加，有效粘结长度显著下降，当超过 2.8 MPa 后，维持在 240 mm 左右波动。粘结层剪切模量的改变对有效粘结长度的影响不大。CFRP 厚度与有效粘结长度成比例的线性增长，碳纤维布厚度从 0.127 mm 增加至 0.217 mm，有效粘结长度从 205.74 mm 增加至 294.90 mm。

3.4.3 峰值剪应力

峰值应力是材料能够达到的极限应力，是评价材料是否能够充分利用的衡量标准。图 20 展示了不同影响因素下的峰值剪应力。随着 ECC 拉伸强度从 0.8 MPa 增长为 9.8 MPa，峰值剪应力先显著增加，在 ECC 拉伸强度为 2.8 MPa 时存在一个拐点，之后峰值剪应力稳定在 4.5 MPa 波动。粘结层剪切模量和 CFRP 厚度对峰值剪应力的影响较小。

3.5 双变量参数分析

双变量分析的模型参数信息如表 6 所示。根据 3.3 节的分析，有限元模型的荷载-滑移曲线的基本形状是一致的，而且本文选取的影响因素对滑移的影响比较小。因此，关注极限荷载的大小，即可评价该参数配置下的粘结性能。图 21 展示了 3 个影响因素在不同组合下的双变量参数对极限荷载的影响。

图 21(a) 展示了 CFRP 厚度和胶层剪切模量的共同影响。在 CFRP 厚度较小时，增加粘结层剪

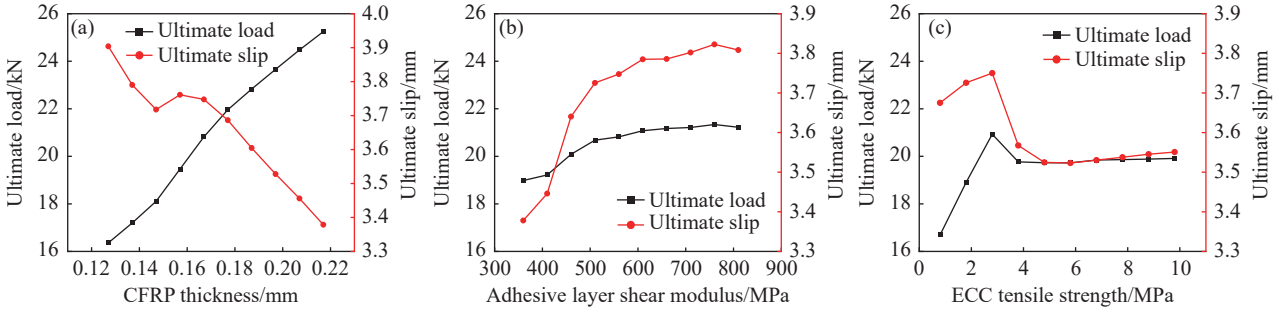


图 18 单变量的 CFRP-ECC 极限载荷和极限滑移

Fig. 18 Single variable CFRP-ECC ultimate load and ultimate slip

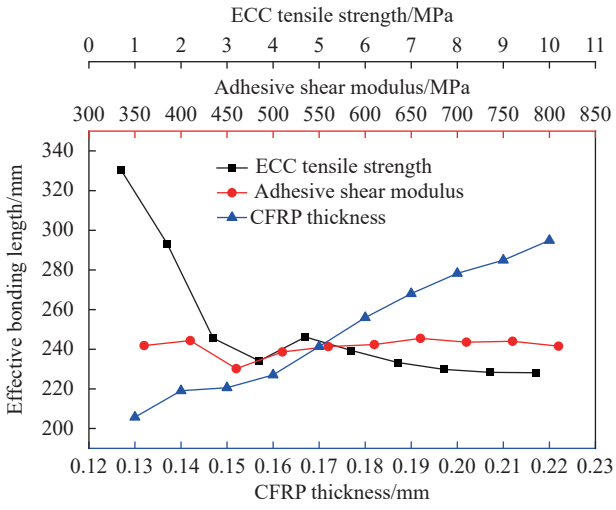


图 19　单变量下的 CFRP 有效粘结长度

Fig. 19　Effective bond length of CFRP in single variable

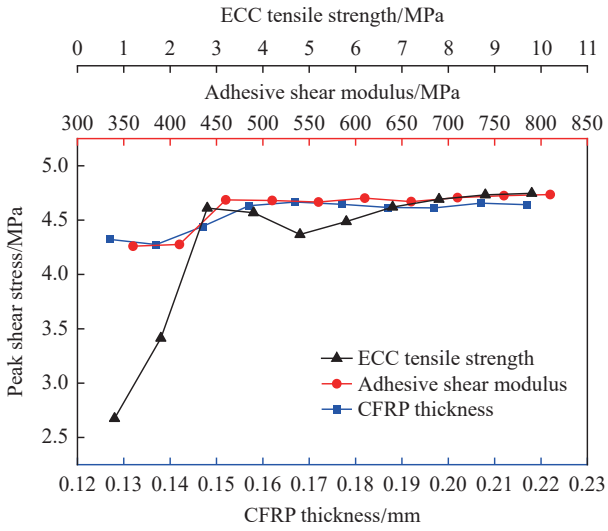


图 20　单变量下的 CFRP 峰值剪应力

Fig. 20　Peak CFRP shear stress in single variable

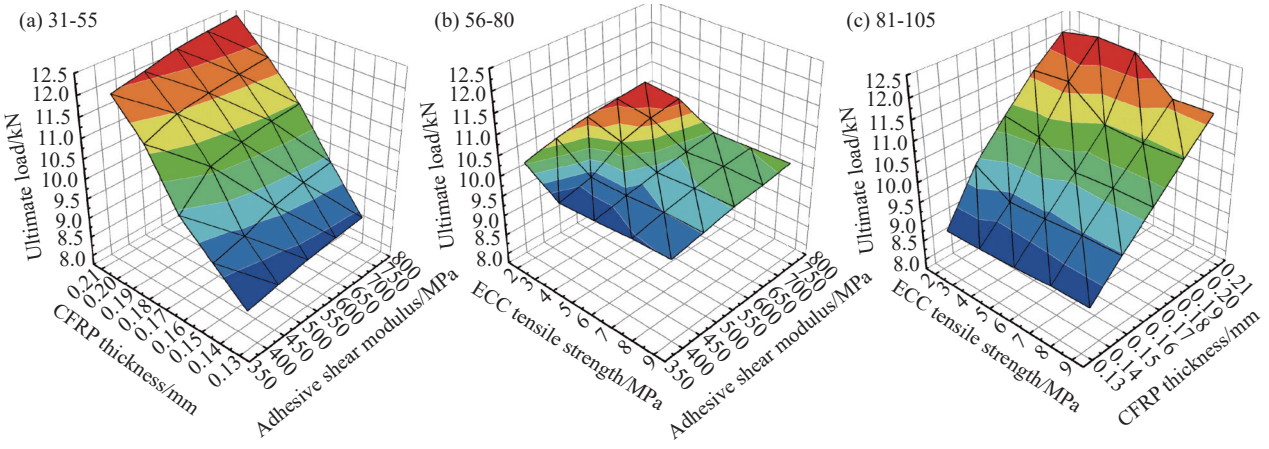


图 21　31~105 双变量模型的 CFRP-ECC 极限载荷

Fig. 21　CFRP-ECC ultimate load of 31-105 two variables models

切模量对提升极限荷载的效果相对显著，随着 CFRP 厚度增加，提升效果逐渐下降。相比之下，改变 CFRP 厚度对极限荷载的影响远大于粘结层剪切模量。

图 21(b) 展示了 ECC 拉伸强度和粘结层剪切模量的共同影响。整体来看，二者对极限荷载的影响非常微小，ECC 拉伸强度从 3 MPa 提升至 12 MPa，粘结层剪切模量从 360 MPa 提升至 810 MPa，极限荷载仅仅从 9.57 kN 增加至 10.64 kN，并且在 ECC 拉伸强度在 2.8 MPa 附近时，极限荷载较大。

图 21(c) 展示了 ECC 拉伸强度和 CFRP 厚度的共同影响。CFRP 厚度对极限荷载的影响占据主导地位，当 CFRP 厚度一定时，ECC 拉伸强度在 2.8 MPa 附近时，能够获得较大的极限荷载。

综上所述，CFRP 厚度是影响粘结关系的主要影响因素。增加 ECC 拉伸强度能够在一定程度上提升粘结关系，并且存在一个上限值，超过该值后，粘结关系将无法进一步提升。粘结层剪切模量对粘结关系的影响不大，仅对承载能力有所影响。

4　结 论

对外部粘贴碳纤维增强聚合物 (CFRP)-工程水泥基复合材料 (ECC) 粘结关系的影响因素进行了双剪切试验和有限元数值分析。得出的主要结论如下：

(1) ECC 表面打磨对碳纤维布-工程水泥基复合材料 (CFRP-ECC) 的粘结关系的影响十分显著。未打磨组极限载荷为 7.62 kN 至 18.77 kN，打磨组

极限载荷为 15.35 kN 至 29.72 kN。打磨 ECC 表面后，CFRP 从 ECC 上剥离的部分明显变厚，裸露的纤维变长，这充分说明打磨后的界面能更好地提高粘结质量；

(2) 当 CFRP 厚度从 0.127 mm 增加到 0.217 mm，极限载荷提高了 54.34%。随着厚度的增加，CFRP 刚度增加，造成极限滑移减小，但是有效粘接长度逐渐增加。通过双变量分析发现，CFRP 厚度是影响粘结关系的主要因素。因此，增加 CFRP 的厚度是提高 CFRP-ECC 粘结性能的一种非常有效的技术；

(3) 当 ECC 拉伸强度从 0.8 MPa 增加到 2.8 MPa 时，极限载荷从 16.69 kN 显著增加到 20.93 kN，而滑移基本保持不变。当 ECC 拉伸强度大于 2.8 MPa 时，荷载-滑移曲线完全重合。ECC 的强度越大，ECC 的持力长度就越短。这导致了有效粘结长度的减少，因此极限荷载降低；

(4) 粘结层剪切模量对 CFRP-ECC 的粘结关系影响较小，仅对承载能力有所提升。当粘结层剪切模量超过 510 MPa 时，对粘结关系和承载能力的影响将非常小；

(5) ECC 拉伸强度从 0.8 MPa 增加到 12 MPa 时，有效粘结强度先下降而后保持稳定，峰值剪应力先增加而后保持稳定，分界线是 2.8 MPa。CFRP 厚度与有效粘结长度成正比，而对峰值剪应力的影响较小。粘结层剪切模量对有效粘结长度和峰值剪应力的影响均较小。

参考文献：

[1] 秦权. 桥梁结构的健康监测 [J]. 中国公路学报, 2000(2): 39-44.
QIN Quan. Health monitoring of bridge structures[J]. China Highway Journal, 2000(2): 39-44(in Chinese).

[2] LIU C, ZOU Y G, ZHAO Z. Comparison of reinforcement schemes for hollow slab beam bridge of Tongji Road overpass[J]. Bridge Construction, 2018, 48(4): 118-123.

[3] 邓鸣, 张建仁, 王蕊, 等. UHPC 铺装加固斜拉桥正交异性钢桥面板 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2018, 38(1): 67-74.
DENG M, ZHANG J R, WANG R, et al. Reinforcement of orthotropic steel bridge deck for cable-stayed bridge based on UHPC paving system[J]. Chang'an Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(1): 67-74(in Chinese).

[4] 邓妃琴. 粘贴钢板法在普通钢筋混凝土连续箱梁加固中的应用 [J]. 广东公路交通, 2020, 46(2): 56-60.
DENG Feiqin. Application of adhesive steel plate method in the reinforcement of ordinary reinforced concrete continuous box girders[J]. Guangdong Highway Traffic, 2020, 46(2): 56-60(in Chinese).

[5] 艾军, 史丽远. 公路梁桥体外预应力加固设计与施工方法研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2002(5): 771-774.
AI Jun, SHI Liyuan. Research on the design and construction method of extracorporeal prestressing reinforcement for highway girder bridges[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002(5): 771-774(in Chinese).

[6] WANG C Y, SHIN C C, HONG S C, et al. Rehabilitation of cracked and corroded reinforced concrete beams with fiber-reinforced plastic patches[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(3): 219-228.

[7] ALI M S M, OEHLERS D J, PARK S M. Comparison between FRP and steel plating of reinforced concrete beams[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(9): 1319-1328.

[8] GHEORGHIU C, LABOSSIERE P, RAICHE A. Environmental fatigue and static behavior of RC beams strengthened with carbon-fiber-reinforced polymer[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(3): 211-218.

[9] AIDOO J, HARRIES K A, PETROU M F. Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polymer-strengthened reinforced concrete bridge girders[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(6): 501-509.

[10] 张宝新, 朱俊霞. 高速公路桥梁维修加固工程 [J]. 青海交通科技, 2005(5): 29-30.
ZHANG Baoxin, ZHU Junxia. Maintenance and reinforcement engineering of highway bridges[J]. Qinghai Traffic Science and Technology, 2005(5): 29-30(in Chinese).

[11] 李吉胜, 杨铁锋, 杨继禹, 等. 桥梁加固维修技术在井冈山大桥加固维修中的综合应用 [J]. 黑龙江交通科技, 2003(8): 68-69.
LI Jisheng, YANG Tiefeng, YANG Jiyu, et al. Comprehensive application of bridge reinforcement and repair technology in the reinforcement and repair of Jinggangshan Bridge[J]. Heilongjiang Traffic Science and Technology, 2003(8): 68-69(in Chinese).

[12] 娄逸群, 彭晖, 兰川云, 等. 端部嵌贴 CFRP 板加固钢筋混凝土结构的斜嵌段粘结性能试验 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 871-883.
LOU Yiqun, PENG Hui, LAN Chuanyun, et al. Bond performance test of diagonally embedded sections of reinforced concrete structures reinforced with end-inserted CFRP panels[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2): 871-883(in Chinese).

[13] ABDALLAH M, MAHMOUD F A, KHELIL A, et al. Efficiency of EB CFRP composites for flexural strengthening of

continuous RC beams: A comparative study with NSM CFRP rods[J]. Structures, 2021, 34: 1567-1588.

[14] AL-ABDWAIS A H, AL-MAHAIDI R S. Experimental and finite element analysis of flexural performance of RC beams retrofitted using near-surface mounted with CFRP composites and cement adhesive[J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112429.

[15] HOSEN M A, JUMAAT M Z, ALENGARAM U J, et al. CFRP strips for enhancing flexural performance of RC beams by SNSM strengthening technique[J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 28-44.

[16] OZBAKKALOGLU T, SAATCIOGLU M. Tensile behavior of FRP anchors in concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(2): 82-92.

[17] ZHANG H W, SMITH S T. FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors[J]. Composite Structures, 2012, 94(2): 403-414.

[18] ZHANG H W, SMITH S T. Influence of FRP anchor fan configuration and dowel angle on anchoring FRP plates[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(8): 3516-3527.

[19] KHAN A A R, AYUB T. Effectiveness of U-shaped CFRP wraps as end anchorages in predominant flexure and shear region[C]//Advances in FRP Composites in Civil Engineering. Berlin: Springer, 2011: 533-536.

[20] 龚爽, 林福宽, 粟淼, 等. 固化与试验温度对环氧树脂及表层嵌贴 CFRP-混凝土界面粘结性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5512-5524.
GONG Shuang, LIN Fukuan, SU Miao, et al. Effect of curing and test temperature on the bonding performance of epoxy resin and surface-embedded CFRP-concrete interface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5512-5524(in Chinese).

[21] SPADEA G, SWAMY R N, BENCARDINO F. Strength and ductility of RC beams repaired with bonded CFRP laminates[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(5): 349-355.

[22] ASHOUR A F, EL-REFAIE S A, GARRITY S W. Flexural strengthening of RC continuous beams using CFRP laminates[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(7): 765-775.

[23] MAALEJ M, HASHIDA T, LI V C. Effect of fiber volume fraction on the off-crack-plane fracture energy in strain-hardening engineered cementitious composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1993, 78(12): 3369-3375.

[24] LI V C, LEUNG C. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246-2264.

[25] LI Victor C, 张亚梅. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用 [J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531-536.
LI Victor C, ZHANG Yamei. Research progress and application of high ductility fibre reinforced cementitious composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 531-536(in Chinese).

[26] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483-492.

[27] LI V C. Engineered cementitious composites-tailored composites through micromechanical modeling[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 1998, 1(3): 215-230.

[28] KONG H J, BIKE S G, LI V C. Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(3): 301-309.

[29] YUN Y K, KONG H J, LI V C. Design of engineered cementitious composite suitable for wet-mixture shotcreting[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(6): 511-518.

[30] MA H, ZHANG Z G, DING B, et al. Investigation on the adhesive characteristics of engineered cementitious composites (ECC) to steel bridge deck[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 679-691.

[31] YANG G, LI Z Y. Experimental study on ultra-lightweight fire-resistive engineered cementitious composite[C]//2nd Annual International Conference on Advanced Material Engineering (AME). Dordrecht: Atlantis Press, 2016: 146-153.

[32] LI V C, WANG S X. Flexural behaviors of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) reinforced engineered cementitious composite beams[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(1): 11-21.

[33] YAN Y H, LU Y Y, ZHAO Q, et al. Flexural behavior of pre-damaged and repaired reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer grid and engineered cementitious composite[J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115390.

[34] YUAN F, PAN J L, LEUNG C K Y. Flexural behaviors of ECC and concrete/ECC composite beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(5): 591-602.

[35] NEUBAUER U, ROSTASY F S. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates[C]//Proceedings of the seventh international conference on structural faults and repair. Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997: 109-118.

[36] CHEN J F, TENG J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 784-791.

[37] DAI J G, UEDA T, SATO Y. Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-

concrete interfaces with a simple method[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(1): 52-62.

[38] LU X Z, TENG J G, YE L P, et al. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete[J]. Engineering Structures, 2005, 27(6): 920-937.

[39] ZHOU Y W, WU Y F, YUN Y C. Analytical modeling of the bond-slip relationship at FRP-concrete interfaces for adhesively-bonded joints[J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(6): 423-433.

[40] 马明, 徐佰顺, 张方, 等. 持续荷载下 CFRP-混凝土界面黏结性能试验与分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 128-134, 142.
MA Ming, XU Baishun, ZHANG Fang, et al. Test and analysis of adhesion performance of CFRP-concrete interface under continuous loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 128-134, 142(in Chinese).

[41] 何栋尔, 章子华, 肖云逸, 等. CFRP-火灾后混凝土界面快速剥离试验 [J]. 工程力学, 2019, 36(S1): 285-292.
HE Dong'er, ZHANG Zihua, XIAO Yunyi, et al. Rapid stripping test of CFRP-concrete interface after fire[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(S1): 285-292(in Chinese).

[42] 李晓琴, 陈前均, 陈建飞, 等. 中低速荷载下 FRP 与混凝土界面本构模型开发 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2019, 51(2): 219-222.
LI Xiaoqin, CHEN Qianjun, CHEN Jianfei, et al. Development of an intrinsic model of FRP-concrete interface under low and medium velocity loading[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(2): 219-222(in Chinese).

[43] 董坤, 郝建文, 李鹏, 等. 环境温差下 FRP-混凝土界面粘结行为分析 [J]. 工程力学, 2020, 37(11): 117-126.
DONG Kun, HAO Jianwen, LI Peng, et al. Analysis of bonding behaviour of FRP-concrete interface under ambient temperature difference[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 117-126(in Chinese).

[44] 王志杰, 王新玲, 李可. 基于损伤参数的 CFRP 布加固混凝土梁界面粘结滑移本构模型研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5): 160-166.
WANG Zhijie, WANG Xinling, LI Ke. Study on interfacial bond-slip principal model of CFRP fabric reinforced concrete beams based on damage parameters[J]. Engineering Seismic Resistance and Reinforcement Retrofitting, 2020, 42(5): 160-166(in Chinese).

[45] 袁娇娇, 苑溦, 侯新宇, 等. 往复荷载下 AFRP-混凝土界面性能研究 [J]. 人民长江, 2021, 52(5): 180-184.
YUAN Jiaojiao, YUAN Wei, HOU Xinyu, et al. Study on the performance of AFRP-concrete interface under reciprocating load[J]. People's Yangtze River, 2021, 52(5): 180-184(in Chinese).

[46] 管品武, 尚佳琦, 范家俊, 等. CFRP 片材-工程水泥基复合材料-混凝土复合界面单面剪切试验研究 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2810-2820.
GUAN Pinwu, SHANG Jiaqi, FAN Jiajun, et al. Experimental study on one-sided shear of CFRP sheet-engineered cementitious composite-concrete composite interface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2810-2820(in Chinese).

[47] SUI L L, LUO M S, YU K Q, et al. Effect of engineered cementitious composite on the bond behavior between fiber-reinforced polymer and concrete[J]. Composite Structures, 2018, 184: 775-788.

[48] 王娜娜. FRP-ECC-混凝土复合界面粘结性能的试验研究 [D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
WANG Nana. Experimental study on bonding performance of FRP-ECC-concrete composite interface[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016(in Chinese).

[49] 陈启壮. 冻融环境下 CFRP 板-ECC-混凝土复合界面粘结性能试验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
CHEN Qizhuang. Experimental study on bonding performance of CFRP plate-ECC-concrete composite interface under freeze-thaw environment[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021(in Chinese).

[50] ZHANG P, SHANG J Q, FAN J J, et al. Experimental study on the bond behavior of the CFRP plate-ECC-concrete composite interface under freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2022, 316: 125822.

[51] NIE S, GUO A F, FENG H, et al. Bonding properties of composite interface composed of concrete/magnesium phosphate cement-based ECC/CFRP plate[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 90: 109486.

[52] ZHOU Y W, SUI L L, HUANG X X, et al. Enhancing the EB-FRP strengthening effectiveness by incorporating a cracking-control layer of ECC with different thicknesses[J]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 122975.