

文章编号:1673-9469(2024)03-0023-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.03.004

## 钢筋与 ECC 的搭接-滑移力学模型研究

李沐远<sup>1</sup>,孙昭彭<sup>1</sup>,陈盼鑫<sup>1</sup>,吴琼<sup>1</sup>,盛昊<sup>1</sup>,郭进<sup>1,2\*</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室,河北 石家庄 050043)

**摘要:** 针对传统的粘结滑移力学模型未考虑到钢筋间距这一重要因素,导致无法准确预测钢筋搭接结构中的钢筋搭接性能。基于此,设计了针对钢筋间距等因素的钢筋搭接拉伸试验,并探究了钢筋间距对钢筋搭接性能的影响规律。同时,建立了一种考虑钢筋间距的力学模型,并对其进行了准确性和泛化性验证。结果表明,与传统的粘结-滑移力学模型相比,所提出的考虑钢筋间距的力学模型在准确度上最大提高了近 50%;对于高延性混凝土-钢筋搭接构件而言,该模型与试验结果之间的相关系数达到了 0.95 以上;该模型还展现出了良好的泛化性,可以有效地预测超高性能混凝土和普通混凝土的钢筋搭接性能,适用于预测钢筋混凝土搭接构件的搭接性能。

**关键词:** 搭接-滑移力学模型;搭接试验;参数分析;拟合公式

**中图分类号:** TU501

**文献标识码:** A

## Study on Lap-Slip Mechanics Model of Steel Bar and ECC

LI Muyuan<sup>1</sup>, SUN Zhaopeng<sup>1</sup>, CHEN Panxin<sup>1</sup>, WU Qiong<sup>1</sup>, SHENG Hao<sup>1</sup>, GUO Jin<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** Traditional lap-slip mechanics models have not taken into account the important factor of steel bar spacing, leading to inaccurate predictions of steel bar overlapping performance. To address this, a tensile test considering factors such as steel bar spacing was conducted, and the influence of spacing on overlapping performance was investigated. A mechanical model considering steel bar spacing was developed and validated for accuracy and generalization. The results demonstrate that the proposed model considering steel bar spacing improves accuracy by nearly 50% compared to traditional lap-slip models. For ECC-steel overlapping members, the correlation coefficient between the model and experimental results exceeds 0.95. The model shows good generalization, effectively predicting the overlapping performance of steel bars in high-performance concrete and ordinary concrete, and is suitable for predicting the overlapping performance of reinforced concrete overlapping members.

**Key words:** lap-slip mechanics model; lap test; parametric analysis; fitting formula

随着复合材料的发展,工程用水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)应运而生。与普通混凝土相比,ECC 在耐久性、韧性、抗拉强度和抗裂性等方面有了显著改善,具备了高韧性、多点开裂和大变形量等特点<sup>[1-3]</sup>。正因如此,国内外学者对于钢筋与 ECC 的搭接-滑移力学

性能也给予了较多的关注和研究。相比于传统的钢筋绑扎连接,钢筋非接触搭接具有更快的施工速度和更明确的传力路径,是一种简便、广泛应用于装配式配筋结构的钢筋连接方法<sup>[4]</sup>。然而,在某些特定结构中,由于钢筋搭接长度的限制,钢筋与混凝土之间的粘结力无法达到钢筋伸长或者屈

收稿日期:2023-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178493);河北省省级科技计划资助项目(21375402D,216Z6101G);河北省自然科学基金资助项目(E2022210028);石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2023066)

作者简介:李沐远(1998-),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事桥梁抗震研究。

\*通信作者:郭进(1985-),男,湖北黄冈人,博士,教授,主要从事桥梁抗震研究。

服的程度,导致较大的滑移量甚至出现钢筋从混凝土中抽出的情况,严重影响建筑物的正常使用。钢筋和混凝土的搭接-滑移力学模型是混凝土中钢筋搭接性能的综合体现,是进行钢筋混凝土搭接构件精细化力学计算的一个重要前提<sup>[5]</sup>。

为了描述钢筋和混凝土的粘结应力随两者相对位移(滑移量)的非线性变化关系,研究人员提出了很多不同的粘结-滑移力学模型,例如 Nilsson<sup>[6]</sup>模型、狄生林<sup>[7]</sup>模型、金芷生<sup>[8]</sup>模型等,此类模型形式简单,不能反映钢筋混凝土构件各参数对粘接强度的影响。另外就是根据试验数据拟合得到的半经验半理论公式:滕智明等<sup>[9]</sup>得到了考虑混凝土强度、钢筋直径、混凝土保护层厚度和配箍率等因素的粘接强度三阶段函数关系的计算模型;徐有邻<sup>[10]</sup>根据试验数据,按临界受力状态及裂缝情况建立了基于混凝土强度、配箍率、混凝土保护层厚度和钢筋直径等因素的粘接强度四阶段的力学计算模型。

然而,现有的粘结-滑移力学模型缺少钢筋间距这一重要因素,导致在进行钢筋搭接构件的力学计算时与实际情况存在较大偏差的问题。为解决该问题,本文基于试验数据和前人的研究成果,建立了一个考虑混凝土强度、保护层厚度、搭接长度以及钢筋间距等影响因素的粘结-滑移力学模型,并对该模型的准确性和泛化性进行了研究和分析。

## 1 试验概况

### 1.1 试验设计

本文围绕搭接长度、混凝土保护层厚度、钢筋搭接间距等因素设计了钢筋与混凝土的搭接试验,其中涉及 ECC、超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)和普通混凝土(Concrete, C)三种混凝土材料,共进行了 13 组 ECC-钢筋搭接试验(E-1—E-13),10 组普通混凝土-钢筋搭接试验(C-1—C-10),5 组 UHPC-钢筋搭接试验(U-1—U-5),其中 UHPC-钢筋搭接对拉试件主要用来生成数据,用于后续检验力学模型泛化能力,试件编号及主要参数见表 1。表中混凝土种类:1—ECC,2—普通混凝土,3—UHPC; $D$  代表钢筋搭接间距,mm; $L$  代表搭接长度,mm; $C$  代表保护层厚度,mm; $V_f$  代表纤维体积掺量,%。

试件所用搭接钢筋皆是直径为 10 mm 的 HRB425 级钢筋,试件简图如图 1(a)所示。

### 1.2 试验材料

本文试验所用的 ECC 和 UHPC 原材料是由河北拓创远威科技有限公司生产的混凝土干混料,ECC 使用的聚乙烯醇纤维(Polyvinyl Alcohol, PVA)和 UHPC 的镀铜钢纤维体积掺量有 0%、2% 和 4% 三种。按照水与干混料固定的比例获得本文想要的混凝土强度。试件采用常温养护,试件

表 1 试件参数表

Tab. 1 Specimen parameter table

| 试件<br>编号 | 混凝土<br>种类 | 钢筋搭<br>接长度<br>$L/\text{mm}$ | 钢筋搭<br>接间距<br>$D/\text{mm}$ | 保护层<br>厚度<br>$C/\text{mm}$ | 纤维体<br>积掺量<br>$V_f/\%$ | 试件<br>编号 | 混凝土<br>种类 | 钢筋搭<br>接长度<br>$L/\text{mm}$ | 钢筋搭<br>接间距<br>$D/\text{mm}$ | 保护层<br>厚度<br>$C/\text{mm}$ | 纤维体<br>积掺量<br>$V_f/\%$ |
|----------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|----------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| E-1      | 1         | 50                          | 0                           | 50                         | 2                      | C-2      | 2         | 50                          | 10                          | 50                         | 0                      |
| E-2      | 1         | 50                          | 10                          | 50                         | 2                      | C-3      | 2         | 50                          | 20                          | 50                         | 0                      |
| E-3      | 1         | 50                          | 20                          | 50                         | 2                      | C-4      | 2         | 50                          | 30                          | 50                         | 0                      |
| E-4      | 1         | 50                          | 30                          | 50                         | 2                      | C-5      | 2         | 70                          | 20                          | 50                         | 0                      |
| E-5      | 1         | 70                          | 20                          | 50                         | 2                      | C-6      | 2         | 90                          | 20                          | 50                         | 0                      |
| E-6      | 1         | 90                          | 20                          | 50                         | 2                      | C-7      | 2         | 120                         | 20                          | 50                         | 0                      |
| E-7      | 1         | 120                         | 20                          | 50                         | 2                      | C-8      | 2         | 50                          | 20                          | 30                         | 0                      |
| E-8      | 1         | 50                          | 20                          | 40                         | 0                      | C-9      | 2         | 50                          | 20                          | 35                         | 0                      |
| E-9      | 1         | 50                          | 20                          | 40                         | 2                      | C-10     | 2         | 50                          | 20                          | 40                         | 0                      |
| E-10     | 1         | 50                          | 20                          | 40                         | 4                      | U-1      | 3         | 50                          | 0                           | 50                         | 2                      |
| E-11     | 1         | 50                          | 20                          | 25                         | 2                      | U-2      | 3         | 50                          | 10                          | 50                         | 2                      |
| E-12     | 1         | 50                          | 20                          | 30                         | 2                      | U-3      | 3         | 30                          | 20                          | 50                         | 2                      |
| E-13     | 1         | 50                          | 20                          | 35                         | 2                      | U-4      | 3         | 20                          | 20                          | 30                         | 2                      |
| C-1      | 2         | 50                          | 0                           | 50                         | 0                      | U-5      | 3         | 20                          | 20                          | 35                         | 2                      |

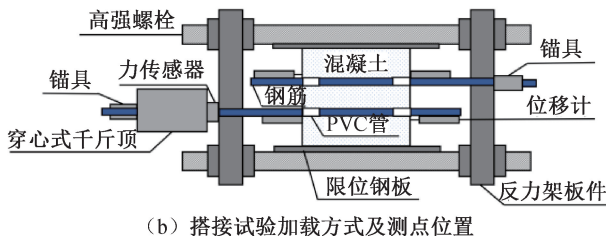
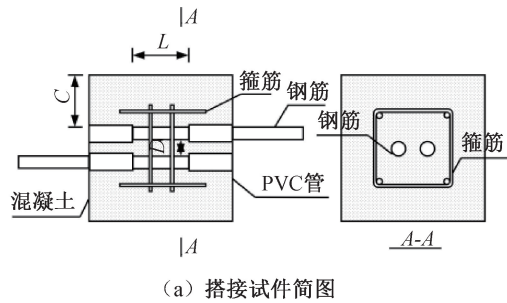


图1 钢筋与混凝土搭接试验试件及装置

Fig. 1 Experimental specimens and devices for lap joints between steel bars and concrete

成型后 24 h 拆模,浇水养护 14 d。

制作了 3 个边长为 100 mm 的立方体试块和三个尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试块分别测 ECC 的立方体抗压强度和棱柱体抗压强度(与搭接试件同配合比),其测试结果如表 2 所示。

表 2 混凝土力学性能 (单位:MPa)

Tab. 2 Mechanical properties of concrete (unit:MPa)

| 混凝土种类 | 抗压强度(实测值) | 抗拉强度(理论值) |
|-------|-----------|-----------|
| ECC   | 64.4      | 4.32      |
| 普通混凝土 | 52.0      | 3.68      |
| UHPC  | 130.0     | 7.31      |

混凝土抗拉强度的计算公式如下:

$$f_t = 0.19f_{cu}^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

式中:  $f_t$  为混凝土抗拉强度, MPa;  $f_{cu}$  为混凝土抗压强度, MPa。

搭接钢筋的强度等级均为 HRB400, 直径为 10 mm, 箍筋和架立筋的强度等级为 HRB300, 直径为 8 mm。

### 1.3 试验加载装置及测试内容

钢筋搭接试验的加载方式如图 1(b) 所示, 采用 10 t 的穿心式千斤顶通过手动加载对钢筋施加拉拔力, 通过一个压力传感器和四个位移传感器来测量施加在钢筋上的力和四个测点处的钢筋滑移量(钢筋和混凝土的相对位移), 采用 XL2118A

静态电阻应变仪收集力传感器和位移传感器上的数据。

另外, 由于钢筋间距的影响, 试件加载时会造成试件扭转, 而在工程实际应用中由于结构构件相互约束的缘故, 搭接构造处的混凝土并不存在转动的情况, 因此, 本试验在试件两侧放置限位钢板限制其转动来模拟实际工程情况。

## 2 试验结果及分析

本节分析了钢筋混凝土试件的破坏形态和影响因素对混凝土中钢筋搭应力影响规律。

### 2.1 钢筋混凝土搭接试件破坏模式

图 2 为 ECC-钢筋搭接试件的破坏形态。本次试验主要出现两种破坏模式, 分别是混凝土劈裂破坏和钢筋拔出破坏。破坏模式主要受混凝土保护层厚度和钢筋搭接长度的影响, 混凝土保护层厚度越大, 横向约束越大, 越容易发生钢筋拔出破坏, 钢筋搭接长度越大, 试件提供的抗拉拔力越大, 钢筋越容易屈服。

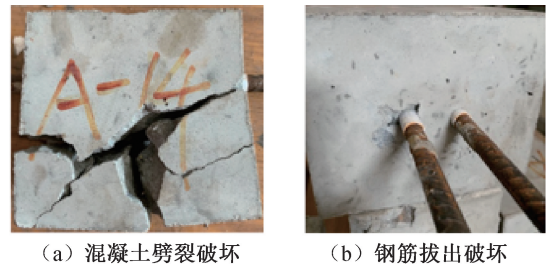


图2 搭接试件破坏形态

Fig. 2 Failure form of lap specimens

#### 2.1.1 混凝土劈裂破坏

普通混凝土试件中近一半的试件发生了混凝土劈裂破坏, 而 ECC 试件中只有纤维掺量为 0% 的试件发生了混凝土劈裂破坏。此类试件在加载初期无明显变化, 加载段的滑移量随着荷载增加而增加, 但自由端仅有微小滑移或者未出现滑移。当荷载增加到接近极限荷载时, 混凝土突然发生劈裂破坏, 试件变为多瓣, 伴随巨大响声, 荷载下降到零, 试验结束。试验得到荷载-滑移曲线只有上升段, 没有下降段, 即只有劈裂段曲线。观察劈裂试件内部可以看出混凝土表面有钢筋肋痕, 且越靠近加载段, 其肋痕越明显, 见图 2(a)。

#### 2.1.2 钢筋拔出破坏

ECC 试件中大部分都发生了钢筋拔出破坏。在加载之初, 加载端的滑移随着荷载的增大而增

大,随着荷载的增大,自由端开始出现滑移。当加载到极限荷载后,荷载开始下降并维持在一定的数值,同时会产生较大的滑移量。试件发生破坏时,其表面无任何裂缝,见图 2(b)。

## 2.2 混凝土中钢筋搭接应力的影响因素分析

本文在研究混凝土中钢筋搭接应力的影响因素时,考虑了搭接长度、钢筋间距、混凝土保护层厚度和纤维掺量这四个关键变量对其产生的影响。由于普通混凝土中搭接钢筋的搭接应力沿搭接长度分布不均匀,此处使用平均搭接强度来代表整个搭接长度范围内的搭接性能,计算公式如下:

$$\tau = \frac{P}{\pi d L} \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为全搭接长度范围内的平均搭接强度, MPa;  $P$  为对拉荷载, N;  $d$  为钢筋直径, mm;  $L$  为搭接长度, mm。

### 2.2.1 搭接长度

随着搭接长度的增加,钢筋拉拔力从加载端到自由端的传力路径随之变大,延迟了自由端钢筋和混凝土的粘结破坏,进而增大了试件的极限荷载。但由于粘结应力在钢筋搭接长度范围内分布不均,呈现近加载端大,远加载端小的现象,搭接长度增大也使得远离加载端应力较小的部分加长了,所以平均搭接应力随搭接长度的增加而减小,如图 3 所示。

### 2.2.2 钢筋间距

随着钢筋间距增大,混凝土中钢筋极限搭接应力逐渐增大。从图 4 中可以看出,钢筋间距每增加一个等级,混凝土中钢筋的平均搭接强度均有较大幅度提升,而且对于不同混凝土,其影响规律相近。随着钢筋间距增大,钢筋间混凝土厚度加大,对钢筋的包裹力进而增强,其作用机理和混凝土保护层相同。钢筋间距为  $3d$  的普通混凝土发生混凝土劈裂破坏,极限搭接应力不准确;钢筋间距为  $0d$  的 ECC 试件因为试验设备原因失败,此处不再展示。

### 2.2.3 混凝土保护层厚度

随着保护层厚度的增大,混凝土中钢筋的极限搭接应力逐渐增大。混凝土保护层厚度对平均搭接应力的影响程度见图 5,混凝土保护层厚度由  $3.5d$  提升到  $4d$ ,平均搭接强度提高了近 40%。随着混凝土保护层厚度的加大,钢筋的横向约束力增大,对钢筋的握裹力进而增强。

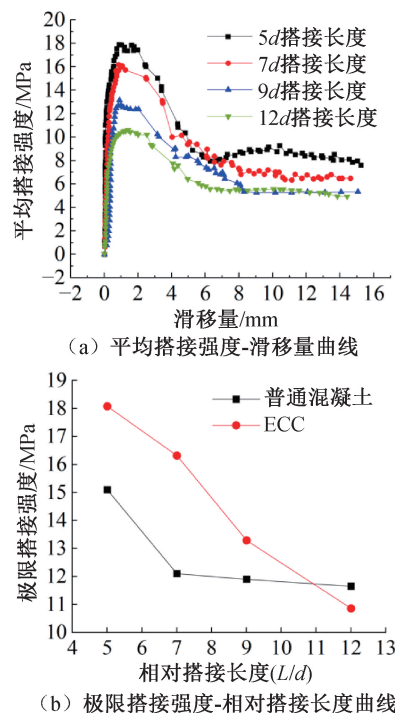


图 3 不同搭接长度下的钢筋混凝土搭接性能  
Fig. 3 Reinforced concrete lap performance at different lap lengths

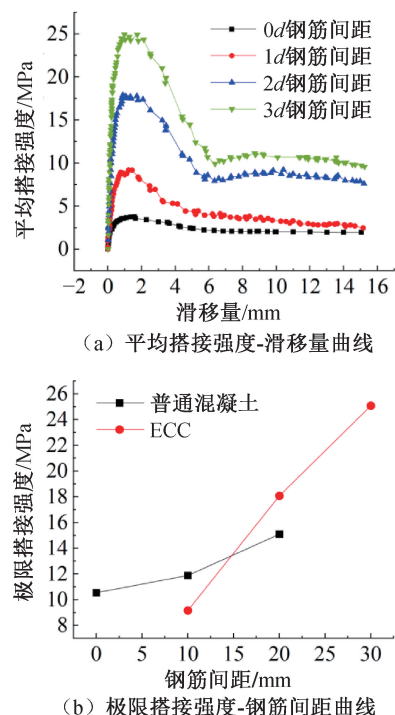


图 4 不同钢筋间距下的钢筋混凝土搭接性能  
Fig. 4 Reinforced concrete lap performance under different rebar spacing

### 2.2.4 纤维掺量

随着纤维掺量的增大,混凝土中钢筋的极限搭接应力逐渐增大。纤维掺量对平均搭接强度的

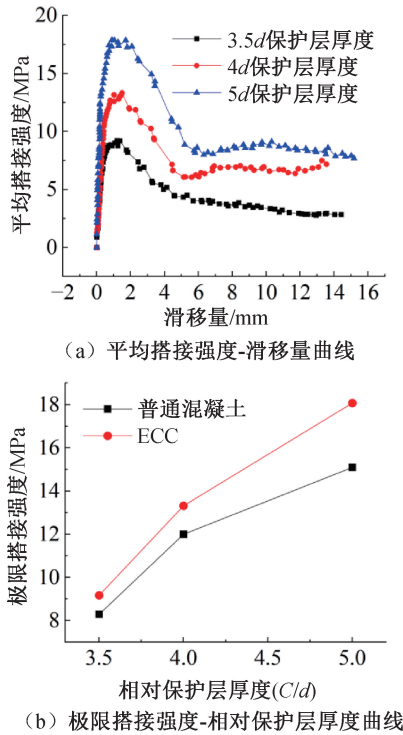


图5 不同保护层厚度下的钢筋混凝土搭接性能  
Fig. 5 Reinforced concrete lap performance under different protective layer thicknesses

影响见图6, PVA纤维体积分数由2%提升到4%, 平均搭接强度提高了30%。PVA纤维在混凝土中杂乱分布, 具有桥连作用, 可以有效抑制裂缝的出

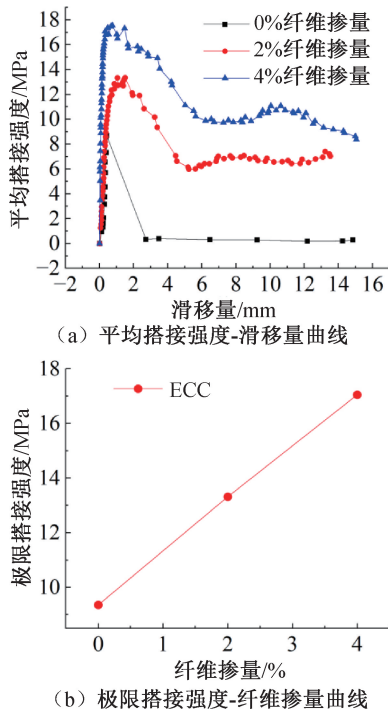


图6 不同纤维掺量下的钢筋混凝土搭接性能  
Fig. 6 Reinforced concrete lap properties with different fiber content

现和开展, 从而起到和箍筋相同的阻裂作用。有效地约束了ECC, 抑制了裂缝的开展, 提高了平均搭接强度。

### 3 钢筋与混凝土的搭接-滑移力学模型

本节基于ECC-钢筋的搭接试验数据和上述各影响因素对混凝土中钢筋的搭接强度的影响规律, 使用最小二乘法拟合出各特征点的计算公式, 进而得到整个搭接-滑移力学模型, 最后分别使用ECC-钢筋和其他试验的搭接数据从材料层面对该模型的预测能力和泛化能力进行验证。

#### 3.1 搭接-滑移力学模型的建立

从上述各影响因素对钢筋混凝土搭接性能的影响规律以及其他文献的搭接试验数据分析可以知道搭接应力和混凝土强度、保护层厚度、钢筋间距成正比, 和搭接长度成反比。通过分析荷载-滑移曲线, 认为试件发生钢筋拔出破坏时, 荷载滑移曲线可以分成六段: 弹性段(O—A)、微滑移段(A—B)、滑移段(B—C)、平滑段(C—D)、下降段(D—E)和残余段(E—), 如图7所示。

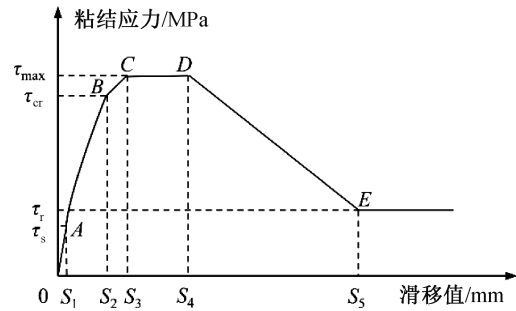


图7 本文搭接-滑移力学模型曲线图

Fig. 7 The curve diagram of the lap-slip mechanical model in this article

搭接-滑移力学模型如下:

$$\tau(S) = \begin{cases} \frac{\tau_s}{S_1} S & 0 \leq S < S_1 \\ \tau_{cr} \left( \frac{S}{S_2} \right)^\alpha & S_1 \leq S < S_2 \\ \tau_{cr} + \frac{(\tau_{max} - \tau_{cr})(S - S_2)}{(S_3 - S_2)} & S_2 \leq S < S_3 \\ \tau_{max} & S_3 \leq S < S_4 \\ \tau_{max} - \frac{(\tau_{max} - \tau_r)(S - S_4)}{(S_5 - S_4)} & S_4 \leq S < S_5 \\ \tau_r & S_5 \leq S \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\tau_s$  为滑移搭接应力, MPa; 对应的滑移量为  $S_1$ , mm;  $\tau_{cr}$  为劈裂搭接应力, MPa; 对应的滑移量为  $S_2$ , mm;  $\tau_{max}$  为极限搭接应力, MPa; 对应的滑移量为  $S_3$ , mm;  $\tau_r$  为残余搭接应力, MPa; 对应的滑移量为  $S_5$ , mm;  $\alpha$  为经验系数。

### 3.1.1 滑移搭接应力、劈裂搭接应力、极限搭接应力、残余搭接应力

由试验结果可知, 各特征点的搭接强度与相对搭接长度、相对保护层厚度、混凝土强度、钢筋间距相关, 纤维掺量主要影响  $C-D$ 、 $D-E$  和  $E-F$  三个阶段的应力和滑移量。基于上述分析, 本文以  $\tau = g(L/d, C/d, f_t, D/d, V_f)$  为目标函数, 对试验结果进行拟合, 得到各特征值的搭接强度计算公式。

基于 ECC-钢筋搭接试验数据, 通过最小二乘法拟合数据得到各强度特征值计算公式如下:

$$\tau_s = (0.7104 \times \alpha_1 + 0.195) \times (2.5 \times \alpha_2 + 0.12628) \times (0.457 \times \alpha_3 - 0.7569) \times f_t \quad (4)$$

$$\tau_{cr} = (1.0491 \times \alpha_1 + 0.4192) \times (1.5387 \times \alpha_2 + 0.1149) \times (0.7326 \times \alpha_3 - 1.2444) \times f_t \quad (5)$$

$$\tau_{max} = (1.1328 \times \alpha_1 + 0.4832) \times (1.2219 \times \alpha_2 + 0.11346) \times (0.8643 \times \alpha_3 - 1.5045) \times (0.06 \times \alpha_4 + 0.97) \times f_t \quad (6)$$

$$\tau_r = (0.4425 \times \alpha_1 + 0.2359) \times (2.42176 \times \alpha_2 + 0.24) \times (0.3061 \times \alpha_3 - 0.0151) \times (0.3225 \times \alpha_4 + 0.376) \times f_t \quad (7)$$

式中:  $\alpha_1 = D/d$ ;  $\alpha_2 = L/d$ ;  $\alpha_3 = C/d$ ;  $\alpha_4 = V_f$ ;  $f_t$  为混凝土抗拉强度, MPa;  $V_f$  为纤维体积掺量, %。

### 3.1.2 滑移点滑移量、劈裂点滑移量、极限点滑移量、残余点滑移量

由试验结果可知, 各特征点的滑移量主要与钢筋直径相关, 故以  $S = g(d)$  为目标函数, 对试验结果进行拟合。基于试验数据, 通过最小二乘法拟合得到各滑移特征值按表 3 取值。

表 3 滑移特征值取值

Tab. 3 The slip characteristic value is the value

| 滑移特征值 | 滑移量/mm                         |
|-------|--------------------------------|
| $S_1$ | 0.016 2d                       |
| $S_2$ | 0.066 9d                       |
| $S_3$ | 0.103 2d                       |
| $S_4$ | 0.103 2d+0.5                   |
| $S_5$ | 0.102 4×d×(1.845× $V_f$ +2.31) |

### 3.1.3 经验系数 $\alpha$

根据国内外学者的试验结果分析可知,  $\alpha$  是一个经验系数, 与钢筋的种类有很大关系。Kankam 和国内蒋德稳等人<sup>[11-12]</sup>的试验均采用热轧钢筋, 统计分析得到经验系数为 0.5, 而大多数非热轧钢筋的经验系数为 0.3~0.5 之间, 以 0.3 居多。因此本文滑移段(A—B)幂函数指数分为两大类: 钢筋为热轧钢筋时, 经验系数为 0.5; 钢筋为非热轧钢筋时, 经验系数为 0.3。本文力学模型的经验系数取 0.5。

## 3.2 力学模型准确度和泛化性的验证

本节从材料层面对力学模型的准确性和泛化性进行了验证, 具体流程如图 8 所示。

(1) 使用 ECC-钢筋搭接试验数据检验搭接-滑移力学模型的准确性。

(2) 使用 UHPC-钢筋搭接试验数据检验搭接-滑移力学模型对于同类型混凝土的泛化性。

(3) 使用普通混凝土-钢筋搭接试验数据检验搭接-滑移力学模型对于不同类型混凝土的泛化性。

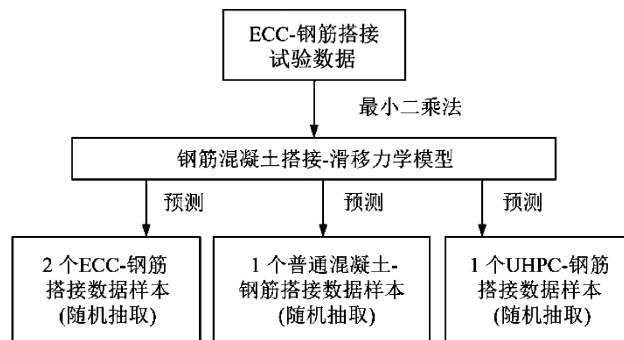


图 8 力学模型准确度和泛化性验证流程

Fig. 8 Verification process for the accuracy and generalizability of the mechanical model

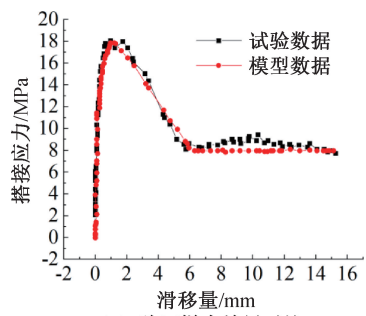
本文随机选取两个 ECC-钢筋测试样本 (E-3 和 E-4) 来检验该模型的准确度, 一个普通混凝土-钢筋测试样本 (C-5) 和一个 UHPC-钢筋测试样本 (U-2) 来检验该模型的泛化性, 测试样本的具体参数和计算结果见表 4。

从图 9—图 12 所示的 4 个样本模型计算结果和试验数据的对比可知: 本文所建立的搭接-滑移力学模型从材料层面具有较高的准确性和泛化性。E-3 和 E-4 样本的极限搭接应力和残余搭接应力的误差都在 3% 以内; U-2 样本的极限搭接应力和残余搭接应力的误差都在 10% 左右; 而普通混凝土-钢筋样本 C-5 的极限搭接应力和残余搭接应力的试验值和模型值的误差达到了 20%, 极限

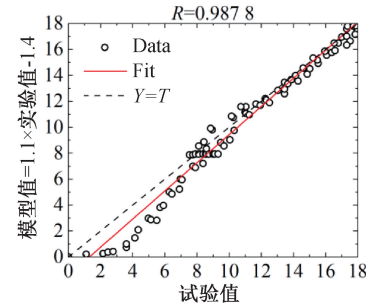
表 4 验证样本参数及模型计算结果

Tab.4 Verify sample parameters and model calculation results

| 试件<br>编号 | 搭接<br>长度<br>$L/\text{mm}$ | 钢筋<br>直径<br>$d/\text{mm}$ | 搭接<br>间距<br>$D/\text{mm}$ | 混凝土<br>保护层<br>$C/\text{mm}$ | 混凝土<br>抗拉<br>$f_t/\text{MPa}$ | 试验极限<br>搭接应力<br>$\tau_{\max(z)}/\text{MPa}$ | 模型极限<br>搭接应力<br>$\tau_{\max(m)}/\text{MPa}$ | 试验残余<br>搭接应力<br>$\tau_{r(z)}/\text{MPa}$ | 模型残余<br>搭接应力<br>$\tau_{r(m)}/\text{MPa}$ |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| E-3      | 50                        | 10                        | 20                        | 50                          | 4.32                          | 18.08                                       | 17.85                                       | 8.45                                     | 7.92                                     |
| E-4      | 50                        | 10                        | 30                        | 50                          | 4.32                          | 25.08                                       | 25.20                                       | 10.83                                    | 11.05                                    |
| U-2      | 50                        | 10                        | 10                        | 50                          | 7.65                          | 15.06                                       | 17.65                                       | 6.85                                     | 8.05                                     |
| C-5      | 70                        | 10                        | 20                        | 50                          | 3.68                          | 12.09                                       | 10.82                                       | 1.96                                     | 2.31                                     |

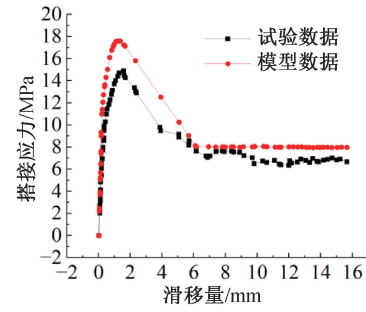


(a) 验证样本结果对比

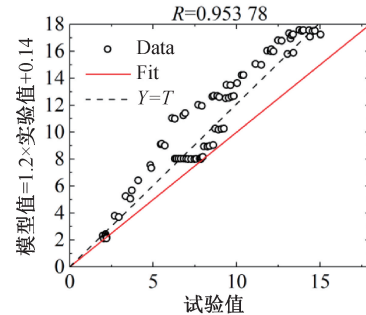


(b) 试验值和模型值的相关系数R

图 9 E-3 样本模型计算结果  
Fig. 9 E-3 sample model calculation results

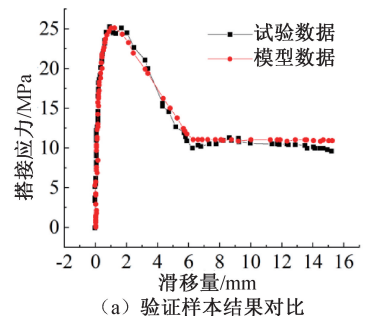


(a) 验证样本结果对比

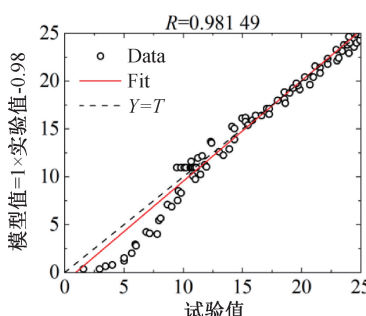


(b) 试验值和模型值的相关系数R

图 11 U-2 样本模型计算结果  
Fig. 11 Calculation results of U-2 sample model

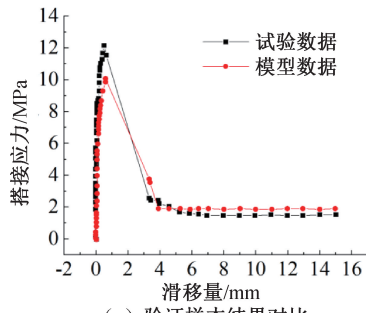


(a) 验证样本结果对比

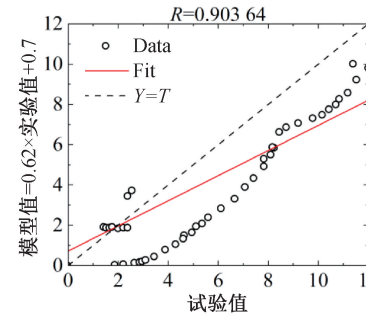


(b) 试验值和模型值的相关系数R

图 10 E-4 样本模型计算结果  
Fig. 10 E-4 sample model calculation results



(a) 验证样本结果对比



(b) 试验值和模型值的相关系数R

图 12 C-5 样本模型计算结果  
Fig. 12 C-5 sample model calculation results

搭接应力对应的滑移量误差达到了 10%,这是由于普通混凝土和 ECC 的作用机理差异过大,其力学模型不同导致。

本文建立的钢筋与 ECC 的搭接-滑移力学模型相关系数在 0.95 以上,适用范围:相对保护层厚度  $C/d$  在  $[3, 5]$ ,混凝土抗压强度  $f_{cu}$  在  $[50, 130]$  MPa,相对钢筋间距  $D/d$  在  $[1, 3]$ ,纤维体积掺量  $V_f$  在  $[0\%, 4\%]$ ,钢筋直径  $d$  在  $[10, 20]$  mm。

除此之外,本文还随机选取若干组 ECC/普通混凝土/UHPC-钢筋测试样本,其模型计算结果如表 5 所示。

表 5 测试样本的关键特征值计算结果  
Tab. 5 The key eigenvalues of the test sample are calculated as a result

| 样本名称 | 试验极限搭接<br>应力 $\tau_{\max(z)}/\text{MPa}$ | 模型极限搭接<br>应力 $\tau_{\max(m)}/\text{MPa}$ |
|------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| E-2  | 9.20                                     | 10.49                                    |
| E-5  | 15.86                                    | 14.36                                    |
| C-2  | 11.89                                    | 8.15                                     |
| C-6  | 15.01                                    | 13.84                                    |
| U-1  | 6.14                                     | 6.33                                     |
| U-5  | 9.20                                     | 8.99                                     |

### 3.3 本文模型和传统模型的对比

本节随机选取了两个 ECC-钢筋样本(E-3、E-4),以探究相对于传统粘结-滑移力学模型,本文力学模型精度的增长幅度。

根据表 6 和图 13 中各模型的计算结果显示,相较于传统粘结-滑移力学模型,本文建立的模型在精度上最大提升了近 50%。此外,E-3 和 E-4 样本的徐有邻模型与我国规范给出的结果相一致,这是因为传统力学模型未考虑到钢筋间距和搭接长度等重要因素的影响。

表 6 试件各模型计算结果 (单位:MPa)  
Tab. 6 Calculation results of each model of the specimen (unit:MPa)

| 样本名称 | 试验值   | 本文模型  | 我国规范  | 徐有邻模型 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| E-3  | 18.08 | 17.85 | 12.88 | 15.40 |
| E-4  | 25.08 | 25.20 | 12.88 | 15.40 |

## 4 结论

1) ECC 对钢筋非接触搭接构造的粘结性能提升较大。相比于普通混凝土,在正常混凝土保护层厚度范围内,ECC 自身的“桥连作用”可以保证

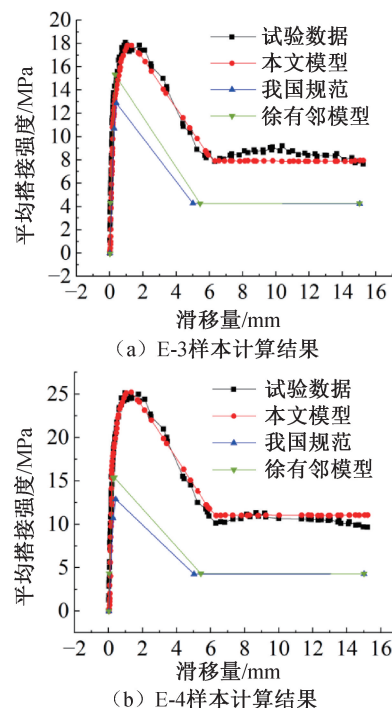


图 13 各模型计算结果对比图

Fig. 13 Sample model calculation results

在钢筋拔出或者钢筋拉断之前不发生混凝土劈裂破坏,起到箍筋的作用。ECC 中的钢筋发生较大滑移后,还能够保持较大的残余粘结应力,具有较高的韧性,大大提高了钢筋混凝土搭接构造的“下限”。

2) 钢筋间距对混凝土中钢筋的搭接性能影响很大。ECC-钢筋搭接试件的钢筋间距每增加一倍钢筋直径的距离,其搭接强度增加近一倍,这种增长幅度随着钢筋间距增加而降低,预计达到  $5d$  可忽略其作用。

3) 本文融入钢筋间距影响因素,与传统的粘结-滑移力学模型相比,所建立的搭接-滑移力学模型具有较高的准确率和泛用性。其在准确度上最大提升了近 50%;对 ECC-钢筋搭接模型而言,相关系数在 0.95 以上;对 UHPC 和普通混凝土的钢筋搭接模型也具有较好的泛化性,适用于预测钢筋混凝土搭接构件的搭接性能。

## 参考文献:

- [1] 王晓伟, 张薇, 赵恩辉, 等. 混掺高延性纤维混凝土组合十字形短柱抗震性能研究[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(6): 40-50.
- [2] 杨刚, 冯凡丁, 谢金元, 等. 预应力混凝土-ECC 复合功能梯度构件抗弯性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(06): 2280-2293.

- [3] 欧阳建新, 郭荣鑫, 万夫雄, 等. 玄武岩复合材料钢筋增强 ECC 受拉性能及裂缝控制机理[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(8): 2684-2695.
- [4] ALI A Y, HAMEED M. Analysis for behavior of reinforcement lap splices in deep beams[J]. Journal of University of Babylon for Engineering Sciences, 2018, 26(5): 347-361.
- [5] ZHANG N, GU Q, WU Y, et al. Refined peridynamic modeling of bond-slip behaviors between ribbed steel rebar and concrete in pull-out tests[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(12): 04022197.
- [6] NILSON A H. Internal measurement of bond slip[J]. Journal proceedings, 1972, 69(7): 439-441.
- [7] 狄生林. 钢筋混凝土粘结力与滑移关系的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 1981.
- [8] 金芷生, 朱万福, 庞同和. 钢筋与混凝土粘结性能试验研究[J]. 南京工学院学报, 1985, 2: 73-85.
- [9] 滕智明, 王传志. 钢筋混凝土结构理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [10] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
- [11] KANKAM C K. Relationship of bond stress, steel stress, and slip in reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(1): 79-85.
- [12] 蒋德稳, 邱洪兴. 拔出型试验钢筋与混凝土间滑移量的简化解法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(04): 830-834.

(责任编辑 王利君)

(上接第 15 页)

- [12] 童林. 不同混凝土强度等级下 CFRP 约束型钢混凝土矩形短柱轴压性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [13] 吴宜龙. CFRP 约束型钢混凝土矩形短柱轴压承载力设计方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [14] LUO H, PAAL S G. Machine learning-based backbone curve model of reinforced concrete columns subjected to cyclic loading reversals[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2018, 32(5): 04018042.
- [15] MANGALATHU S, JEON J S. Classification of failure mode and prediction of shear strength for reinforced concrete beam-column joints using machine learning techniques[J]. Engineering Structures, 2018, 160: 85-94.
- [16] HUANG H, BURTON H V. Classification of in-plane failure modes for reinforced concrete frames with infills using machine learning[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 25: 100767.
- [17] ŠTRUMBELJ E, KONONENKO I. Explaining prediction models and individual predictions with feature contributions[J]. Knowledge and Information Systems, 2014, 41: 647-665.
- [18] CAKIROGLU C, ISLAM K, BEKDAŞ G, et al. Interpretable Machine Learning Algorithms to Predict the Axial Capacity of FRP-Reinforced Concrete Columns[J]. Materials, 2022, 15(8): 2742.
- [19] DING H, LU Y, SZE N N, et al. A deep generative approach for crash frequency model with heterogeneous imbalanced data[J]. Analytic Methods in Accident Research, 2022, 34: 100212.
- [20] CHAWLA N V, BOWYER K W, HALL L O, et al. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2002, 16: 321-357.
- [21] CHOO C C, HARIK I E, GESUND H. Strength of rectangular concrete columns reinforced with fiber-reinforced polymer bars[J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(3): 452.
- [22] ZHOU Z, CHEN H, LI G, et al. Data-driven fault diagnosis for residential variable refrigerant flow system on imbalanced data environments[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 125: 34-43.
- [23] 陈锋, 李张铮, 庄毅莹. 基于 GBDT 算法的潜在 5G 用户预测研究与实现[J]. 邮电设计技术, 2021(04): 45-49.

(责任编辑 王利君)