

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.182

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 高强不锈钢绞线网在 ECC 中的搭接性能

朱俊涛<sup>1</sup>, 赵奎<sup>1</sup>, 邹旭岩<sup>2</sup>, 王新玲<sup>1</sup>, 李可<sup>1</sup>, 张哲<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州工程技术学院 土木工程学院, 郑州 450044)

**摘要:**为探明高强不锈钢绞线网在工程水泥基复合材料(Engineering Cementitious Composites, ECC)中搭接连接的受力特性,并确定其合理的搭接长度,考虑横向钢绞线间距、搭接长度和钢绞线直径等影响因素,对设计制作的39个试件进行了拉拔试验。结果表明:钢绞线网在ECC中的搭接连接有钢绞线拔出和拉断两种破坏模式;横向钢绞线的设置对搭接时的极限拉拔力影响不大,但其滑移量随着横向钢绞线间距的减小而减小;随着搭接长度的增加,达到峰值荷载的滑移量和“搭接刚度”增加,而极限粘结应力则随之降低。通过试验分析,确定了钢绞线网的临界搭接长度,并建立了考虑修正系数 $\beta$ 的搭接长度计算公式。

**关键词:**不锈钢绞线网;工程水泥基复合材料;搭接性能;拉拔试验;搭接长度

**中图分类号:** TU528.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)03-0174-09

## Performance of lap-spliced high strength stainless steel wire mesh in engineering cementitious composites

ZHU Juntao<sup>1</sup>, ZHAO Kui<sup>1</sup>, ZOU Xuyuan<sup>2</sup>, WANG Xinling<sup>1</sup>, LI Ke<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou Institute of Technology, Zhengzhou 450044, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the mechanical characteristics of high strength stainless steel wire mesh in Engineering Cementitious Composites (ECC) and to determine the reasonable lap length, the pullout tests of 39 specimens were carried out by considering the influential factors such as transverse strand spacing, lap length and strand diameter. The results show that there are two failure modes in the lap connection of steel wire mesh in ECC, namely pull out and pull off. The setting of transverse strand has little effect on the ultimate pull-out force, but the slip decreases with the decrease of the transverse strand spacing. With the increase of lap length, the slip amount and "lap stiffness" to peak load increase, while the ultimate bond stress decreases. Based on the experimental analysis, the critical lap length of steel wire mesh is

**收稿日期:** 2020-07-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(51708511, 51879243, U1804137); 住房和城乡建设部科学技术计划(2019-K-059); 河南省交通运输科技计划(2020J-2-7); 河南省博士后基金(201902014)

**作者简介:** 朱俊涛(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事新型复合材料性能研究, E-mail: juntaozhu@zzu.edu.cn.

李可(通信作者), 女, 副教授, 博士生导师, E-mail: irwinlike@163.com.

**Received:** 2020-07-17

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51708511, 51879243, U1804137); Science and Technology Program Project of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development (No. 2019-K-059); Transportation Science and Technology Project of Henan Province (No. 2020J-2-7); Post-doctoral Foundation of Henan Province (No. 201902014)

**Author brief:** ZHU Juntao (1983-), PhD, associate professor, main research interest: composite material performance, E-mail: juntaozhu@zzu.edu.cn.

LI Ke (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: irwinlike@163.com.

determined, and the calculation formula of lap length considering the correction coefficient  $\beta$  is established.

**Keywords:** stainless steel wire mesh; Engineering Cementitious Composites (ECC); lap-spliced behavior; pull-out test; splice length

工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)是一种新型的水泥基复合材料。与普通混凝土相比,由于纤维的桥联作用,使其具有拉伸应变硬化和多缝开裂的特点,提高了结构的延性和耗能能力<sup>[1]</sup>,但强度较低,需要结合增强材料来充分发挥其工作性能。普通钢筋强度低,难以充分发挥 ECC 的优异性能;纤维编织网性能优越,但经济性和施工性能较差<sup>[2-7]</sup>。而高强不锈钢绞线具有强度高、耐久性好及运输、施工方便等优点,常与环氧树脂或聚合物砂浆组合用于混凝土结构加固<sup>[8]</sup>。因此,基于两种材料(高强不锈钢绞线、ECC)的优点,提出高强不锈钢绞线网增强 ECC 这一新型复合材料<sup>[9-11]</sup>,既充分发挥了 ECC 和高强不锈钢绞线的优点,又克服了相应增强材料的缺点。

考虑实际工程施工,增强材料在基体中需要截断、搭接,而截断、搭接削弱了基体对增强材料的握裹作用,因此,需要对增强材料的搭接性能进行研究,以确保构件受力的安全性。学者们对增强材料在基体中的搭接性能开展了广泛研究<sup>[12-16]</sup>。Choi 等<sup>[17]</sup>通过拉伸试验,研究了不同抗压强度的混杂纤维增强 SHCC 中搭接钢筋的粘结性能,并考虑搭接长度等多种因素影响,提出局部最大粘结应力和平均粘结应力计算公式。Metelli 等<sup>[18]</sup>对纤维混凝土梁交错搭接钢筋进行试验研究,得出纤维掺量及截面搭接钢筋百分比对钢筋搭接性能的影响规律。方志等<sup>[19]</sup>研究了活性粉末混凝土中带肋钢筋搭接连接的受力性能,确定了活性粉末混凝土中纵筋的搭接长度。惠慧<sup>[20]</sup>通过试验研究了不同因素(搭接长度、保护层厚度、混凝土强度、配箍率以及 GFRP 筋直径)对 GFRP 筋在混凝土中搭接性能的影响规律,提出了 GFRP 筋在混凝土中的搭接粘结强度计算公式及搭接长度计算公式。

综上所述,目前对各种筋材的搭接受力性能、破坏特点以及搭接长度等已有深入研究,中国现行规范也对搭接构造要求进行了相关规定。然而,对钢绞线网在 ECC 中搭接性能鲜有研究。因此,本文以横向钢绞线间距、相对搭接长度、钢绞线直径为试验参数,对 39 个搭接连接试件进行中心对拉试验,以

探究高强不锈钢绞线网在 ECC 中的搭接连接性能影响规律,进而确定其临界搭接长度及相关构造措施。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试件设计

共制作了 39 个拉拔试件,考虑不同试验工况分为 4 组,每组 3 个试件。试件设计图如图 1 所示。图中, $a$  为试件长度, $l_0$  为非粘结段长度, $l_a$  为搭接长度, $c$  为试件的厚度。试件设计参数如表 1 所示。

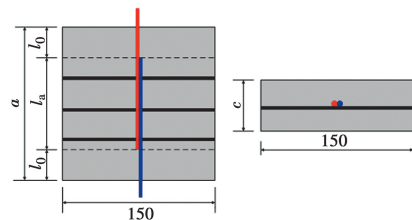


图 1 高强不锈钢绞线网增强 ECC 试件图(mm)

Fig. 1 Detail diagram of high-strength stainless steel strainer reinforced ECC specimen (mm)

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of ECC specimen

组号	直径 $d/\text{mm}$	搭接 长度	横向钢绞线 间距/mm	尺寸
A1	4.5	$15d$	0	150 mm×150 mm×50 mm
A2	4.5	$15d$	20	
A3	4.5	$15d$	30	
A4	4.5	$15d$	40	
B1	4.5	$20d$	30	150 mm×150 mm×50 mm
B2	4.5	$28d$	30	150 mm×200 mm×50 mm
B3	4.5	$32d$	30	
C1	3.2	$20d$	30	150 mm×150 mm×37 mm
C2	3.2	$22d$	30	
C3	3.2	$25d$	30	
D1	2.4	$20d$	30	150 mm×100 mm×27 mm
D2	2.4	$22d$	30	
D3	2.4	$25d$	30	

### 1.2 加载方式及量测方案

由于试验机尺寸限制,搭接试验在图 2 所示的

自制钢吊篮中进行。试验采用穿心液压千斤顶进行手动加载,整个装置横卧式放置,左端为加载端,右端采用两块打孔的钢板对钢绞线端头进行固定。在试件上下两侧放置钢管保证试件处于装置中心位置,避免偏心受拉。

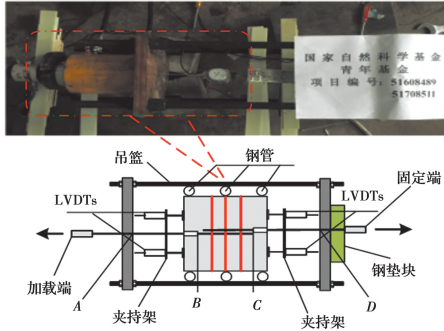


图 2 试验装置及示意图

Fig. 2 Test equipment and schematic diagram

试验采用力加载方式,每级荷载按照 5% 的最大荷载进行递增。试验时,钢绞线被拉断或者拔出即停止加载。分别测量加载端 B 点和 C 点的相对位移。考虑 AB、CD 段受力较大且有一定长度,因此,B、C 两点的实际位移可用 A、D 两点的位移分别去除 AB、CD 段的变形表示。

AB 段变形:

$$S_{AB} = \frac{Fl_{AB}}{E_s A_s} \quad (1)$$

式中: $F$  为外荷载,即拉拔力; $l_{AB}$  为 AB 段的长度; $E_s$ 、 $A_s$  分别为钢绞线的弹性模量和实测截面面积。

从而可以得到试件左端的实际滑移  $S_l$ 。

$$S_l = S_A - S_{AB} \quad (2)$$

式中: $S_A$  为 A 点的位移。

试件右端实际滑移  $S_r$  与左端滑移  $S_l$  计算方法相同。

粘结段的实际滑移量  $S$ :

$$S = S_l + S_r \quad (3)$$

平均粘结应力  $\tau$ :

$$\tau = \frac{F}{\pi d l_a} \quad (4)$$

式中: $d$  为钢绞线的公称直径; $l_a$  为搭接长度。

### 1.3 材料性能试验结果

钢绞线:每种直径的钢绞线均取 3 个试样,其拉伸试验结果取平均值,见表 2;其测得的应力-应变曲线如图 3 所示。

表 2 钢绞线材料属性

Table 2 Steel strand material properties

公称直径/mm	极限荷载/kN	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限拉应变/%
2.4	4.42	1 568.30	1.30	3.07
3.2	7.87	1 589.23	0.97	4.08
4.5	16.23	1 687.45	1.08	3.78

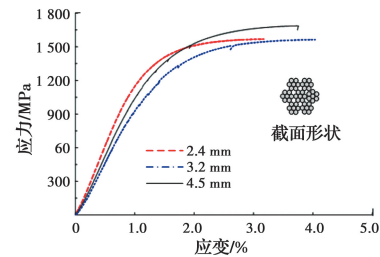


图 3 钢绞线应力-应变试验曲线

Fig. 3 Stress-strain test curve of steel strand

ECC 力学性能:ECC 受压性能由  $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$  立方体试块经 28 d 标准养护测得;其拉伸性能由薄板长条试件的单轴拉伸试验测得,试件尺寸为  $280 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。ECC 受拉应力-应变曲线如图 4 所示。其抗压强度、极限抗拉强度及对应的伸长率分别为 32.45 MPa、2.83 MPa、2.2%。

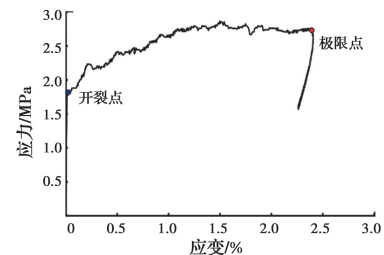


图 4 ECC 拉伸应力-应变试验曲线

Fig. 4 ECC tensile stress-strain test curve

## 2 试验现象及结果

### 2.1 试验现象

试验结果表明,钢绞线搭接的破坏模式分为两种:钢绞线拔出破坏和拉断破坏,其破坏模式如图 5 所示。

钢绞线拔出破坏(P):A、B1、B2 部分试件、C1、C2、D1、D2 组试件钢绞线被拔出。从图 6 可以看出,试件加载初期,两端位移均缓慢增加,随着荷载增加,荷载-滑移曲线逐渐呈非线性,当接近峰值荷

载时,荷载增速放缓,滑移增加较大,达到峰值荷载后,试件一侧纵向钢绞线突然被拔出约 10 mm,同时,荷载降至峰值荷载的 40%左右。

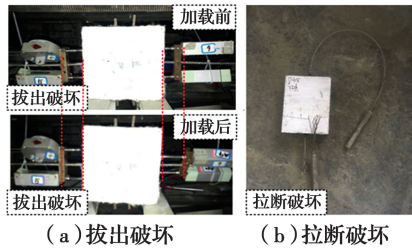


图 5 试件破坏模式

Fig. 5 Failure mode of ECC specimens enhanced by high strength stainless steel stranding

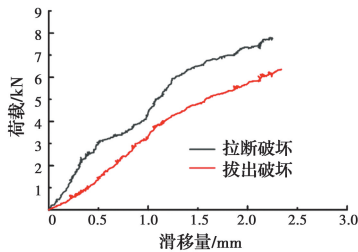


图 6 钢绞线破坏时的典型荷载-滑移曲线

Fig. 6 Typical load-slip curve when steel strand breaks

钢绞线拉断破坏(R):B2 剩余试件、B3、C3、D3 组试件钢绞线被拉断。荷载-滑移曲线如图 6 所示,试件加载初期,两端位移均缓慢增加,随着荷载增加,荷载-滑移曲线逐渐呈非线性,当接近峰值荷载时,荷载增速放缓,滑移增加较大,达到峰值荷载前,滑移曲线非线性较为明显。随后,荷载达到钢绞线的极限承载力(4.5、3.2、2.4 mm 钢绞线的极限承载力分别为 14.4、7.8、4.3 kN),整根钢绞线被拉断。

搭接试件发生上述破坏(钢绞线拔出、钢绞线拉断)时,荷载均迅速下降,破坏过程较为突然,脆性较大。此后,位移计所测数据产生较大偏差,因此,后续分析中仅考虑滑移曲线的上升段,不再考虑其下降段。

2.2 试验结果分析

表 3 为各试件的试验结果,从表中可以看出,A、B1、B2 部分试件、C1、D1 组试件(搭接长度较小)均为钢绞线拔出破坏。B2 剩余试件、B3、C3、D3 组试件(搭接长度较长)为钢绞线拉断破坏。A 组试件(4.5 mm、搭接长度 15d)峰值荷载基本接近,但 A1 组(无横向钢绞线)峰值荷载对应的滑移量为 2.99 mm; A2-A4 (横向钢绞线间距为 20、30、40 mm)对应的滑移量分别为 1.57、2.03、2.48 mm。由此可知,横向钢绞线的设置及间距的改变对钢绞线网/ECC 搭接时的峰值荷载影响不大,但随着横向钢绞线间距的减小,各组试件峰值荷载对应的滑移逐渐较小。这表明横向钢绞线可以有效约束纵向钢绞线的滑移,并且随着横向钢绞线间距的减小,约束效果越明显,但未改变其脆性破坏的性质。B1-B3 试件(搭接长度由 20d 增至 32d)的峰值荷载由 11.6 kN 增至 14.4 kN,对应的滑移量由 2.21 mm 增至 2.77 mm; C、D 组试件类似,表明钢绞线网的搭接长度对搭接性能影响较大。搭接长度均为 20d 的 B1、C1、D1 这 3 组试件(钢绞线网直径分别为 4.5、3.2、2.4 mm),随着钢绞线直径的增大,峰值荷载由 3.84 kN 增长 11.60 kN,而对应的滑移量由 2.38 mm 降至 2.21 mm,这表明钢绞线直径对其搭接性能影响较大。

表 3 试验结果

Table 3 Test results

组号	编号	试件尺寸	$T_a$	$\tau_a$	$s_a$	破坏模式
A1	4.5-15d-0-1	150 mm×150 mm×50 mm	10.25	10.75	2.93	P
	4.5-15d-0-2		10.32	10.82	3.05	P
	4.5-15d-0-3		10.04	10.53	2.98	P
A2	4.5-15d-20-1	150 mm×150 mm×50 mm	10.14	10.63	1.65	P
	4.5-15d-20-2		10.17	10.66	1.62	P
	4.5-15d-20-3		13.05	13.68	1.45	P
A3	4.5-15d-30-1	150 mm×150 mm×50 mm	10.22	10.72	2.03	P
	4.5-15d-30-2		10.54	11.05	2.03	P
	4.5-15d-30-3		10.23	10.73	2.02	P

续表 3

组号	编号	试件尺寸	$T_a$	$\tau_a$	$s_a$	结果
A4	4.5-15d-40-1	150 mm×150 mm×50 mm	9.99	10.47	2.41	P
	4.5-15d-40-2		10.25	10.75	2.53	P
	4.5-15d-40-3		10.42	10.93	2.50	P
B1	4.5-20d-30-1	150 mm×150 mm×50 mm	11.70	9.20	2.23	P
	4.5-20d-30-2		11.70	9.20	2.18	P
	4.5-20d-30-3		11.38	8.95	2.22	P
B2	4.5-28d-30-1	150 mm×200 mm×50 mm	14.40	8.09	2.62	S
	4.5-28d-30-2		14.21	7.98	2.52	P
	4.5-28d-30-3		14.19	7.97	2.63	P
B3	4.5-32d-30-1	150 mm×200 mm×50 mm	14.35	7.05	2.79	R
	4.5-32d-30-2		14.50	7.13	2.73	R
	4.5-32d-30-3		14.29	7.02	2.78	R
C1	3.2-20d-30-1	150 mm×150 mm×37 mm	6.41	9.97	2.30	P
	3.2-20d-30-2		6.29	9.78	2.35	P
	3.2-20d-30-3		6.36	9.89	2.34	P
C2	3.2-22d-30-1	150 mm×150 mm×37 mm	7.00	9.90	2.47	P
	3.2-22d-30-2		7.08	10.01	2.56	P
	3.2-22d-30-3		6.98	9.87	2.49	P
C3	3.2-25d-30-1	150 mm×150 mm×37 mm	7.71	9.59	2.64	R
	3.2-25d-30-2		7.78	9.68	2.63	R
	3.2-25d-30-3		7.79	9.69	2.65	R
D1	2.4-20d-30-1	150 mm×100 mm×27 mm	3.84	10.62	2.42	P
	2.4-20d-30-2		3.83	10.59	2.38	P
	2.4-20d-30-3		3.85	10.64	2.35	P
D2	2.4-22d-30-1	150 mm×100 mm×27 mm	4.02	10.10	2.57	P
	2.4-22d-30-2		4.07	10.23	2.53	P
	2.4-22d-30-3		3.99	10.03	2.52	P
D3	2.4-25d-30-1	150 mm×100 mm×27 mm	4.27	9.44	2.72	R
	2.4-25d-30-2		4.43	9.80	2.78	R
	2.4-25d-30-3		4.29	9.49	2.63	R

注:  $T_a$ 为峰值拉拔荷载, kN;  $\tau_a$ 为峰值荷载  $T_a$ 下采用式(4)计算得到的平均粘结应力, MPa;  $s_a$ 为峰值荷载  $T_a$ 下采用式(3)计算得到的滑移量, mm; P为钢绞线的拔出破坏; R为钢绞线的拉断破坏。

### 3 搭接性能影响因素分析

#### 3.1 横向钢绞线及其间距影响分析

图 7 为 A 组试件(锚固长度为  $15d$ , A1 无横向钢绞线, A2、A3、A4 间距分别为 20、30、40 mm)的荷载-滑移曲线。从图 7 中可以看出, A 组试件的峰值荷载较为接近, 这表明横向钢绞线的引入对搭接时的粘结力及搭接时的极限粘结应力影响不大。但达到峰值荷载时, 对应的滑移量相差较大, 且同级荷载

下对应的纵向钢绞线滑移量随着横向钢绞线间距的减小而减小。

由试验结果绘制不同横向钢绞线间距( $l_d$ )与滑移量( $s_a$ )的关系曲线, 如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 横向钢绞线的间距与峰值荷载对应的滑移量呈正相关; 横向钢绞线间距越大, 达到峰值荷载时的滑移量越大。这表明: 对于搭接试件, 横向钢绞线可以对纵向钢绞线形成有效约束, 从而减小其相同荷载下的滑移量; 且横向钢绞线间距越小, 约束作用越明

显。横向钢绞线的设置,对搭接试件的脆性破坏模式影响不大。该现象主要是由于搭接试件中两根纵向钢绞线并排放置,紧密靠拢,与粘结试件相比,钢绞线周围 ECC 的握裹作用减小,且两纵向钢绞线之间的 ECC 受到双向挤压,而横向钢绞线对其缓解作用有限。

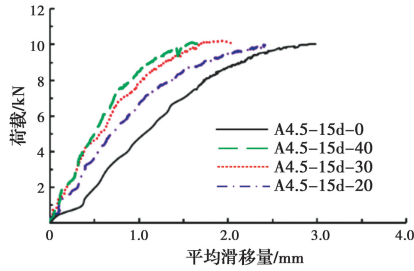


图 7 不同横向钢绞线间距试件的荷载-滑移曲线  
Fig. 7 Load-slip curve of specimens with different transverse steel wire spacing

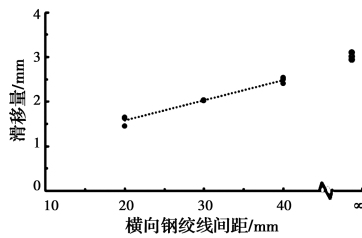


图 8 横向钢绞线间距( $l_a$ )与滑移量( $s_a$ )关系曲线  
Fig. 8 Curve of relationship between transverse steel strand spacing ( $l_a$ ) and slip ( $s_a$ )

### 3.2 搭接长度影响分析

由试验结果可知,搭接长度对钢绞线搭接连接性能影响较大,不同搭接长度试件的荷载-滑移曲线如图 9 所示。从图 9(a)中可以看出,滑移初期,4.5 mm 不同搭接长度的 3 组试件(搭接长度分别为 15d、20d、28d)的滑移量相差不大;从图 9(b)、(c)可以看出,3.2、2.4 mm 不同搭接长度的 3 组试件(搭接长度为 20d、22d 和 25d),随着搭接长度的增加,同级荷载对应的滑移量减小。滑移后期,随着搭接长度的增加,相同荷载下产生的滑移量减小,但达到最大荷载时,滑移量变大。表明随着搭接长度的增加,“搭接刚度”增加。

依据试验结果,绘制不同钢绞线直径试件相对搭接长度( $l_a$  相对搭接长度是指钢绞线搭接长度与相应钢绞线直径的比值,为充分考虑并分析“搭接长度”单一因素对搭接性能的影响,采用相对搭接长

度。)与滑移量( $s_a$ )的关系曲线,如图 10 所示。从图中可以看出,相对搭接长度与滑移量呈正相关,随着相对搭接长度的增加,达到峰值荷载时的滑移量增大,上升段的斜率也变大。

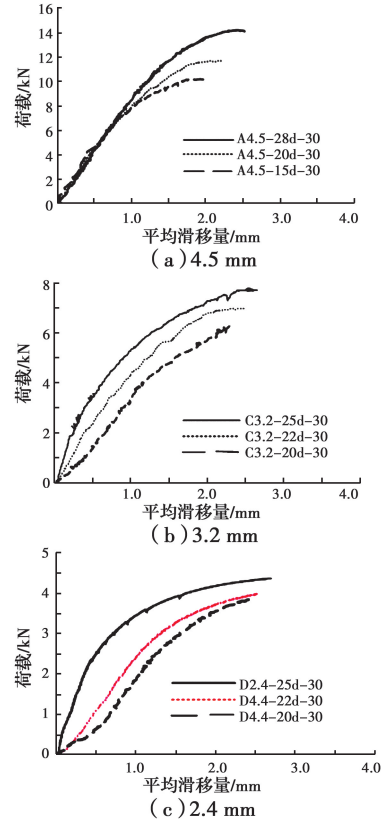


图 9 不同搭接长度试件的荷载-滑移曲线  
Fig. 9 Load-slip curves of specimens were enhanced by different bond lengths

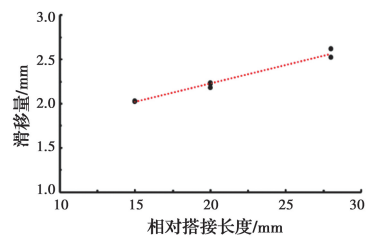


图 10 相对搭接长度( $l_a$ )与滑移量( $s_a$ )关系曲线图  
Fig. 10 Curve of relative lap length ( $l_a$ ) and slip ( $s_a$ )

不同钢绞线直径试件相对搭接长度( $l_a$ )与极限粘结应力( $\tau_a$ )的关系曲线如图 11 所示。从图中可以看出,搭接长度与搭接时的极限粘结应力呈负相关;搭接长度越长,搭接时极限粘结应力越低,该现象主要是由于在拉拔过程中沿搭接长度方向的粘结应力分布不均匀,随着搭接长度的减小,高应力区的相对长度增加,应力较为丰满,故其极限粘结应力越

高,且搭接长度越小,其平均粘结应力越接近真实粘结强度。

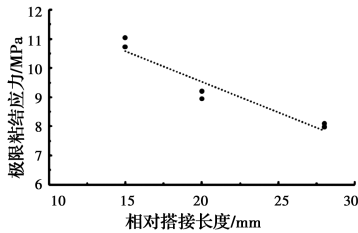


图 11 相对搭接长度( $l_a$ )与极限粘结应力( $\tau_a$ )关系曲线图

Fig. 11 Curve of relative lap length ( $l_a$ ) and ultimate bond stress ( $\tau_a$ )

### 3.3 钢绞线直径影响分析

横向钢绞线间距和搭接长度相同时,钢绞线直径不同的搭接试件的荷载-滑移曲线如图 12 所示。从图中可以看出,随着钢绞线直径的增加,相同荷载下所对应的滑移量减小。且钢绞线直径越大,试件极限拉拔力越大。达到峰值荷载时,滑移量越小,荷载滑移曲线上升段的斜率越大,“搭接刚度”越大。

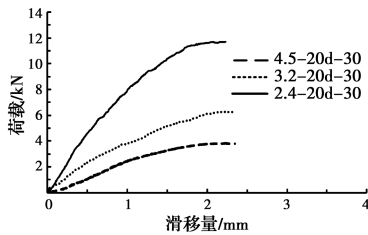


图 12 钢绞线直径不同试件的荷载-滑移曲线

Fig. 12 Load-slip curve of steel strand specimens with different diameter

图 13 为峰值荷载作用下,滑移量( $s_a$ )和极限粘结应力( $\tau_a$ )与钢绞线网直径( $d$ )的关系曲线图。从图中可以看出,钢绞线直径与滑移量和极限粘结应力均呈负相关。随着钢绞线直径的增大,达到峰值荷载时的滑移量越小。钢绞线直径越大,搭接时极限粘结应力越低,该现象主要是由于泊松效应,钢绞线在受拉过程中,钢绞线沿径向产生收缩变形降低了两者的粘结性能,并随着钢绞线直径增加,泊松效应越明显,钢绞线产生的径向变形越大,从而导致钢绞线与 ECC 的粘结强度降低。

## 4 临界搭接长度的确定

由搭接试验结果可以看出,当 4.5 mm 钢绞线在搭接长度为  $28d$  时,一个试件为钢绞线拉断破坏,

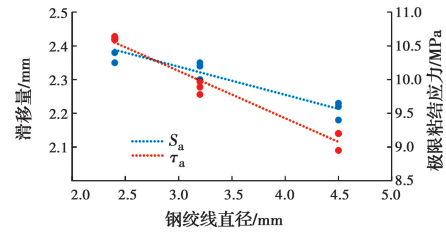


图 13 峰值荷载下滑移量( $s_a$ )和极限粘结应力( $\tau_a$ )与钢绞线网直径( $d$ )的关系曲线图

Fig. 13 Curve of the relationship between the peak load slip ( $s_a$ ) and the ultimate bond stress ( $\tau_a$ ) and the diameter of the stranded wire mesh ( $d$ )

两个试件为钢绞线滑移破坏;而搭接长度为  $32d$  的试件钢绞线全部被拉断。由此,可以将  $28d$  作为 4.5 mm 钢绞线的临界搭接长度。同理,3.2、2.4 mm 钢绞线的临界搭接长度均为  $25d$ 。

在临界锚固长度计算公式的基础上,引入修正系数  $\beta$ ,得到临界搭接长度的计算公式

$$l_a = \beta \times 0.041 \times \frac{f_y}{f_t} d \quad (5)$$

式中: $l_a$ 为临界搭接长度; $d$ 为钢绞线直径; $f_y$ 为钢绞线极限抗拉强度; $f_t$ 为 ECC 极限抗拉强度。

将上述结果及相关材性数据代入式(5),进行数据拟合,结果如图 14 所示。基于试验结果,确定修正系数  $\beta=1.17$ ,近似取为 1.2。

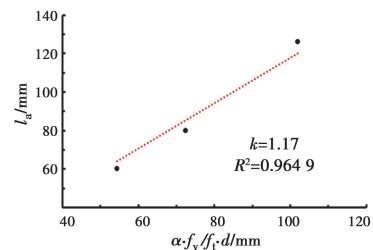


图 14 修正系数拟合

Fig. 14 Modified coefficient fitting

## 5 结论

通过对 4 组 39 个高强不锈钢绞线网/ECC 试件进行拉拔试验,分析了横向钢绞线间距、钢绞线直径及搭接长度对其搭接性能的影响规律,得出以下主要结论:

1)对于搭接试件,横向钢绞线的设置可以约束纵向钢绞线的滑移;在一定范围内,横向钢绞线间距越小,达到峰值荷载时滑移量越小,但不会改变搭接

破坏时的脆性特征。

2) 钢绞线网/ECC 搭接时的极限粘结应力与钢绞线直径和搭接长度均成负相关。钢绞线直径越大及搭接长度越长, 搭接时的极限粘结应力越小。

3) 基于试验结果, 确定了钢绞线网与 ECC 的临界搭接长度; 并在钢绞线网/ECC 临界锚固长度计算公式的基础上, 提出了引入修正系数  $\beta$  的搭接长度计算公式。

#### 参考文献:

- [1] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [2] 徐世焯, 蔡向荣. 超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能 [J]. *水利学报*, 2009, 40(9): 1055-1063.  
XU S L, CAI X R. Experimental study on mechanical properties of ultra-high toughness fiber reinforced cementitious composite [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(9): 1055-1063. (in Chinese)
- [3] 李可, 金蕾蕾, 刘伟康, 等. 考虑多参数影响的水泥基复合材料单轴抗压性能试验研究 [J]. *工业建筑*, 2018, 48(2): 139-143, 148.  
LI K, JIN L L, LIU W K, et al. Experimental research on the uniaxial compressive behavior of ECC considering effects of multiple parameters [J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(2): 139-143, 148. (in Chinese)
- [4] 潘毅, 蔡联亨, 郭瑞, 等. 碳纤维增强复合网格-聚合物水泥砂浆加固 RC 梁抗剪性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(4): 110-118.  
PAN Y, CAI L H, GUO R, et al. Experimental study on shear performance of RC beams strengthened with CFRP grid-PCM [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(4): 110-118. (in Chinese)
- [5] 卜良桃, 万长胜, 尹鹏. PVA-ECC 加固 RC 足尺梁受弯性能试验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(1): 5-10.  
BU L T, WAN C S, YIN P. Experimental study of full-scale RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite mortar in flexure [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2010, 37(1): 5-10. (in Chinese)
- [6] 薛会青, 邓宗才. HRECC 梁弯曲性能的试验研究与理论分析 [J]. *土木工程学报*, 2013, 46(4): 10-17.  
XUE H Q, DENG Z C. Experimental and theoretical studies on bending performance of HRECC beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(4): 10-17. (in Chinese)
- [7] 徐世焯, 李庆华, 李贺东. 碳纤维编织网增强超高韧性水泥基复合材料弯曲性能的试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2007, 40(12): 69-76.  
XU S L, LI Q H, LI H D. An experimental study on the flexural properties of carbon textile reinforced ECC [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(12): 69-76. (in Chinese)
- [8] 聂建国, 王寒冰, 张天申, 等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗弯加固的试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(2): 1-9.  
NIE J G, WANG H B, ZHANG T S, et al. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(2): 1-9. (in Chinese)
- [9] 王新玲, 杨广华, 钱文文, 等. 高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料受拉应力-应变关系 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(12): 1-9.  
WANG X L, YANG G H, QIAN W W, et al. Tensile stress-strain relationship of engineered cementitious composites reinforced by high-strength stainless steel wire mesh [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 37(12): 2020;1-9. (in Chinese)
- [10] 朱俊涛, 张凯, 王新玲, 等. 高强不锈钢绞线网与 ECC 黏结-滑移关系模型 [J]. *土木工程学报*, 2020, 53(4): 83-92.  
ZHU J T, ZHANG K, WANG X L, et al. Bond-slip relational model between high-strength stainless steel wire mesh and ECC [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(4): 83-92. (in Chinese)
- [11] 朱俊涛, 李焱, 王新玲. 考虑横向钢绞线影响的钢绞线网/工程水泥基复合材料黏结性能试验研究 [J]. *工业建筑*, 2018, 48(11): 143-148.  
ZHU J T, LI Y, WANG X L. Experimental research on bonding performance of stainless steel wire mesh/ECC with horizontal steel wire [J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(11): 143-148. (in Chinese)
- [12] NAJAFGHOLIPOUR M A, DEGHAN S M,



- KHANI M, et al. The performance of lap splices in RC beams under inelastic reversed cyclic loading [J]. Structures, 2018, 15: 279-291.
- [13] 尹世平, 徐世焯, 王菲. 纤维编织网在细粒混凝土中的黏结和搭接性能[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 34-41.
- YIN S P, XU S L, WANG F. Investigation on bonding and overlapping performance of textile in fine grained concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15 (1): 34-41. (in Chinese)
- [14] 饶依文. 页岩陶粒混凝土约束浆锚钢筋搭接连接性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- RAO Y W. Constrain-anchorage reinforcement in shale ceramicsite concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] 江佳斐, 隋凯, 马川峰, 等. 预制装配式混凝土螺旋箍筋约束浆锚钢筋搭接性能研究现状[J]. 施工技术, 2018, 47(12): 44-47.
- JIANG J F, SUI K, MA C F, et al. Review of grout-filled rebar splicing confined by spiral stirrups for precast concrete [J]. Construction Technology, 2018, 47(12): 44-47. (in Chinese)
- [16] 吴涛, 刘全威, 赵天俊, 等. 预制装配式结构中预留孔钢筋浆锚搭接的试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47 (5): 68-73.
- WU T, LIU Q W, ZHAO T J, et al. Experimental research on reinforced anchorage by grouting in preformed hole of prefabricated concrete structure [J]. Industrial Construction, 2017, 47 (5): 68-73. (in Chinese)
- [17] CHOI W C, JANG S J, YUN H D. Bond and cracking behavior of lap-spliced reinforcing bars embedded in hybrid fiber reinforced strain-hardening cementitious composite (SHCC) [J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 108: 35-44.
- [18] METELLI G, MARCHINA E, PLIZZARI G A. Experimental study on staggered lapped bars in fiber reinforced concrete beams [J]. Composite Structures, 2017, 179: 655-664.
- [19] 方志, 陈潇, 张门哲, 等. 活性粉末混凝土中带肋钢筋搭接性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 20-28, 49.
- FANG Z, CHEN X, ZHANG M Z, et al. Experimental study on performance of lap-spliced ribbed steel bars in reactive powder concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 20-28, 49. (in Chinese)
- [20] 惠慧. 玻璃纤维增强聚合物(GFRP)筋搭接性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- HUI H: Experimental study on the lap performance of tensile GFRP bars [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)