

# PVA-ECC 钢丝网复合薄板弯曲性能试验研究

袁微微<sup>1</sup>, 杜文平<sup>2</sup>, 杨才千<sup>2,3</sup>, 王 冲<sup>2</sup>, 潘 勇<sup>4</sup>, 孟春麟<sup>4</sup>

(1. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096;  
3. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411100; 4. 江苏东部高速公路管理有限公司, 江苏 盐城 224002)

**摘要:** 为了研究聚乙烯醇纤维增韧水泥基复合材料(PVA-ECC)和钢丝网协同作用下试件的弯曲性能, 本试验共设计了 10 组复合薄板试件进行四点弯试验, 主要考虑钢丝网类型、钢丝网横向连接间距和层数等参数的因素. 详细分析了试件失效特性、荷载-挠度曲线、强度、刚度和耗能能力. 试验结果表明: PVA-ECC 与钢丝网协同作用良好, 二者结合大幅提升了 PVA-ECC 的抗弯性能, 钢丝网的加入大幅提高了试件的强度、刚度和耗能性能, 刚度提高 38% 以上, 极限强度和耗能能力分别提高 3 倍和 4 倍以上; 随着钢丝网横向连接间距的增大, 试件的力学性能呈现出削弱的趋势. 试件呈现出显著的应变硬化特性和“多且密”的多缝开裂延性破坏特征.

**关键词:** PVA-ECC; 钢丝网; 弯曲性能; 刚度比; 裂缝开展

**中图分类号:** TU528.28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2020)01-0085-07

## Study on the bending behavior of PVA-ECC thin composite plates with steel wire mesh

YUAN Weiwei<sup>1</sup>, DU Wenping<sup>2</sup>, YANG Caiqian<sup>2,3</sup>, WANG Chong<sup>2</sup>, PAN Yong<sup>4</sup>, MENG Chunlin<sup>4</sup>

(1. China Design Group Co. Ltd., Nanjing 210000, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Hunan Xiangtan 411100, China;

4. Jiangsu Eastern Expressway Management Co. Ltd., Jiangsu Yancheng 224002, China)

**Abstract:** To investigate the flexural behavior of Polyvinyl alcohol fiber-engineered cementitious composites (PVA-ECC) reinforced with steel wire mesh, a total of 10 groups of thin plates were investigated and studied under 4-point bending experiments. The key variables include the type, transverse wire spacing, layer number and location of welded wire mesh. The mechanical properties and failure modes of all the specimens were investigated in detail, including the failure modes, load-deflection curves, strength, stiffness and energy dissipation. Results showed that the PVA-ECC can work well with the steel mesh, and that the flexural properties of the PVA-ECC can be importantly upgraded. The stiffness was improved by 38%, and the ultimate strength and energy dissipation were 3 and 4 times higher than the control specimens, respectively. The parameter of transverse wire spacing had an important influence on the mechanical behaviors of the specimens, and they will be weakened with the increase in the transverse wire spacing. Moreover, the failures of the specimens were characterized by a strain-hardening behavior and multiple cracking development characteristics.

**Key words:** PVA-ECC; steel wire mesh; bending behavior; stiffness ratio; crack development

钢丝网水泥基复合材料是以布置紧密的多层钢丝网或小尺寸钢筋作为增强材料, 水泥砂浆为基体组合而成的一种薄壁结构材料. 钢丝网也可以由其它合适的材料代替, 如纤维增强复合材料和织网<sup>[1]</sup>. 与钢筋混凝土相比, 钢丝网水泥基复合材料在横向和纵向具有均匀的正交各向异性. 它具有高拉伸强度, 高模量和优异的开裂性能. 此

外, 由于钢丝网水泥基复合材料内网格的大比表面积, 与水泥基之间形成较大的结合力, 会产生较小的裂缝间距和宽度<sup>[2]</sup>. 但是当作为层压复合材料时, 钢丝网水泥通常遭受基体的严重剥落, 以及在高配筋率下, 会出现拉伸层的分层现象, 导致过早失效<sup>[3]</sup>.

聚乙烯醇纤维增韧水泥基复合材料(Polyvinyl

收稿日期: 2019-05-18

修改稿日期: 2020-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808040); 湖南省重点研发计划基金项目(2018WK2111); 湖南省创投基金项目(2018GK5028)

第一作者: 袁微微(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事桥梁加固和高性能材料研究. E-mail: 38836669@qq.com.

通讯作者: 杨才千(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事高性能复合材料和桥梁加固等研究. E-mail: ycqx@seu.edu.cn.

alcohol Fiber-Engineered Cementitious Composites, 简称 PVA-ECC)主要以水泥、水泥加填料或者粒径不大于 5 mm 的细集料作为基体,用 PVA 纤维作为增强材料的一种高性能复合材料.国内外研究者在拉伸性能、弯曲性能、抗压性能和剪切性能等方面对 PVA-ECC 进行大量试验研究<sup>[4]~[7]</sup>,表明 PVA-ECC 相比普通水泥基复合材料表现出良好的受拉性能和延性特征.

由于短纤维在基体中呈不均匀分布,不能充分发挥其强度,进而不能承担某个明确方向的受力,若要达到增强效果,需大批量掺加,造成浪费.同时,PVA 纤维的加入可大幅提高材料的韧性和改善其破坏失效特性,但不能在抗压强度、弹性模量和抗弯强度等方面有明显提高<sup>[8-10]</sup>.随着纤维量的增加,PVA-ECC 的抗压强度和弹性模量反而出现降低的趋势.相比于短切纤维,钢丝网的应力分布较为规律,因而能够像钢筋一样,承担径向的受力,可以提高其增强效果.在弹性模量方面,加入钢丝网能够提高构件的弹性模量,显著改善复合薄板构件的受力特性.在 PVA-ECC 中加入钢丝网,能够改善应力传递途径,一定程度的改善了 PVA-ECC 的收缩特性<sup>[11-15]</sup>.此外,由于纤维的耐腐蚀性,在钢丝网水泥基复合材料中加入 PVA 纤维能够提高构件耐久性,可以一定程度改善钢丝网保护层厚度限制的局限性,在加固构件应用方面更加灵活.但是 PVA-ECC 提升力学性能有限,需结合钢丝网来改善其性能.

因此,为了进一步探讨 PVA-ECC 和钢丝网的协同作用,本文通过设置不同参数的 PVA-ECC 钢丝网复合薄板进行四点弯试验,研究钢丝网网格尺寸、配筋率、横向连接间距和位置等因素对钢丝网水泥弯曲性能影响.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验中使用的 ECC 由以下原料组成:①水泥:P.O 42.5 级的普通硅酸盐水泥;②粉煤灰:I 级粉煤灰;③硅灰;④精细石英砂:粒径在 30~100 目之间;⑤减水剂:聚羧酸类高性能减水剂;⑥水;⑦PVA 纤维:日本 Kuraray Co. Ltd 公司生产的可乐丽 PVA 纤维,性能参数如表 1 所示.试验选用钢丝网如图 1 和 2 所示,相应尺寸和性能参数如表 2 所示.

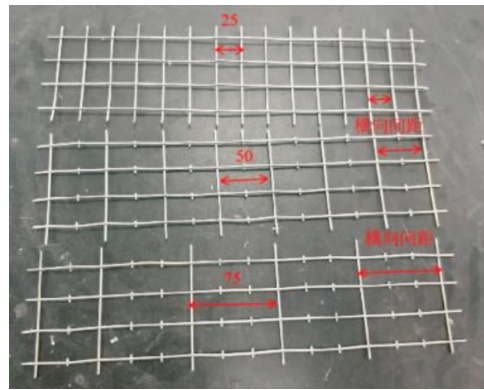


图 1 M1 钢丝网  
Fig. 1 M1 welded wire mesh

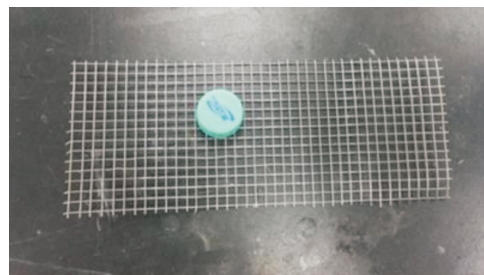


图 2 M2 钢丝网  
Fig. 2 M2 welded wire mesh

表 1 PVA 纤维性能参数

Tab. 1 Mechanical properties of PVA fibers

直径/ $\mu\text{m}$	长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	伸长率/%
39	12	1 620	42.8	1.3	7

表 2 钢丝网性能参数

Tab. 2 Mechanical properties of welded wire mesh

钢丝网编号	网格尺寸/ $(\text{mm} \times \text{mm})$	单丝直径/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
M1	25 $\times$ 25	2	450	202	8.5
M2	6 $\times$ 6	0.8	450	202	6.3

### 1.2 试件制作

本试验试件选用 ECC 的配合比如表 3 所示,

由搅拌机搅拌约 5 min 使砂浆成形.选用尺寸为 400 mm  $\times$  100 mm  $\times$  15 mm 的钢模具,首先铺入

10 mm 或 5 mm 厚的 ECC, 用刮刀将其表面刮平, 然后将钢丝网铺在 ECC 表面, 给予向下的力使其到所标记的位置, 确保钢丝网嵌入 ECC 中. 最后将试件放到振动台上振动约 2 min, 将试件表面抹平. 浇筑完成的试件 24 h 后脱模, 放入标准养护

箱养护 28 d 后将试件取出置于实验室环境下, 待表面干燥后进行试验. 共浇筑 10 组试件, 具体试件名称和详细情况, 如表 4 所示. 表中  $V_f$  为钢丝网配筋率—钢丝网体积和试件体积的比值,  $V_{fl}$  为纵向钢丝配筋率—纵向钢丝网体积和试件体积的比值.

表 3 ECC 配合比

Tab. 3 Mixture proportions of ECC cementitious matrix

水泥	粉煤灰	硅灰	精细砂	水	减水剂	纤维(体积)
0.49	0.46	0.05	0.5	0.3	0.6%	1.5%

表 4 试验试件概况

Tab. 4 Details of experimental program

试件编号	$V_f$ /%	$V_{fl}$ /%	横向间距 /mm	纤维含量 /%	钢丝网		
					层数	位置	描述
P	—	—	—	0.0	—	—	—
P0	—	—	—	1.5	—	—	—
PM1	1.67	0.84	25	1.5	1	受拉区	离试件底部 5 mm
PM1-2	3.35	1.67	25	1.5	2	受拉和受压区	离试件底部 5 mm 和 10 mm
PM1-a	1.67	0.84	25	1.5	1	受压区	离试件顶部 5 mm
PM1-50	1.26	0.84	50	1.5	1	受拉区	离试件底部 5 mm
PM1-75	1.12	0.84	75	1.5	1	受拉区	离试件底部 5 mm
PM2	1.12	0.56	6	1.5	1	受拉区	离试件底部 5 mm
PM2-2	2.23	1.12	6	1.5	2	受拉和受压区	离试件底部 5 mm 和 10 mm
PM2-a	1.12	0.56	6	1.5	1	受压区	离试件顶部 5 mm

注: PX-Y 编号方法, 其中 X 为 M1、M2 表明试件选用钢丝网型号; Y 为 2 时表明构件含有两层钢丝网(其它未做说明的表明只有一层钢丝网); Y 为 a 时表明钢丝网位置位于受压区; Y 为 50、75 时表明钢丝网横向连接的间距; 试件 P 为不掺纤维的纯砂浆试件; 试件 P0 为纯 PVA-ECC 试件.

1.3 试验方法

本试验主要通过四点弯试验来研究复合薄板的抗弯性能, 复合薄板净跨度为 300 mm, 纯弯段为 100 mm, 万能试验机的量程范围为 10 kN, 如图 3 所示. 跨中挠度采用位移计测量, 实时数据通过 TST-3827E 采集仪进行测量, 采集频率为 5 Hz. 试验加载方式采取位移控制, 速率为 0.5 mm/min. 试验测试的主要内容有: 破坏模式、荷载-挠度曲线、开裂荷载和极限荷载, 同时记录试件裂缝开展方式.

2 试验结果及分析

根据测得的荷载及位移, 绘制出相应的荷载-挠度曲线. 荷载-挠度曲线的挠度范围统一取 0~30 mm. 本试验每组复合薄板共制作了 3 个试件, 由于曲线取平均值存在一定的困难性, 故荷载-挠度曲线取其中具有代表性的曲线进行分析. 但是相应的裂缝数和平均间距、开裂荷载和极限荷载、

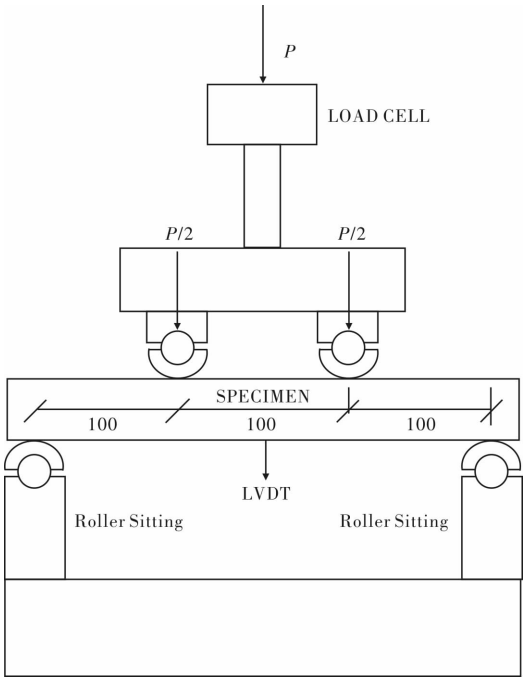


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Test specimen and setup

刚度比值均取每组三个试件的平均值. 试件加载结束后, 用裂缝观测仪观测试件的裂缝宽度和裂缝开展形态, 记录下裂缝条数并用记号笔标记出裂缝便于观察.

试验结果主要从破坏模式、荷载-挠度曲线、开裂荷载、极限荷载、耗能和刚度对 PVA-ECC 复合薄板的弯曲性能进行探讨, 得出相关结论.

2.1 破坏模式

在试件加载结束后, 将试件表面开展的裂缝用记号笔标记出来, 统计并记录相应的数据. 本文分别统计了跨中纯弯段 100 mm 内和全区域内的裂缝条数. 鉴于裂缝开展的致密性和多样性, 采用以下两种方法统计相应区域的裂缝条数: ①统计主要的贯穿裂缝, 不考虑主裂缝上的分支裂缝; ②统计所有的裂缝条数, 包含主裂缝上的分支裂

缝. 两种方法统计的数据结果见表 5, 其中纯砂浆试件 *P* 的破坏形式为典型的脆性破坏, 只出现一条主破坏裂缝, 不需要统计裂缝数量.

每组选取一个裂缝开展形态比较清晰的试件进行拍照记录, 如图 4 所示. 结合统计的裂缝数量和裂缝图对比, 发现: 加入纤维能够改善纯砂浆的破坏形态, 由脆性逐渐转变为延性; 加入钢丝网能够使裂缝呈现“多且密”的分布形态, 裂缝分布的范围也更广; 总体上, 网格尺寸偏小的 M2 钢丝网增强试件在裂缝开展形态方面要优于网格尺寸较大的 M1 钢丝网增强试件的裂缝开展形态; 钢丝网位于受压区时对贯穿裂缝的影响不大, 但增加试件的细微分支裂缝数; 横向连接间距对裂缝的开展有较大的影响, 横向连接间距越大, 裂缝条数越少, 裂缝开展形态越差.

表 5 微裂缝数量

Tab. 5 Number of cracks

贯穿裂缝数量	P0	PM1	PM1-2	PM1-a	PM1-50	PM1-75	PM2	PM2-2	PM2-a
纯弯段	9.3	16.5	17.0	10.7	13.5	8.5	19.0	22.5	12.7
全区域	12.7	34.5	40.3	24.0	25.0	13.5	40.3	43.5	27.7
所有裂缝数量	P0	PM1	PM1-2	PM1-a	PM1-50	PM1-75	PM2	PM2-2	PM2-a
纯弯段	13.7	26.5	28.7	16.3	17.5	11.5	24.3	31.5	17.3
全区域	18.3	41.5	55.0	32.3	31.5	18.0	48.0	56.0	33.7

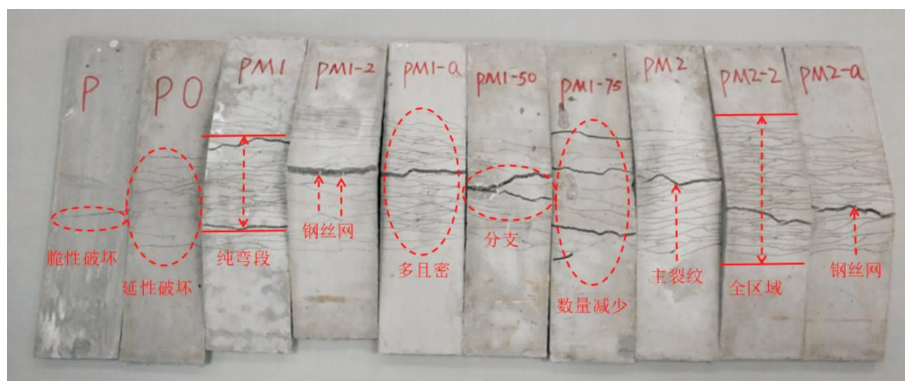


图 4 试件裂缝开展图

Fig. 4 Cracks pattern of specimens

2.2 荷载-挠度曲线

复合薄板试件 *P* 和 *P0* 的荷载-挠度曲线如图 5 (a)所示. 纯砂浆试件 *P* 呈现出典型的脆性破坏特征, 荷载达到极限荷载时, 试件瞬间发生脆性破坏. 不同于试件 *P*, 试件 *P0* 表现出良好延性. 当荷载达到开裂荷载, 试件开始产生裂缝, 随着荷载的不断增大, 曲线进入波动阶段, 这是源于试件的薄弱位置会形成微裂缝, 相应的荷载会出现小幅度的降低. 由于 PVA-ECC 中非定向均匀分布的 PVA 纤维的桥联作用, 裂缝处应力由纤维的桥

联作用重新传递给未开裂的水泥基基体, 并随着微裂缝的充分开展, 纤维作用发挥的越充分, 进而表现出应变硬化和多裂缝开展的特性. 直达到极限荷载后, 试件生成贯穿的主裂缝, 荷载明显下降、挠度增加迅速直至破坏.

图 5(b)为试件 *P0*、*PM1* 和 *PM2* 的荷载挠度曲线对比图. 可以看出, 加入钢丝网能够显著的提高试件的承载力, 承载力提高到 *P0* 承载力的 3 倍以上. 试件 *PM1* 和 *PM2* 的荷载-挠度曲线发展规律类似, 表现出良好的延性, 延性可提高到 *P0*

延性的 2 倍以上. 随着荷载的增加, 试件出现多条微裂缝, 刚度逐渐下降, 曲线出现拐点. 荷载继续增加, 裂缝不断发展形成贯穿的主裂缝, 基体发生破坏, 达到极限荷载. 随后荷载下降不明显, 这是由于基体退出工作, 钢丝网开始发挥主要作用.

图 5(c) 为试 PM2 和 PM2-a 的荷载-挠度曲线对比图. 从图中明显看出, 钢丝网位于受拉区的试件受力性能要优于钢丝网位于受压区的试件. 位于受压区的钢丝网在贯穿裂缝逐步开展到钢丝网所在位置时才开始发挥较大的作用, 试件依然呈现出良好的延性, 但在强度和初始刚度上发挥的作用有限.

PM1 和 PM1-2、PM2 和 PM2-2 的荷载-挠度曲线的对比图分别如图 5(d) 和图 5(e) 所示. 多加入一层钢丝网并不能显著改善试件的受力性能. 一方面, 位于受压区的钢丝网发挥的作用有限, 钢丝网的利用率比较低; 另一方面, 由于试件较薄, 且纤维长度相比于钢丝网网格尺寸较大, 多加入一层钢丝网破坏了基体的整体性.

考虑横向连接间距对试件受力性能影响的 PM1、PM1-50、PM1-75 试件的荷载-挠度曲线如图 5(f) 所示. 随着横向连接间距的增大, 试件的强度变小, 延性也变差. 试件的刚度主要由纵向的钢丝提供, 横向连接的钢丝网起一个固定纵向钢丝位置的作用, 不参与受力. 但是随着横向连接间距的增大, 纵向钢丝在加载过程中发生滑移的

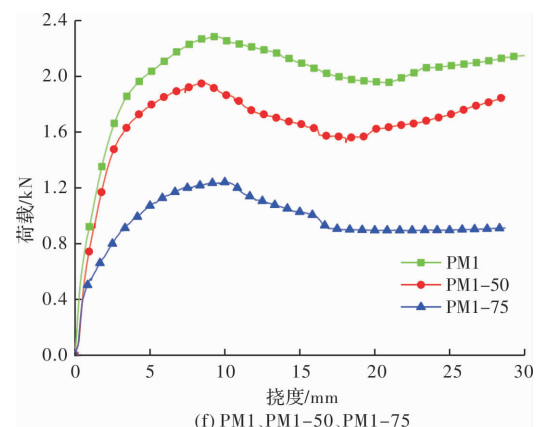
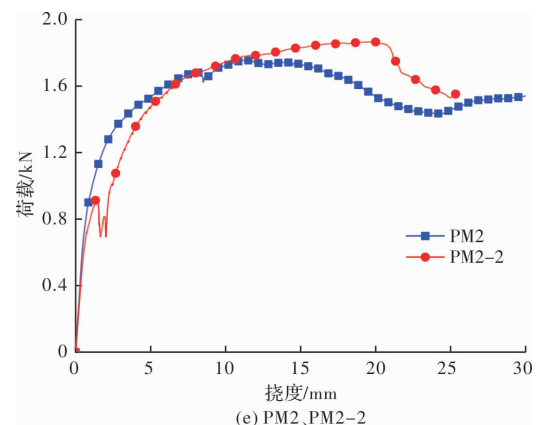
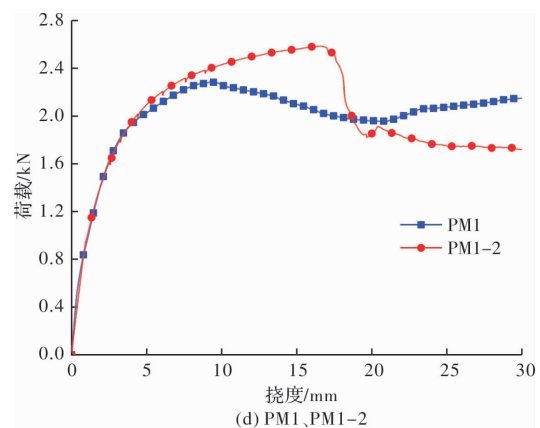
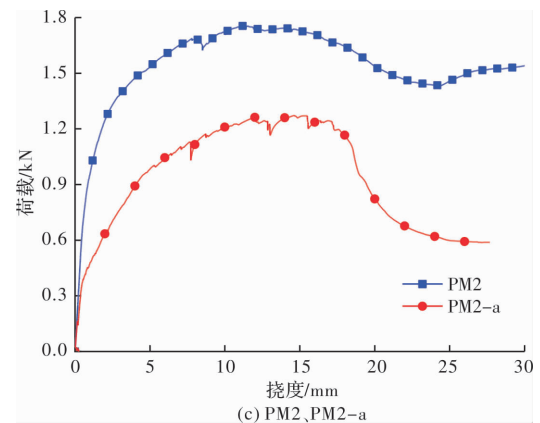
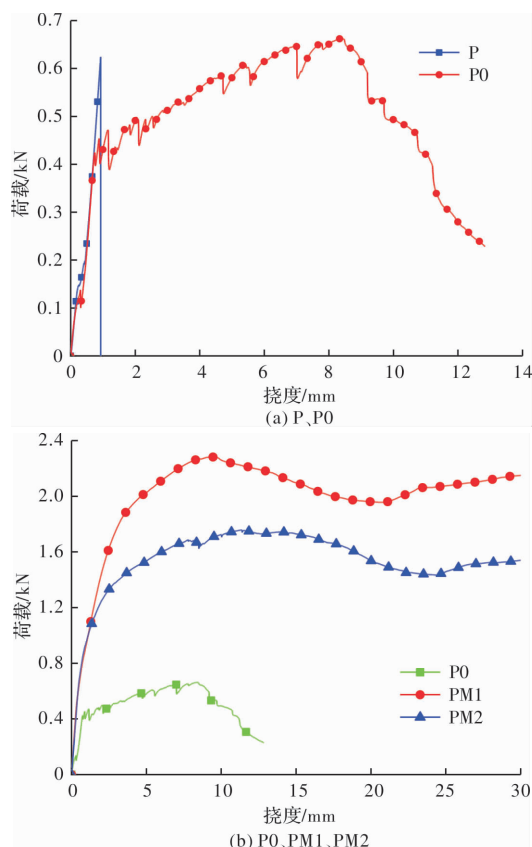


图 5 不同参考因素下各试件的荷载-挠度曲线对比图

Fig. 5 Comparison of load-deflection curves of specimens under different reference factors



可能性加大,破坏了试件的整体性,也降低了纵向钢丝网的利用率,从而削弱了试件的受力性能. PM1-75 试件破坏后确实观测到了纵向钢丝的滑移.

2.3 开裂强度、极限强度和耗能

相应的强度按《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》(GB/T 15231-2008)中式(1)计算.

$$\sigma = \frac{PL_0}{bh^2} \tag{1}$$

其中:  $P$  是由试验机力传感器采集的荷载值;  $b$  和  $h$  分别为试件的宽度和厚度;  $L_0$  表示四点弯试件净跨距.

试件的耗能是选取荷载-挠度曲线上挠度从 0 mm 到特定挠度 20 mm 所围成的面积.

开裂荷载、开裂强度和耗能性能试验结果如表 6 所示.

在开裂强度方面,钢丝网的加入并不能显著的提高初始开裂强度. 这是由于钢丝网起到更多的作用是限制裂缝的发展,而不是限制裂缝的产生,在提高开裂强度方面发挥的作用有限. 总体而言,加入 M2 钢丝网的试件在开裂强度方面要优于加入 M1 钢丝网的试件,这说明一定范围内,钢丝网网格尺寸越小,对开裂强度的提高越有利.

在极限强度方面,试件 P0 相比于试件 P 提高约 6%, PVA 纤维主要是起抗裂和增韧作用,对极

限强度几乎没有影响. 然而,加入钢丝网能显著提高试件的极限强度,在受拉区加入一层 M1 或 M2 钢丝网相比于对比试件 P0 分别提高了 245% 和 165%; 与对开裂强度的影响趋势不同,较大的钢丝网网格尺寸对于提高极限强度更为有效. 在受压区加入钢丝网对极限强度的提高不如在受拉区加入钢丝网,但相比于 P0 试件还是有较大程度的提高. 随着横向连接间距的增大,试件的极限承载力越来越差,试件 PM1-50、PM1-75 相比于 PM1 分别减少了 15% 和 46%. 加入两层钢丝网的 PM1-2、PM2-2 试件相比于 PM1 和 PM2 分别提高了 16% 和 6%,这说明多加入一层钢丝网对试件的整体性造成了一定影响,导致极限承载力提高有限.

在耗能方面,加入钢丝网极大改善了试件的耗能性能. 这是由于钢丝网的延性良好,在荷载达到极限荷载后,荷载下降不明显,能够持续受力,也不会出现脆性突然破坏. 其中 PM1 和 PM2 相比于 P0 分别提高了 495% 和 369%. 对于钢丝网位置、层数和横向连接间距等因素,耗能方面呈现的规律和极限强度以及前文荷载-挠度曲线呈现出的规律保持较高的一致性: 钢丝网位于受压区的试件性能低于钢丝网位于受拉区的试件; 加入两层钢丝网一定程度破坏了试件的整体性,对性能提高不大; 横向连接间距的增大会削弱试件的性能.

表 6 试件实验结果

Tab. 6 Experimental test results

试件编号	开裂荷载/N	开裂强度/MPa	极限荷载/N	极限强度/MPa	耗能/J
P	—	—	624	8.32	0.25
P0	406	5.41	662	8.83	6.34
PM1	520	6.93	2 284	30.45	37.73
PM1-2	542	7.23	2 653	35.37	42.9
PM1-a	446	5.95	1 684	22.45	29.13
PM1-50	475	6.33	1 951	26.01	31.1
PM1-75	384	5.12	1 239	16.52	20.04
PM2	667	8.89	1 757	23.43	29.71
PM2-2	537	7.16	1 866	24.88	31.14
PM2-a	554	7.39	1 298	17.31	20.87

2.4 刚度比

本文选取相对刚度指标参数衡量钢丝网对试件刚度的影响,即试件荷载-挠度曲线弹性阶段直线的斜率与对比试件 P0 相应斜率的比值,结果如图 6 所示.

试件 P 和 P0 的对比表明: 在纯砂浆中加入 PVA 纤维并不能提高刚度. 然而,通过和试件 P0 相比,钢丝网的加入可大幅提高试件的刚度. 加入一层钢丝网时,刚度提升显著,当加入第二层

钢丝网时相对于第一层钢丝网提升的幅度减小. 特别是,对于钢丝网孔较小的 M2,加入两层 M2 钢丝网的试件相比于受拉区加入一层钢丝网的试件,刚度反而有所下降. 主要是由于 M2 钢丝网网格尺寸较小,两层钢丝网对 PVA-ECC 浇筑时的流动性和成型性能影响较大,内部缺陷增多,密实度降低,从而对 ECC 的整体性影响大,反而降低了试件的整体刚度.

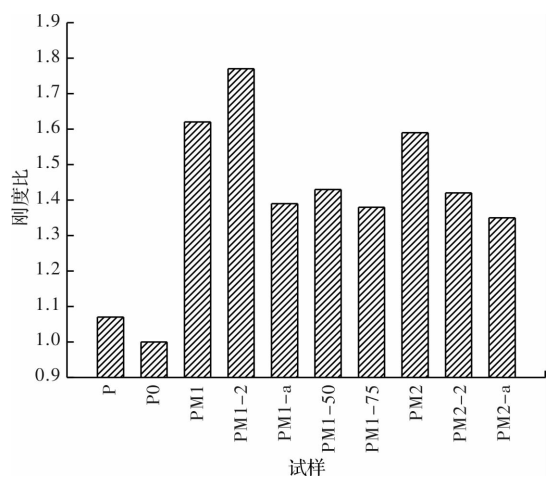


图6 刚度比

Fig. 6 Stiffness ratio

### 3 结论

本文进行了10组复合薄板试件的四点弯试验,研究不同网格尺寸的钢丝网、钢丝网位置、钢丝网层数、横向连接间距对力学性能的影响,得到以下主要结论:

(1)PVA纤维和钢丝网协同作用效果优良,能显著提升试件的综合力学性能。加入PVA纤维能够显著提升试件的延性和韧性,但在强度和刚度提升方面效果有限;加入钢丝网能够极大改善试件的强度、刚度以及耗能特性。

(2)钢丝网网格尺寸对试件的开裂强度和裂缝开展有较大的影响,网格尺寸偏小对试件裂缝开展和提高开裂荷载方面有利;较大网格尺寸在提升试件整体刚度、承载能力、极限强度和耗能性能方面比较有利。在实际应用中,要平衡好网格尺寸和纤维尺寸之间的关系,选择适宜的网格尺寸。根据本试验的结果,建议选取M1钢丝网。

(3)横向连接间距对试件的力学性能有较大影响,随着间距的增大,试件的强度、刚度和韧性都有所降低,裂缝开展变差。

### 参考文献 References

[1] BATSON G B, CASTRO J O, GUERRA A J, et al. Guide for the design construction and repair of ferrocement[J]. ACI Structural Journal, 1999, 85(3):325-351.

[2] MOUSAVI SE. Flexural response and crack development properties of ferrocement panels reinforced with steel fibers [J]. Journal of Building Engineering, 2017,12:325-331.

[3] ARIF M, PANKAJ, KAUSHIK S K. Mechanical behavior of ferrocement composites: an experimental investigation [J]. Cement & Concrete Composites,

1999, 21(4):301-312.

[4] LI V C, MAALEJ MOHAMED. Flexural/Tensile-strength ratio in engineered cementitious composites [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1994, 6(4): 513-528.

[5] PAN Z, WU C, LIU J, et al. Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC)[J]. Construction & Building Materials, 2015, 78:397-404.

[6] 邓轶涵. 钢筋增强 PVA 纤维水泥基复合材料梁弯曲性能试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2015.

[7] DENG Yihan. Experimental investigation on bending performances of reinforced polyvinyl alcohol fibers reinforced cementitious composite beam [D]. Hohhot: Inner Mongolia University Of Technology, 2015.

[8] ZHANG Y X, UEDA N, UMEDA Y, et al. Evaluation of shear failure of strain hardening cementitious composite beams[J]. Procedia Engineering, 2011, 14 (2259):2048-2057.

[9] KIM DJ, NAAMAN AE, El-Tawil S. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30 (10):917-928.

[10] SAID S H, RAZAK H A, OTHMAN I. Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers[J]. Construction & Building Materials, 2015, 75:176-188.

[11] LU C, LI VC, LEUNG CKY. Flaw characterization and correlation with cracking strength in Engineered Cementitious Composites (ECC) [J]. Cement and Concrete Research, 2018,107:64-74.

[12] LI J, WU C, LIU Z X. Comparative evaluation of steel wire mesh, steel fiber and high performance polyethylene fiber reinforced concrete slabs in blast tests [J]. Thin-Walled Structures, 2017,126 :117-126.

[13] BEHERA GC, RAO TDG, RAO CBK. Torsional behavior of reinforced concrete beams with ferrocement U-jacketing: Experimental study[J]. Case Studies in Construction Materials, 2016,4:15-31.

[14] El-Sayed TA, Erfan AM. Improving shear strength of beams using ferrocement composite[J]. Construction and Building Materials, 2018,172,608-617.

[15] LI B, LAM ESS. Influence of interfacial characteristics on the shear bond behavior between concrete and ferrocement[J]. Construction and Building Materials, 2018,176:462-469.

[16] NASSIF HH, NAJM H. Experimental and analytical investigation of ferrocement-concrete composite beams[J]. Cement and Concrete Composites, 2004,26(7):787-796.

(编辑 沈波)