

# 纤维取向和混凝土层间界面对层布式钢纤维 混凝土力学性能的影响研究

陈璇<sup>1</sup>, 冀永安<sup>2</sup>, 欧亚斌<sup>2</sup>, 李猛深<sup>1</sup>, 况栋梁<sup>1</sup>

(1. 长安大学材料科学与工程学院, 西安, 710061; 2. 商洛市交通设计院, 陕西商洛, 726000)

**摘要** 为研究纤维取向和混凝土层间界面对层布式钢纤维混凝土(LSFRC)力学性能的影响, 首先进行了0.5%~1.5% 3种纤维掺量的层布式钢纤维混凝土抗压、剪切和弯拉强度实验, 接着建立了LSFRC立方体试件和棱柱体试件的精细有限元模型, 分析了钢纤维数量、纤维取向和水泥混凝土层间界面结合方式对构件强度和变形能力的影响。实验表明, 层布式钢纤维混凝土弯拉强度较素混凝土最大可提高58%。数值分析显示LSFRC棱柱试件层间最大剪应力可降低10.8%, 底部跨中挠度可减小17.3%。研究表明, 混凝土层间界面结合方式对试件受力有显著影响。钢纤维的掺入会导致试件中产生局部应力集中和整体应力分散两种作用机制, 钢纤维抑制了混凝土受拉区的变形, 提高了混凝土的抗折能力。

**关键词** 层布式钢纤维混凝土; 力学响应; 有限元法

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.06.015

**中图分类号** TU528; U414 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)06-0119-09

## Research on Influence of Fiber Orientation and Concrete Interlayer on Mechanical Properties of Layered Steel Fiber-Reinforced Concrete

CHEN Xuan<sup>1</sup>, JI Yongan<sup>2</sup>, OU Yabin<sup>2</sup>, LI Mengshen<sup>1</sup>, KUANG Dongliang<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;  
2. Shangluo Traffic Design Institute, Shangluo 726000, Shaanxi, China)

**Abstract** For the convenience of analyzing influence of fiber orientation and concrete interlayer on mechanical properties of layered steel fiber-reinforced concrete (LSFRC), firstly, layered steel fiber-reinforced concrete samples with three kinds of fiber content of 0.5%~1.5% are tested for compressive strength, shear strength and flexural tensile strength experiment respectively. And then, fine models of cubic and prismatic LSFRC samples are established by using finite element to analyze effects of fiber content, fiber orientation and the interlayer between concrete layers. The experimental results show that LSFRC exhibit a maximum increment of 58% in flexural strength range. The numerical analysis indicates that the interlayer maximum shear stress is reduced by 10.8% in LSFRC prismatic samples, and the deflection at the bottom of prismatic samples is decreased by 17.3%. The study demonstrates that the bonding states between inter-layers have a significant effect on the loading of specimens. The incorporation of steel fibers is

**收稿日期**: 2023-11-24

**基金项目**: 陕西省交通运输厅项目(21-22k); 中央高校基本科研业务费资助项目(300102313114)

**作者简介**: 陈璇(1997-), 男, 贵州毕节人, 硕士, 研究方向为道路材料科学与工程。E-mail: chenxuan1997121@163.com

**通信作者**: 李猛深(1984-), 男, 陕西周至人, 博士, 讲师, 研究方向为防护工程、机场工程。E-mail: lms200508@163.com

**引用格式**: 陈璇, 冀永安, 欧亚斌, 等. 纤维取向和混凝土层间界面对层布式钢纤维混凝土力学性能的影响研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(6): 119-127. CHEN Xuan, JI Yongan, OU Yabin, et al. Research on Influence of Fiber Orientation and Concrete Interlayer on Mechanical Properties of Layered Steel Fiber-Reinforced Concrete[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(6): 119-127.

the result of a local stress concentration and an integral stress dispersion in the part of samples, whereas the steel fibers restrain the deformation of zone, improving the bending resistance of concrete.

**Key words** layered steel fiber reinforced concrete; mechanical response; finite element method

层布式钢纤维水泥混凝土 (layered steel fiber reinforced concrete, LSFRC) 道面通过加入钢纤维形成增强层, 从而降低消耗并提高了道面的承载和变形能力。弯拉强度是路面和机场道面设计时的重要力学指标, 层布式钢纤维混凝土抗压强度与钢纤维混凝土接近, 抗弯拉强度较普通混凝土最大可提高 50%<sup>[1]</sup>。利用层布式钢纤维, 道面厚度最大可减小 40%, 该技术具有经济、有效的特点<sup>[2-3]</sup>。

钢纤维对混凝土道面的增强效果受到多种因素的影响, 当纤维用量一定时, 纤维取向、纤维空间分布均影响其增强效果<sup>[4-6]</sup>。Shen 等<sup>[7]</sup>研究表明, 钢纤维桥接作用可提高新旧混凝土界面的粘结强度, 且钢纤维会导致界面应力重分布。Zhang 等<sup>[8]</sup>研究了纤维分布和纤维取向对试件强度的影响, 发现纤维取向与加载方向均会影响到混凝土试件的强度。Mu 等<sup>[9]</sup>利用电磁场控制钢纤维在混凝土内的取向, 发现定向钢纤维混凝土弯拉强度比普通钢纤维混凝土平均提高 30.5%。

综上, 纤维取向对混凝土的影响已有深入研究<sup>[10-12]</sup>, 但主要集中于普通钢纤维混凝土, 针对上述因素对层布式钢纤维混凝土的影响研究较少。层布式钢纤维混凝土中纤维分布有该特点: 呈二维纵向或横向分布。层布式钢纤维取向及散布对层布式水泥混凝土的研究十分有限。为此, 本文制备了层布式钢纤维混凝土试件, 进行了抗压试验、剪切试验和弯拉试验, 研究了钢纤维体积掺量对试件力学性能的影响, 随后建立了层布式钢纤维混凝土的精细有限元模型, 分析了混凝土层间界面和纤维垂直、水平取向两种极端状态对试件内部应力分布的影响。相关结论对层布式纤维混凝土在道面中的应用具有参考价值。

## 1 试验设计

### 1.1 试验原材料

混凝土弯拉强度是路面的主要强度指标, 本试验制备层布式钢纤维水泥混凝土试件, 研究钢纤维体积掺量对弯拉强度的影响。

水泥采用陕西省宝鸡市生产的强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥。粗骨料为 5~25 mm 连

续级配石灰岩, 细骨料细度模数为 2.7。钢纤维为长径比 45 的端钩型纤维, 由河北衡水晟英金属制品有限公司生产, 主要性能见表 1。采用聚羧酸高效减水剂, 掺量为 0.3%。

表 1 钢纤维性能参数

Tab. 1 Parameters of steel fiber

参数	屈服强度/ MPa	弹性模量/ GPa	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	长度/ mm	长径比
参数值	195	212	7 800	35	45

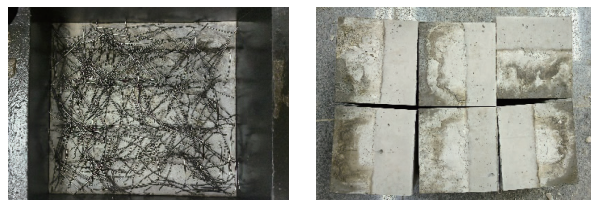
### 1.2 配合比及试件制作

水泥混凝土强度等级为 C40, 设计弯拉强度为 4.0 MPa, 根据《JTGF30-2019 公路水泥混凝土路面施工技术规范》进行配合比设计和试配, 最终确定的配合比见表 2。弯拉试验试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm, 钢纤维体积掺量分别为 0.5%, 1%, 1.5%。试件制备时按照纤维层理论高度为 2 cm 称取钢纤维。采用分层浇筑的方法, 先在模具内铺设 2 cm 厚混凝土, 振动压实后均匀撒布钢纤维。再装入混凝土, 振动压实后确保距模具顶部 2 cm, 再撒布一层钢纤维后装入混凝土, 振动压实并抹平。24 h 后脱模编号并进行标准养护。同时浇筑了立方体试件, 试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm, 如图 1 所示。

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mixtures of concrete

材料	水/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水泥/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	细骨料/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粗骨料/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	砂率/ %	水灰比/ %
用量	163	356	676	1 202	36	45



(a) 表面散布钢纤维 (b) 浇筑好的混凝土试件

图 1 层布式钢纤维混凝土立方体试件

Fig. 1 Cube specimens of LSFRC

### 1.3 抗压强度和单剪强度分析

试件达到 28 d 龄期后开展抗压试验和单表面剪切试验。抗压试验参照《JTGF3420-2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》, 采用力值加载模式, 得到的试验结果见表 3。

表 3 试件立方体抗压强度试验结果

Tab. 3 Result of compressive strength of cube specimens

试验内容	试验结果			
钢纤维掺量/%	0	0.5	1	1.5
抗压强度值/MPa	37.6	38.1	40.8	41.5
相对强度提高率/%		0.79	7.94	9.79

表 3 表明,钢纤维掺量对混凝土立方体抗压强度的提升值均小于 10%,纤维对抗压强度的影响不显著。

在加载速度为 0.2 kN/s 的力值加载模式下开展了单表面剪切试验,剪切面积为试件切面,得到抗剪强度结果见表 4。

表 4 单表面剪切试验结果

Tab. 4 Results of single surface shear test

试验内容	试验结果			
钢纤维掺量/%	0	0.5	1	1.5
剪切强度值/MPa	2.8	2.9	3.1	3.3
相对强度提高率/%		3.5	10.7	17.8

由表 4 可知,在钢纤维掺量为 1.5% 时,试件抗剪强度可提高 17.8%。加载后的试件见图 2,可见试件剪切破坏完全沿着层间界面展开。

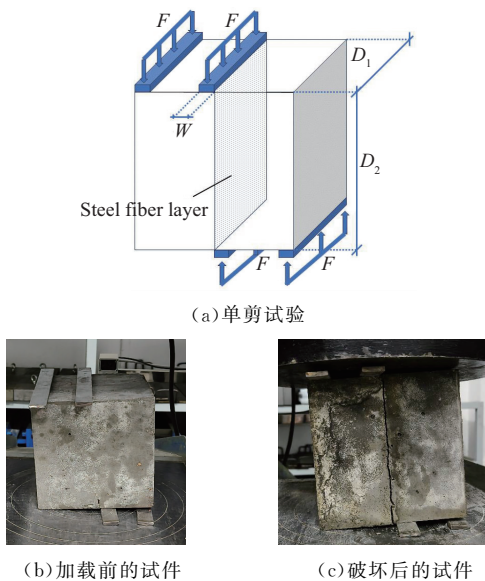


图 2 试件的单剪试验

Fig. 2 Single surface shear test of specimens

1.4 弯拉强度分析

试件达到 28 d 龄期后利用万能试验机进行弯拉试验。试验过程参照《JTG3420—2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》。采用力值加载模式,加载速度为 0.2 kN/s,得到的弯拉强度结果见表 5。

表 5 层布式钢纤维混凝土试件弯拉强度试验结果

Tab. 5 Result of flexural strength of LSFRC

试验内容	试验结果			
层布式钢纤维体积掺量/%	0	0.5	1	1.5
弯拉强度值/MPa	4.9	5.8	6.63	7.75
相对弯拉强度提高率/%		18	35	58

由表 5 可知,相较于普通混凝土,层布式钢纤维混凝土弯拉强度提高了 18%~58%。卸载后的试件及试件断面钢纤维分布见图 3,可见试件破坏后断裂的纤维很少,以从混凝土中拔出为主,钢纤维保持上下层分布,且断面裸露钢纤维取向与棱柱长度方向平行。图 4 为不同钢纤维掺量试件的荷载-时间曲线,表明试件仍为脆性断裂破坏,当荷载达到峰值时,试件上出现裂纹并快速扩展,承载力呈断崖式下降,继续受压伴随钢纤维拉拔声响。

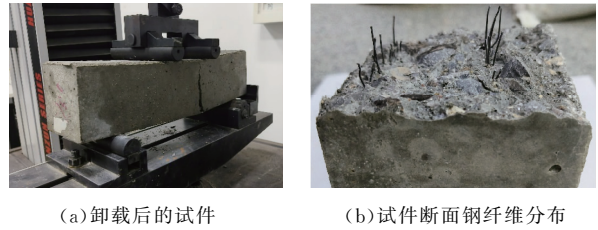
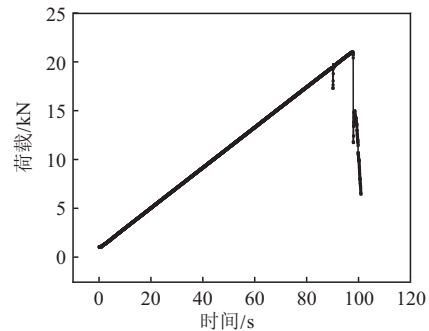
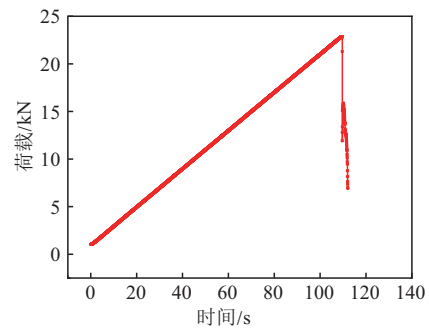


图 3 层布式钢纤维试件弯拉破坏图

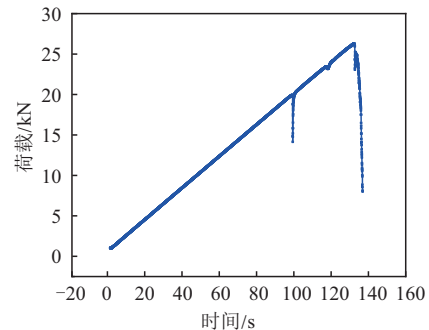
Fig. 3 Failure of flexural specimen



(a) 钢纤维掺量 0.5%



(b) 钢纤维掺量 1%



(c) 钢纤维掺量 1.5%

图 4 不同钢纤维掺量试件的荷载-时间曲线

Fig. 4 Different steel fiber content on curve of load-time

## 2 有限元模型

层布式纤维混凝土的力学性能受到多种因素的影响,而试验工况有限,为深入探讨钢纤维数量、纤维取向及层间界面对混凝土性能的影响和作用机理,建立了层布式钢纤维水泥混凝土的精细有限元模型,将纤维取向分为水平随机分布和垂直机分布 2 种情况,界面也分为完全光滑、完全粘结等理想极端状态。

### 2.1 材料模型与参数

水泥混凝土采用 CDPM(concrete damage plastic model)模型,该模型考虑了混凝土的塑性和损伤情况<sup>[13-14]</sup>。模型强度准则为:

$$\bar{\sigma} = (1 - \omega_t) \bar{\sigma}_t + (1 - \omega_c) \bar{\sigma}_c \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}_t$  和  $\bar{\sigma}_c$  为有效应力张量的正、负部分; $\omega_t$  和  $\omega_c$  分别为拉伸和压缩时的损伤变量,取值范围为 0~1。应力应变关系为:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}_e : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_p) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{D}_e$  为基于杨氏模量  $E$  和泊松比  $\nu$  的弹性刚度张量; $\boldsymbol{\varepsilon}$  为应变张量; $\boldsymbol{\varepsilon}_p$  为由有效应力  $\bar{\sigma}_p$  决定的塑性应变张量; $k$  为屈服形态影响参数。

该模型认为损伤始于加载历史中材料达到的最大等效应变,根据应变历史确定拉伸和压缩时的损伤变量。为了有效使用该模型,需要输入混凝土单轴受拉和受压时的应力应变曲线,该曲线参考《GB 50010—2010 混凝土结构设计规范》确定。

钢纤维为 Q195 普通碳素钢,有限元分析中,选取经典的双线性等向强化模型,钢纤维极限强度取 430 MPa。混凝土及钢纤维的材料参数见表 6 和表 7。

表 6 混凝土材料模型参数

Tab. 6 Parameter of concrete material model

参数名称	参数值
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 400
弹性模量/GPa	32.5
泊松比	0.2
轴心抗压强度/MPa	26.8
轴心抗拉强度/MPa	2.39
膨胀角/ $^\circ$	30
偏心率	0.1
双轴抗压强度/MPa	31.0
$k$	0.667
粘性系数	0.000 5

表 7 钢纤维模型参数

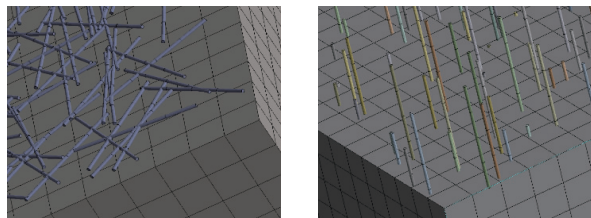
Tab. 7 Parameter of steel fiber material model

参数	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
参数值	7 850	200	0.3	190	430

### 2.2 计算模型

#### 2.2.1 钢纤维的简化

钢纤维简化为长 35 mm,截面半径 0.45 mm 的圆柱形梁单元,预设纤维均匀分布,取向为垂直随机、水平随机 2 种情况。从试验可知,钢纤维拉拔为主导的行为发生在混凝土试件破坏之后。建立层布式钢纤维混凝土精细模型时,设置钢纤维与混凝土基体连续,不考虑单根钢纤维与水泥基体间的滑移,以此模拟钢纤维在混凝土构件破坏前的行为。层布式钢纤维混凝土中纤维体积掺量一般为 0.5%~2%,经折算,设定钢纤维数量为立方体试件 50~300 根,棱柱体试件 40~800 根。纤维简化原则为:①当纤维垂直于混凝土上下层界面时,纤维在界面层横向随机分布,纤维插入界面的长度也随机分布;②当纤维平行于混凝土上下层界面时,不考虑互相穿插的碰撞;③纤维的节点和水泥混凝土的节点绑定,不考虑纤维和水泥混凝土的滑移作用。简化后的模型见图 5。



(a) 纤维水平随机分布

(b) 纤维垂直随机分布

图 5 基于梁单元的层布式钢纤维模型

Fig. 5 Based on simplification beam elements in LSFRC

#### 2.2.2 有限元模型的建立

建立 LSFRC 立方体和棱柱体试件的有限元模型,立方体试块为边长 150 mm 标准试件。模型存在混凝土上下层及层间界面,钢纤维呈二维分布在距底面 20 mm 的层间界面处。根据计算,当纤维掺量为 2% 时,约等价于 300 根纤维。编写纤维节点文件,导入软件内置的曲线生成工具,生成层间界面处随机取向的钢纤维。计算中上下层混凝土的层间结合状态分别按光滑、连续、摩擦 3 种情况考虑<sup>[15-17]</sup>。并且考虑不同的纤维散布模式、层间结合状态及纤维体积分数,计算简图见图 6。棱柱体试件(100 mm×100 mm×400 mm)使用相同的方法建模,建立完成的模型见图 7。

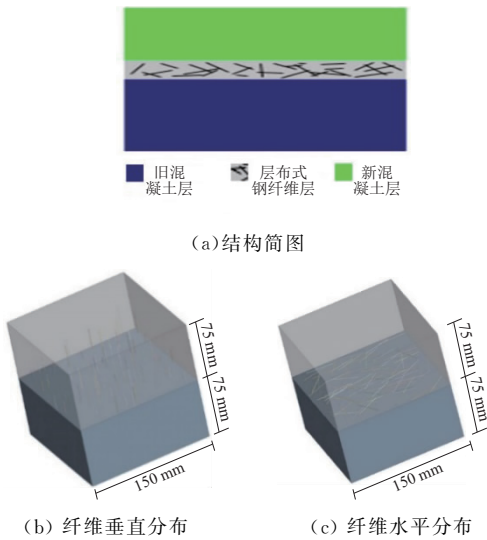


图 6 层布式钢纤维立方体试件结构简图及计算模型  
Fig. 6 Schematic diagram and calculation model of LSFRC cube specimens

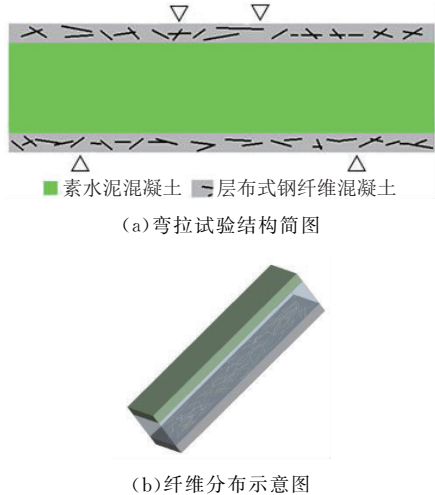


图 7 层布式钢纤维棱柱体试件结构简图及计算模型  
Fig. 7 Schematic diagram and calculation model of LSFRC prismatic specimens

### 3 计算结果与分析

采用有限元软件分析了不同层间界面和纤维掺量的立方体、棱柱体试件的内部应力分布情况。首先计算钢纤维水平、垂直分布情况下,不同纤维体积分数和层间界面的立方体试件在单向受压情况下的应力分布。随后计算不同钢纤维体积分数下水泥混凝土棱柱体试件的弯拉性能。

#### 3.1 立方体试件应力分析

##### 3.1.1 纤维水平散布

随着纤维数量的增加,层布式钢纤维相互交叉形成二维网络结构。随着纤维数量的进一步增加,纤维互相搭接在一定厚度内形成三维网状结构,会

导致水泥混凝土产生不良孔隙,抵消纤维带来的增强效果。参照文献[18],本文将纤维含量控制在2%以内,不考虑纤维搭接的影响。选取立方体试件,纤维呈水平散布,上下面层间加载应力为20 MPa的单轴荷载,如图8所示。

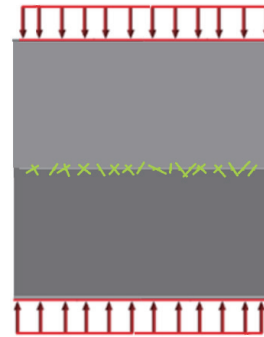
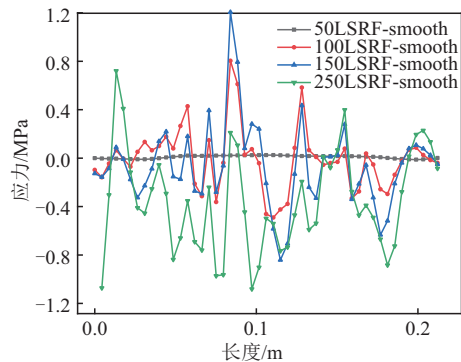


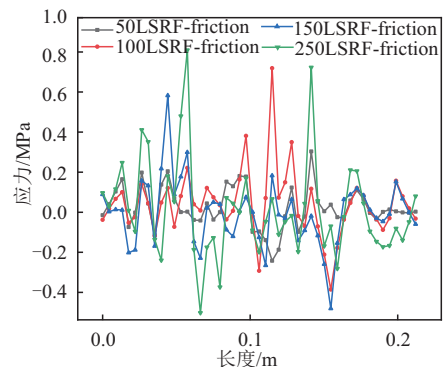
图 8 压应力加载方式

Fig. 8 Loading method of shear stress

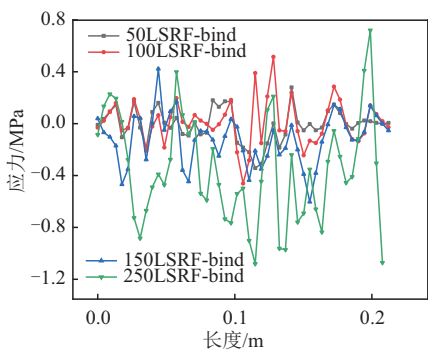
计算得到的钢纤维层最大主应力分布曲线见图9。由于层布式纤维层的存在,实际道面因为上下层施工时间的差异,会形成层间界面,为考虑层间界面的影响,图9(a)~图9(c)分别对应纤维撒布层与素混凝土层间为光滑无粘结、层间有摩擦、层间完全粘结3种极端状态,当纤维分别从50根增大到250根时,钢纤维层最大主应力最大值从0.34 MPa增大到1.07 MPa,图中曲线相邻节点最大主应力的差值也随之增大,表明钢纤维层的最大主应力随钢纤维掺量的增加而增大,当纤维达到250根时,钢纤维层最大主应力的最值出现在模型边缘部位。



(a)层间界面光滑无粘结



(b)层间界面无粘结有摩擦



(c)层间界面完全粘结

图 9 不同层间界面与纤维含量的试件纤维层最大主应力  
Fig.9 Maximum principal stress of steel fiber layer with different interlayer state and fiber content

由图 9 可知,当钢纤维掺量为 50 根,层间界面光滑时,钢纤维应力分布接近为一条直线。随着层间结合状态的改变和纤维掺量的增加,水泥混凝土基体传递给钢纤维的应力增加,最大主应力分布曲线出现波动并加剧,表明纤维界面出现应力集中。可见,钢纤维掺量和分层界面的粘结方式会引起混凝土内部的应力集中和应力重分布,这种效应随着纤维掺量的增加而加剧。

钢纤维的最大轴向应力见表 8,对于层间界面连续粘结,当钢纤维数量从 50 增加到 250 时,钢纤维的最大轴向应力降低了 1.25%~9.15%。对于光滑和摩擦 2 种层间粘结方式,纤维含量对纤维轴力的影响不大。

表 8 不同界面和纤维含量的钢纤维最大轴向应力

Tab.8 Maximum axial force results of different fiber contents and interlayer bonding methods

纤维数量/根	层间界面		
	光滑/MPa	摩擦/MPa	连续/MPa
50	10.5	10.6	15.0
100	10.8	10.8	15.0
150	10.6	10.8	12.2
250	10.6	10.6	13.6

3.1.2 纤维垂直散布

选取纤维垂直散布模型进行单表面剪切分析,加载模型见图 10,分别在左右两侧添加 2 MPa 均布荷载。

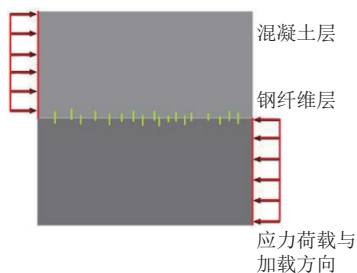
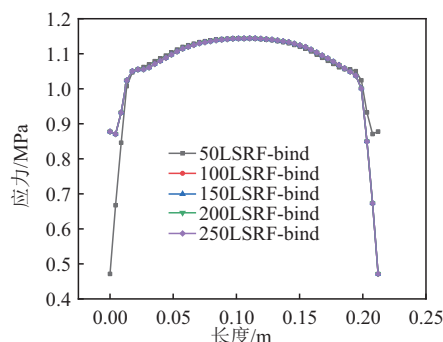


图 10 剪切应力加载方式

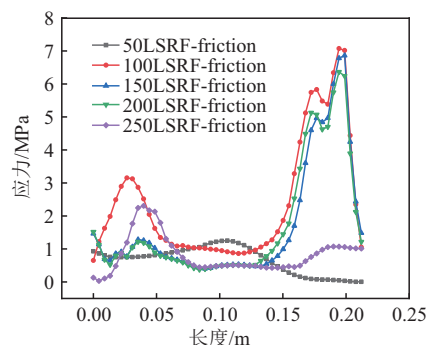
Fig.10 Loading method of shear stress

图 11 为钢纤维数量和层间结合方式对混凝土层间最大剪应力的影响,钢纤维的最大轴向应力见表 9。结果表明层间粘结时,钢纤维层处最大剪应力呈对称分布,纤维含量对剪切应力分布和纤维轴向应力的影响不大,垂直取向的钢纤维在层间结合良好的试件中贡献较低。

当层间界面为无粘结有摩擦时,允许上下层发生相对滑移,当纤维从 100 根增加到 200 根时,纤维层最大剪应力降低了 10.8%。当钢纤维数量达到 250 根时,剪应力集中区基本消失,应力分布规律同层间完全粘结的试件相似。



(a)层间完全粘结界面



(b)层间无粘结有摩擦界面

图 11 界面状态对层间最大剪应力分布的影响

Fig.11 Influence of interlayer bonding on the distribution of maximum shear stress

表 9 不同钢纤维含量和层间界面的钢纤维最大轴向应力

Tab.9 Maximum axial force results of different steel fiber contents and interlayer bonding

层间结合方式	钢纤维数量/根				
	50	100	150	200	250
完全粘结/MPa	0	0.039	0.038	0.038	3.387
无粘结有摩擦/MPa	0	25	11.1	10.1	57.5

3.2 棱柱体试件应力分析

建立 LSFRC 棱柱体试件的计算模型,不考虑钢纤维与混凝土间的黏结滑移,采取三分点处双点线性加载方式加载,三分点底面处添加刚性支撑,加载方式见图 12。

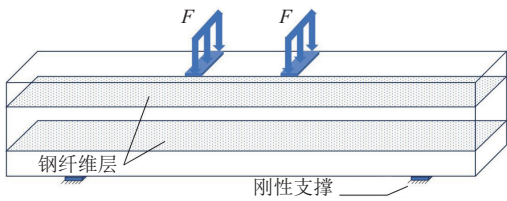


图 12 三分点处双点加载方式

Fig. 12 Double point load method at the three-point position

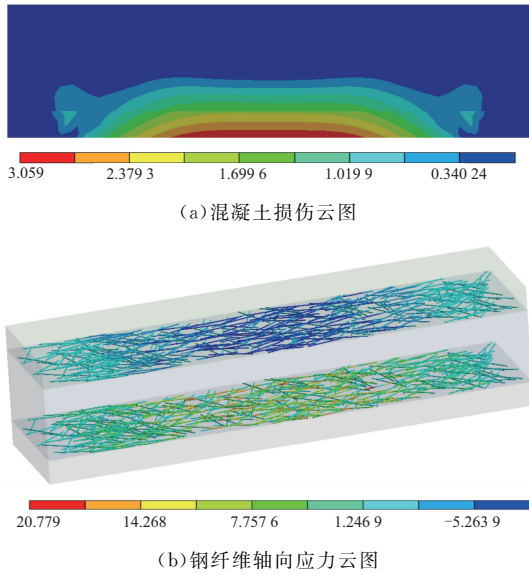


图 13 纤维掺量 2% 时试件的损伤云图及钢纤维应力云图  
Fig. 13 The damage contour and stress contour of the steel fiber specimen at 2% fiber content

首先分析纤维掺量 2% 时试件的损伤失效机理。图 13 (a) 为混凝土的损伤云图, 跨中底部区域损伤因子大于 1, 表明跨中存在损伤失效区域, 损伤发生后会继续向两侧和试件中心扩展。结合图 13 (b) 钢纤维轴向应力云图可知当损伤失效扩展到钢纤维层时, 底部单根钢纤维承受最大为 32.5 MPa 的轴向拉力。

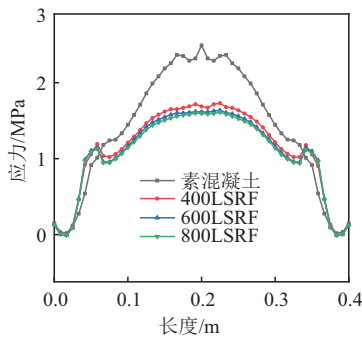
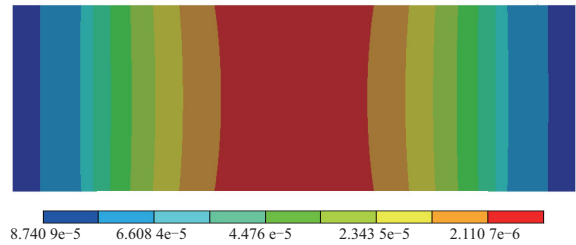


图 14 钢纤维掺量对棱柱试件最大主应力的影响  
Fig. 14 Influence of steel fiber content on maximum principal stress of LSFRC

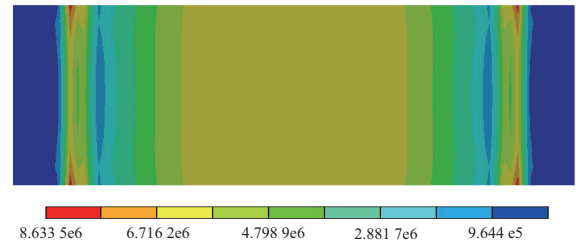
图 14 为钢纤维掺量分别为 1%、1.5%、2% (等效纤维数量约为 400 根、600 根、800 根) 时对混凝土最大主应力的影响。与普通混凝土试件相比, 钢纤维掺

量为 2% 时, 纤维层混凝土的最大主应力降低了 31.7%。结果表明, 钢纤维的掺入可大幅降低棱柱试件中混凝土的拉应力, 从而提高试件的受弯承载力。

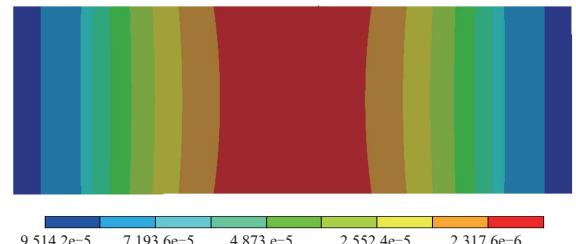
图 15 为不同掺量下试件在最大荷载时的竖向位移云图和最大主应力云图。图 16 为 3 种纤维掺量试件的荷载与跨中挠度关系曲线。结果表明, 在荷载同为 25 kN 时, 钢纤维掺量为 2% 的试件比掺量 1% 的试件跨中挠度降低了 17.3%。



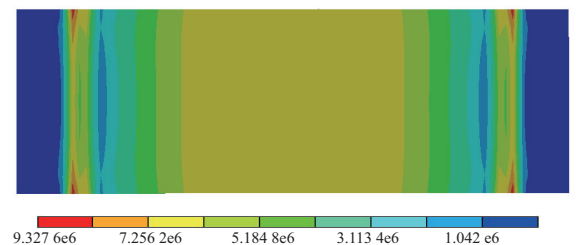
(a) 纤维掺量 1% 时试件的竖向位移云图



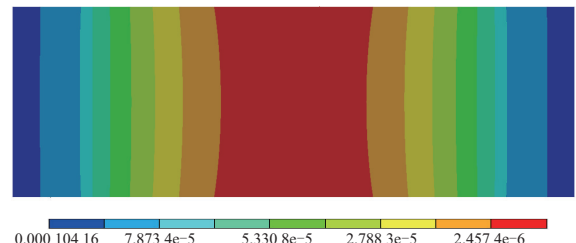
(b) 纤维掺量 1% 时试件的最大应力云图



(c) 纤维掺量 1.5% 时试件的竖向位移云图



(d) 纤维掺量 1.5% 时试件的最大应力云图



(e) 纤维掺量 2% 时试件的竖向位移云图

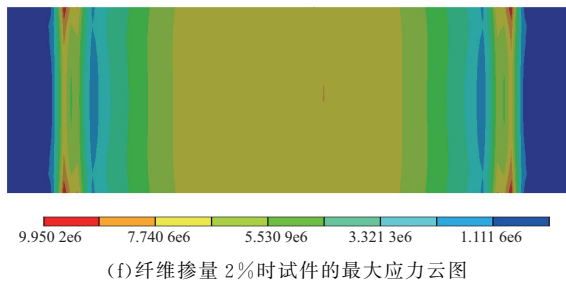


图 15 最大荷载作用下试件的竖向位移云图与最大主应力云图  
Fig. 15 Vertical displacement contour and the maximum principal stress contour of the specimen under the maximum load

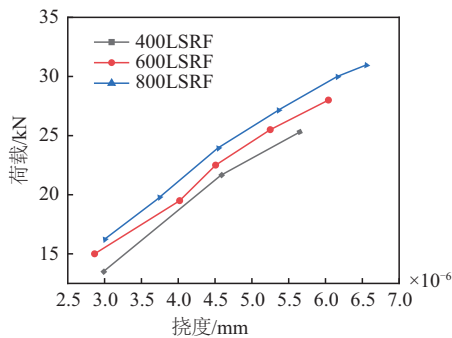


图 16 不同钢纤维掺量试件的荷载-挠度曲线  
Fig. 16 Deflection-load curve of specimens with different steel fiber contents

## 4 结论

本文针对纤维含量、纤维取向和层间界面状态对层布式钢纤维混凝土性能的影响,开展了实验研究和有限元分析,主要结论如下:

1)层布式钢纤维的作用主要体现为,钢纤维掺量的增长不但提高了试件的弯拉强度,也延缓了试件开裂过程,降低了试件临近破坏时的变形。

2)数值分析表明混凝土层间界面结合方式对试件受力有显著影响。钢纤维的掺入会导致试件中产生局部应力集中和整体应力分散 2 种作用,随着纤维掺量的增加,纤维应力分散的作用更显著,从而有利于构件整体强度的发挥和提高。

3)层布式钢纤维棱柱体试件力学计算表明,随着钢纤维数量的提高和荷载的增长,纤维作用逐步发挥,受拉区混凝土拉应力减小,混凝土变形受到抑制,构件抗折能力增加。

### 参考文献

[1] 牛龙龙,王光银,张士萍.层布式钢纤维对混凝土力学性能影响[J].混凝土,2019(12):107-110.  
NIU L L, WANG G Y, ZHANG S P. Effect of Layered Steel Fiber on the Mechanical Properties of Concrete[J]. Concrete, 2019(12):107-110. (in Chinese)

[2] 潘慧敏,闫国亮.层布式钢纤维混凝土力学性能试验研究[J].硅酸盐通报,2010,29(4):793-797.  
PAN H M, YAN G L. Experimental Study on Mechanical Behavior of Layer Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(4):793-797. (in Chinese)

[3] 彭奥,焦楚杰.复合式、层布式钢纤维混凝土力学性能及破坏特征研究[J].混凝土,2020(8):67-71,78.  
PENG A, JIAO C J. Research on Mechanical Properties and Damage Characteristics of Composite Steel Fiber Reinforced Concrete and Layered Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Concrete, 2020(8):67-71,78. (in Chinese)

[4] IQBAL S, ALI I, ROOM S, et al. Enhanced Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete Using Closed Steel Fibers [J]. Materials and Structures, 2019, 52(3):56.

[5] ZHU H T, LI C C, GAO D Y, et al. Study on Mechanical Properties and Strength Relation between Cube and Cylinder Specimens of Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(4):1-12.

[6] LI F Y, CUI Y X, CAO C Y, et al. Experimental Study of the Tensile and Flexural Mechanical Properties of Directionally Distributed Steel Fibre-Reinforced Concrete[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2019, 233(9):1721-1732.

[7] SHEN Q C, CHEN W, LIU C, et al. The Tensile Strength and Damage Characteristic of Two Types of Concrete and Their Interface[J]. Materials, 2019, 13(1):16.

[8] ZHANG S L, ZHANG C S, LIAO L. Investigation on the Relationship between the Steel Fibre Distribution and the Post-Cracking Behaviour of SFRC[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200:539-550.

[9] MU R, XING P, YU J C, et al. Investigation on Reinforcement of Aligned Steel Fiber on Flexural Behavior of Cement-Based Composites Using Acoustic Emission Signal Analysis[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:42-50.

[10] 朱梦良,孔泽仁,王佳.层布式钢纤维混凝土力学性能[J].交通科学与工程,2009,25(1):14-20.  
ZHU M L, KONG Z R, WANG J. Mechanics Character for the Concrete Reinforced by Layered Steel Fiber[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(1):14-20. (in Chinese)

[11] 张秀芝,毕梦迪,刘同军,等.钢纤维混凝土中纤维分布特性影响因素研究进展[J].硅酸盐学报,2021,49(8):1732-1742.



- ZHANG X Z, BI M D, LIU T J, et al. Research Progress in Factors Affecting Fiber Distribution in Steel Fiber Concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(8):1732-1742. (in Chinese)
- [12] 范小春, 孟阳, 吴葑. 层布式钢纤维无机聚合物轻骨料混凝土的弯拉性能试验研究[J]. 混凝土, 2018(1):35-41.
- FAN X C, MENG Y, WU D. Flexural-Tensile Test on Layered Steel Fiber Inorganic Polymer Lightweight Aggregate Concrete[J]. Concrete, 2018(1):35-41. (in Chinese)
- [13] GRASSL P, JIRÁSEK M. Damage-Plastic Model for Concrete Failure [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(22/23):7166-7196.
- [14] GRASSL P, XENOS D, NYSTRÖM U, et al. CD-PM2: a Damage-Plasticity Approach to Modelling the Failure of Concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(24):3805-3816.
- [15] 朱亚阁, 李碧雄, 蒲养林, 等. 改善新老混凝土界面粘结性能的措施研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(S1):128-134.
- ZHU Y G, LI B X, PU Y L, et al. Experimental Study on the Methods to Improve Interfacial Bonding Behavior between Existing Concrete and Attached Concrete[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(S1):128-134. (in Chinese)
- [16] 刘韡, 郭银波. 基于 ABAQUS 对钢纤维混凝土界面强度分析[J]. 公路交通科技, 2021, 38(5):65-72, 99.
- LIU W, GUO Y B. Analysis on Interfacial Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Based on ABAQUS [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(5):65-72, 99. (in Chinese)
- [17] HE Y, ZHANG X, HOOTON R D, et al. Effects of Interface Roughness and Interface Adhesion on New-to-Old Concrete Bonding[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151:582-590.
- [18] 余睿, 范定强, 孙美娟, 等. 钢纤维掺量及其 3D 空间结构对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11):2313-2321.
- YU R, FAN D Q, SUN M J, et al. Effects of Steel Fibre Content and 3D Network on Performance of Ultra-High Performance Concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(11):2313-2321. (in Chinese)

(编辑:韩茜)

(上接第 118 页)

- [18] 吕炎, 白二雷, 王志航, 等. 低温养护对环氧树脂基砂浆早期性能的影响及机理[J]. 材料导报, 2024, 38(5):102-107.
- LYU Y, BAI E L, WANG Z H, et al. Effect and Mechanism of Low Temperature Curing on the Early Performance of Epoxy Resin Based Mortar[J]. Materials Reports, 2024, 38(5):102-107. (in Chinese)
- [19] CARBAS R J C, MARQUES E A S, DA SILVA L F M, et al. Effect of Cure Temperature on the Glass Transition Temperature and Mechanical Properties of Epoxy Adhesives[J]. The Journal of Adhesion, 2014, 90(1):104-119.
- [20] 刘勇, 郝腾飞, 孙楠楠. 养护温度对环氧树脂混凝土强度影响试验研究[J]. 交通科技, 2023(3):86-89.
- LIU Y, HAO T F, SUN N N. Experimental Study on the Influence of Curing Temperature on Strength of Epoxy Resin Concrete[J]. Transportation Science & Technology, 2023(3):86-89. (in Chinese)
- [21] RIBEIRO M C S, NÓVOA P R, FERREIRA A J M, et al. Flexural Performance of Polyester and Epoxy Polymer Mortars under Severe Thermal Conditions [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(7):803-809.
- [22] 龚爽, 林福宽, 粟森, 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 S, LIN F K, SU M, et al. Effect of Curing and Ambient Temperature on Properties of Epoxy Resin and Bond Behavior of Near-Surface-Mounted CFRP-Concrete Interface[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11):5512-5524. (in Chinese)

(编辑:韩茜)