

文章编号:1007-9629(2021)01-0014-08

混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的 弯曲性能预测

张 聪^{1,2,3}, 夏超凡¹, 袁 振¹, 李志华¹

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214000; 2. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430000; 3. 中国建筑材料科学研究总院 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘要: 基于混凝土断裂力学与细观力学理论,同时考虑钢纤维(SF)/聚乙烯醇(PVA)混杂纤维对应变硬化水泥基复合材料(SHCC)弯曲性能的影响,提出了一种适用于 SF/PVA 纤维混杂 SHCC (SF-PVA/SHCC)弯曲性能的预测方法. 开展了 SF-PVA/SHCC 弯曲性能试验,分析了纤维种类和掺量对 SHCC 抗弯强度、极限弯曲挠度及弯曲荷载-挠度曲线的影响. 结果表明所提出的弯曲性能计算方法可以较好地预测 SF-PVA/SHCC 的抗弯强度和极限弯曲挠度.

关键词: 应变硬化水泥基复合材料; 混杂; 钢纤维; 聚乙烯醇; 弯曲性能; 预测模型

中图分类号:TB332

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.003

Flexural Property Prediction for Hybrid Fiber Reinforced Strain Hardening Cementitious Composites

ZHANG Cong^{1,2,3}, XIA Chaofan¹, YUAN Zhen¹, LI Zhihua¹

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000, China;

2. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China;

3. State Key Laboratory of Green Building Materials, China Academy of Building Research, Beijing 100024, China)

Abstract: Based on the theory of fracture mechanics and micromechanics of concrete, a flexural property prediction method for steel fiber-PVA fiber reinforced strain hardening cementitious composite(SF-PVA/SHCC) was developed by considering the effect of hybrid fibers on the flexural properties of strain hardening cementitious composite(SHCC). In order to verify the effectiveness of the proposed method, a series of flexural tests for SF-PVA/SHCC were performed. The influence of fiber type and fiber content on the flexural strength, ultimate flexural deflection and load-deflection curves of SHCC was studied. The results show that the proposed method can well predict the flexural strength and ultimate flexural deflection of SHCC containing steel fiber and PVA fiber.

Key words: strain hardening cementitious composite(SHCC); hybrid; steel fiber(SF); polyvinyl alcohol (PVA); flexural property; prediction model

应变硬化水泥基复合材料(SHCC)的极限拉伸应变大、延性好,近年来受到了土木工程领域的广泛关注^[1-6].但是由于成本原因,SHCC的推广应用依

然存在瓶颈.纤维混杂化是提高SHCC性价比的重要手段之一^[7-20].近年来,国内外学者对钢纤维(SF)/聚乙烯醇(PVA)纤维混杂应变硬化水泥基复

收稿日期:2019-08-07; 修订日期:2019-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908247);江苏省自然科学基金资助项目(BK20170192);硅酸盐建筑材料国家重点实验室开放基金项目(SYSJJ2017-11);绿色建筑材料国家重点实验室开放基金项目(YA-616)

第一作者:张 聪(1988—),男,山东枣庄人,江南大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:zhangcong@jiangnan.edu.cn

合材料(SF-PVA/SHCC)的基本力学性能开展了广泛的试验研究^[8-20]。相比于直接拉伸试验,弯曲试验更容易开展且其数据离散较小。而且从结构材料的工程应用角度来看,深入了解 SF-PVA/SHCC 的弯曲性能是其在建筑结构构件中应用的前提。近年来,国内外学者对 PVA 纤维混杂应变硬化水泥基复合材料(PVA/SHCC)以及 SF-PVA/SHCC 的弯曲性能开展了一定的研究,但是目前依然欠缺能够预测 SF-PVA/SHCC 弯曲性能的理论计算方法。

本文开展了不同掺量钢纤维与 PVA 纤维混杂增强 SHCC 弯曲性能的试验与理论研究,讨论了纤维种类和掺量对 SHCC 抗弯强度、极限弯曲挠度及荷载-挠度曲线的影响,并基于混凝土断裂力学与细观力学理论,通过考虑钢纤维/PVA 纤维混杂的影响,提出了一种适用于 PVA-SHCC 和 SF-PVA/SHCC 弯曲性能的预测模型,以期为 SHCC 的研究与应用提供必要的试验与理论依据。

1 试验

1.1 基体材料

基体选用水泥砂浆,材料包括无锡天山水泥集团有限公司生产的 P·O 42.5 水泥、河南四通化建有限公司提供的 I 级粉煤灰和精细石英砂(粒径 100~210 μm ,平均粒径 150 μm),按照 $m(\text{水泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{石英砂})=1.0:4.0:1.8$ 的比例混合,水胶比 $m_w/m_b=0.34$ 。瑞士进口的 Sika 牌聚羧酸高性能减水剂,减水率(质量分数)28.3%,用于调节新拌浆体的工作性,掺量为胶凝材料质量的 0.5%。

1.2 纤维材料

钢纤维(SF)由上海真强纤维有限公司生产,有端部弯钩,长度为 13 mm,直径为 0.2 mm,长径比为 65,抗拉强度为 2 000 MPa,弹性模量为 200~

210 GPa,密度为 7.8 g/cm^3 ;PVA 纤维由日本可乐丽公司生产,长度为 12 mm,直径为 39 μm ,抗拉强度为 1 100 MPa,弹性模量为 42.8 GPa,密度为 1.3 g/cm^3 。试验中各纤维掺量(均以 SHCC 的体积分数计)如表 1 所示。

表 1 应变硬化水泥基复合材料中纤维掺量
Table 1 Volume fraction of fibers in SHCC $\varphi/\%$

Sample	SF	PVA fiber
PVA-SHCC	0	2.00
SF-PVA/SHCC-1	0.25	1.75
SF-PVA/SHCC-2	0.50	1.50
SF-PVA/SHCC-3	0.75	1.25
SF-PVA/SHCC-4	1.00	1.00

1.3 试件制作

采用无锡建材试验仪器厂的 JJ-5 型行星式水泥胶砂搅拌机,先将水泥、粉煤灰、石英砂干拌 2 min;随后加入水和高效减水剂,搅拌 2 min;最后均匀加入纤维,搅拌 5 min,获得新拌水泥基材料。搅拌过程中发现,新拌材料工作性良好,纤维分散比较均匀,未发现明显的纤维缠绕与结团现象。采用 100 mm×400 mm×15 mm 试件测试材料的抗弯性能,每组配合比成型试件 3 个。参照 JC/T 2461—2018《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》,新拌材料装模后放入标准养护箱中养护 24 h 后拆模,在 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95% 的条件下继续养护至 28 d,将试件取出进行弯曲性能试验。

1.4 弯曲性能试验

采用济南兰博时代测试技术有限公司的 WAW-100D 型万能试验机,按照图 1 所示加载装置进行加载。试件跨距为 300 mm,通过荷载传感器(量程 10 kN)和位移计(LVDT)测试试件的弯曲荷载及跨中挠度。加载方式为位移控制,加载速率为 0.5 mm/min。

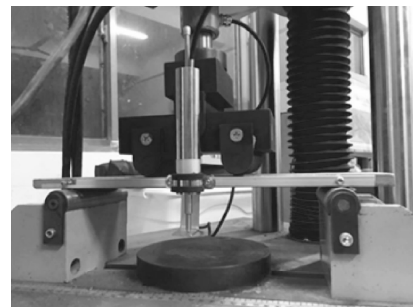
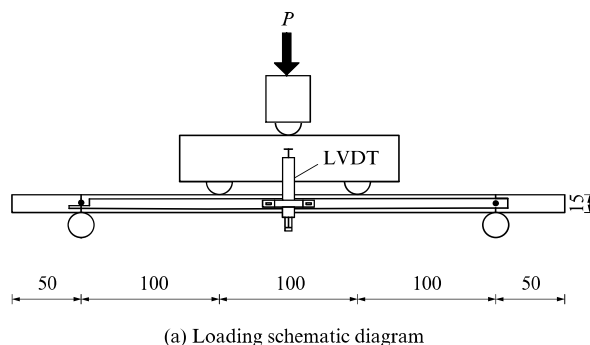


图 1 弯曲性能试验加载装置

Fig. 1 Loading instrument for flexural property test(size:mm)

2 结果与讨论

2.1 弯曲荷载-挠度曲线

图2为各组试件的弯曲荷载-挠度曲线.图3为各组试件的抗弯强度与极限弯曲挠度的平均数据统计.由图2、3可以看出:(1)钢纤维劣化了SHCC的弯曲变形能力,说明PVA纤维对SHCC的弯曲挠度硬化行为起控制作用;随着钢纤维掺量的提高,SHCC的弯曲变形能力将进一步劣化,当钢纤维掺量由0%增加到1.00%时,SHCC的极限弯曲挠度降低了63.7%.这是因为相同掺量条件下,钢纤维的根数和PVA纤维的根数差异太大.因此,实际上

纤维的有效桥联应力是不足的^[4],导致SHCC的硬化过程和多缝开裂过程并不稳定,从而无法使SHCC表现出明显的高延性.(2)钢纤维提高了SHCC的弯曲承载能力,其抗弯强度随着钢纤维掺量的提高而增大,随着钢纤维掺量由0%增加到1.00%,SHCC的抗弯强度提高了57.3%.这是由于本文所采用的超细钢纤维属刚性纤维且带有端部弯钩,而乱向分布的微细钢纤维可以很好地阻碍混凝土内部微裂缝的扩展以及宏观裂缝的发生和发展,对主要由主拉应力控制的抗弯强度有明显的改善作用.而PVA纤维属柔性纤维,相比于微细钢纤维,PVA纤维对SHCC的抗弯强度影响较弱.

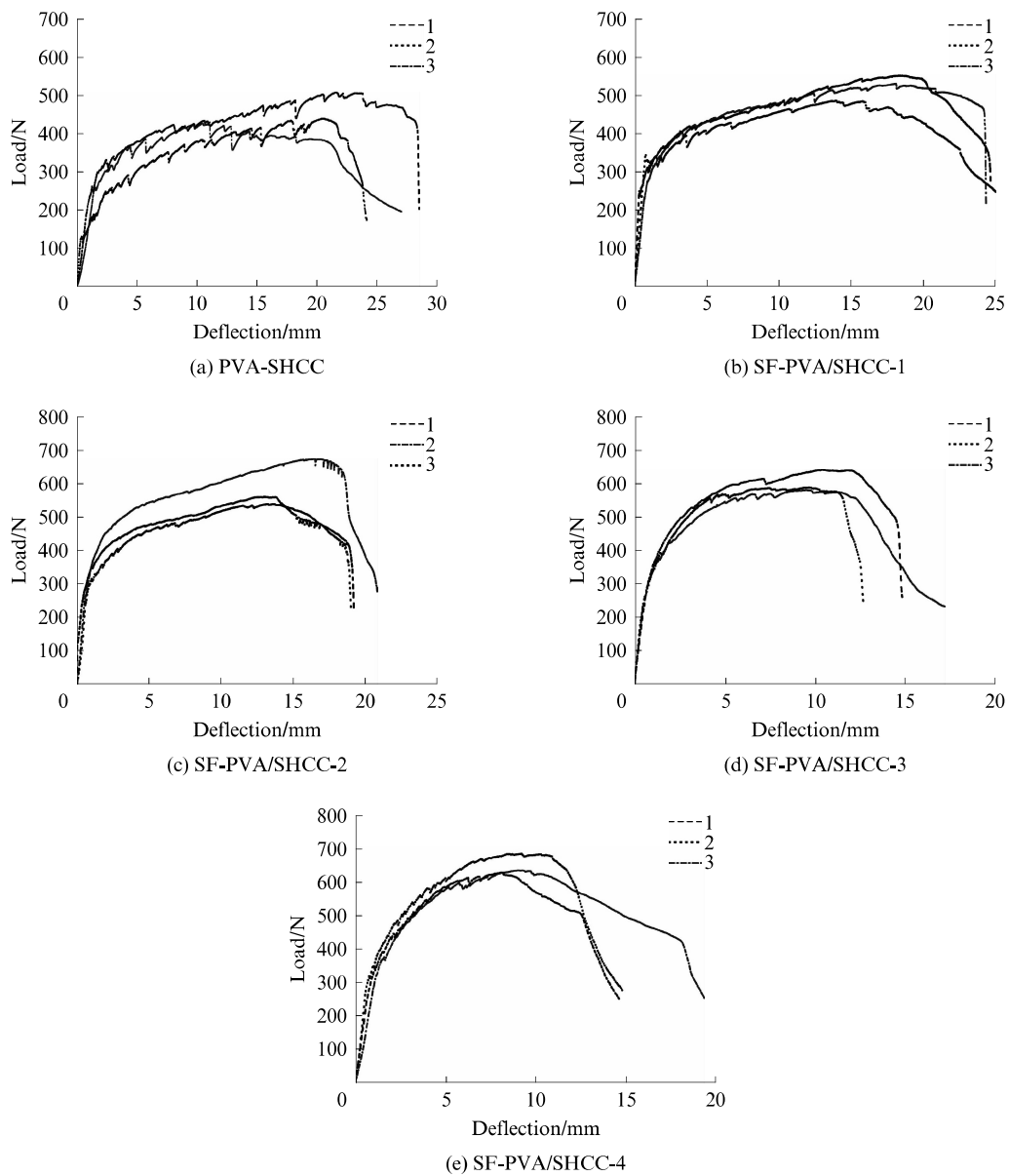


图2 各组试件的弯曲荷载-挠度曲线
Fig. 2 Flexural load-deflection curves of each group sample

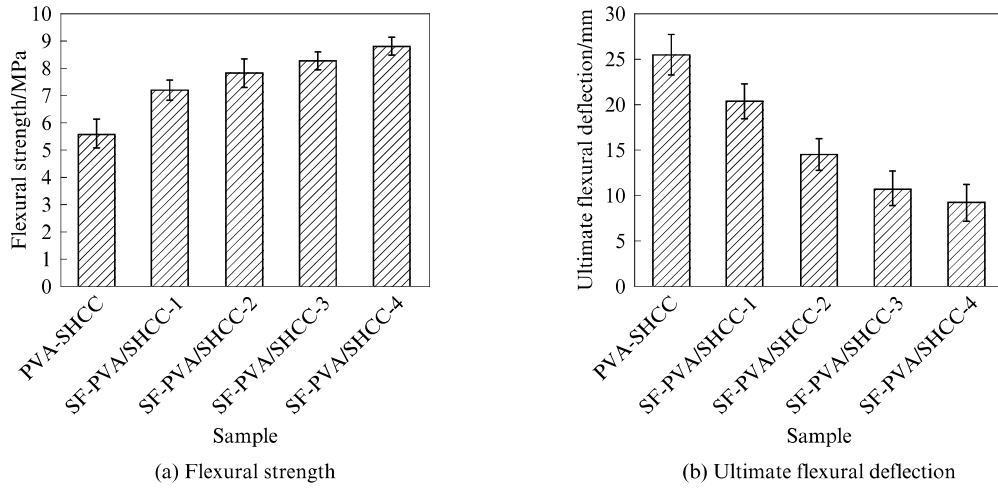


图 3 各组试件的平均抗弯强度和极限弯曲挠度
Fig. 3 Average flexural strength and ultimate flexural deflection of each group sample

2.2 弯曲裂缝形态

图 4 为各组试件跨中区域的弯曲裂缝形态. 由图 4 可以看出: PVA-SHCC 在弯曲荷载作用下表现出了明显的多缝开裂特征, 裂缝宽度和裂缝间距均较小; 随着钢纤维掺量的提高, 试件的弯曲裂缝宽度和裂缝间距逐渐变大, 裂缝数量逐渐减少, 多缝开裂现象逐渐变得不明显, 且出现裂缝局部化的现象. 上述发现与各组试件荷载-挠度曲线所表现出来的规律一致: 随着钢纤维掺量的提高, 荷载-挠度曲线变得更加平滑 (多缝开裂行为减弱), 极限挠度值逐渐减小 (裂缝减少且出现局部化现象).

2.3 弯曲性能预测

2.3.1 抗弯强度计算

Maalej 等^[21] 研究发现, SHCC 的抗弯强度 (极限弯曲应力, σ_{bu}) 与其抗拉强度 (极限拉伸应力, σ_{tu}) 的比值在 1~4 之间. 在此基础上, 本文通过引入纤维增强因子 (RI_v)^[22], 用于考虑混杂纤维体积和纤维几何特征的影响, 将 PVA-SHCC 以及 SF-PVA/SHCC 的 σ_{bu} 与 σ_{tu} 的关系表达为式 (1).

$$\sigma_{bu} = \frac{3RI_v}{2} \sigma_{tu} \quad (1)$$

式中: $RI_v = \sum_{i=1}^n \beta \varphi_i \frac{l_i}{d_i} \left(\frac{E_i}{E_{SF}} \right)^p$, 本文混杂纤维选用钢纤维和 PVA 纤维, 因此 n 为 2; β 为纤维黏结系数^[23], PVA 纤维取 1, 端部弯钩钢纤维取 1.2; p 为系数, PVA 纤维取 1.3, 钢纤维取 1; φ_i 为第 i 种纤维的掺量; l_i 为第 i 种纤维的长度; d_i 为第 i 种纤维的直径; E_i 为第 i 种纤维的弹性模量; E_{SF} 为钢纤维的弹性模量, 取为 210 GPa.

根据 Li 等^[24] 的研究, $\sigma_{tu} = g\sigma_0$. 其中: σ_0 为纤维桥联应力, 按式 (2) 计算; g 为纤维效应系数, 按式 (3) 计算.

$$\sigma_0 = \frac{\varphi_{PVA} \tau_{PVA}}{2} \left(\frac{l_{PVA}}{d_{PVA}} \right) + \frac{\varphi_{SF} \tau_{SF}}{2} \left(\frac{l_{SF}}{d_{SF}} \right) \times F_{bc} \quad (2)$$

$$g = \frac{2}{4 + f^2} (1 + e^{f/2}) \quad (3)$$

式中: τ_{PVA} 、 τ_{SF} 分别为 PVA、SF 纤维与基体的界面粘结强度, 其取值可参考文献^[25]; φ_{PVA} 、 l_{PVA} 、 d_{PVA} 分别为 PVA 掺量、长度和直径; φ_{SF} 、 l_{SF} 、 d_{SF} 分别为 SF 的掺量、长度和直径; F_{bc} 端部弯钩钢纤维的形状特征系数^[23], 取值范围 1.2~2, 本文取为 1.8; f 为界面参数, 取值范围 0~1, 本文根据 Ahmed 等^[20] 的建议, 取为 0.55.

2.3.2 极限弯曲挠度计算

图 5 为板隔离体的应变分布和曲率. 板跨中极限弯曲挠度 (u) 与曲率 (ρ) 的关系为 $u = \frac{L^2}{8\rho}$ ^[21,26], 其中 L 为板的跨度. 由图 5 可知, 极限拉伸应变 (ϵ_{tu}) 与中和轴高度 (c) 及曲率 ρ 存在如式 (4) 所示关系. 因此, u 与 ϵ_{tu} 的关系可表示为式 (5). 其中 $c = 0.9h$ ^[25], h 为板的厚度, 取为 15 mm.

$$\epsilon_{tu} = \frac{(\rho + c) d \theta - \rho d \theta}{\rho d \theta} = \frac{c}{\rho} \quad (4)$$

$$u = \frac{\epsilon_{tu} L^2}{8c} \quad (5)$$

根据 Lin 等^[28] 的研究, ϵ_{tu} 可按式 (6) 计算.

$$\epsilon_{tu} = \frac{\delta_{cu}}{x_d} \quad (6)$$

式中: δ_{cu} 为裂缝极限开口位移; x_d 为裂缝极限间距. 为简化计算, 假设极限状态时裂缝间距相等.

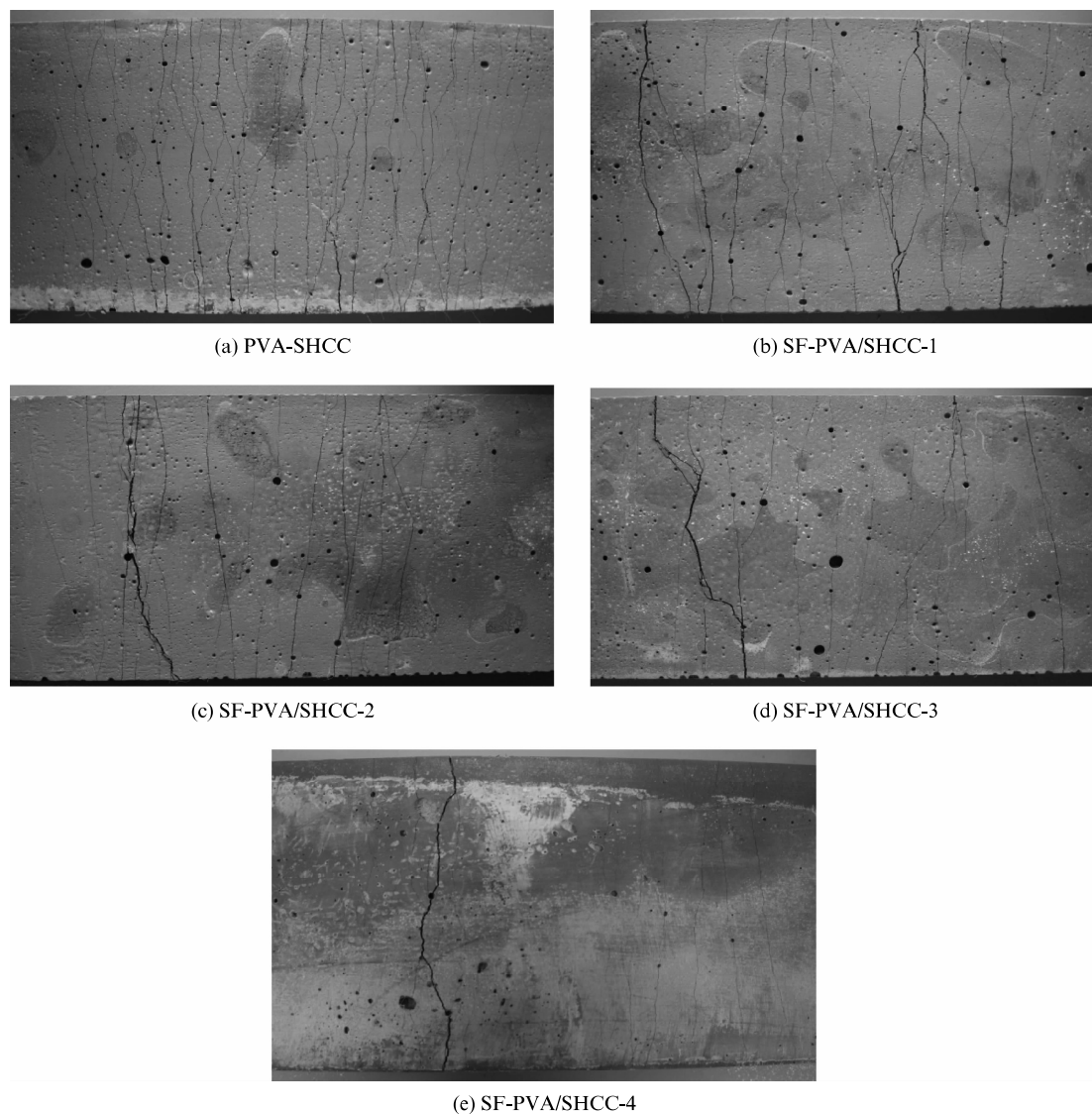


图 4 各组试件跨中区域的弯曲裂缝形态

Fig. 4 Flexural cracking pattern of each group sample in mid-span area

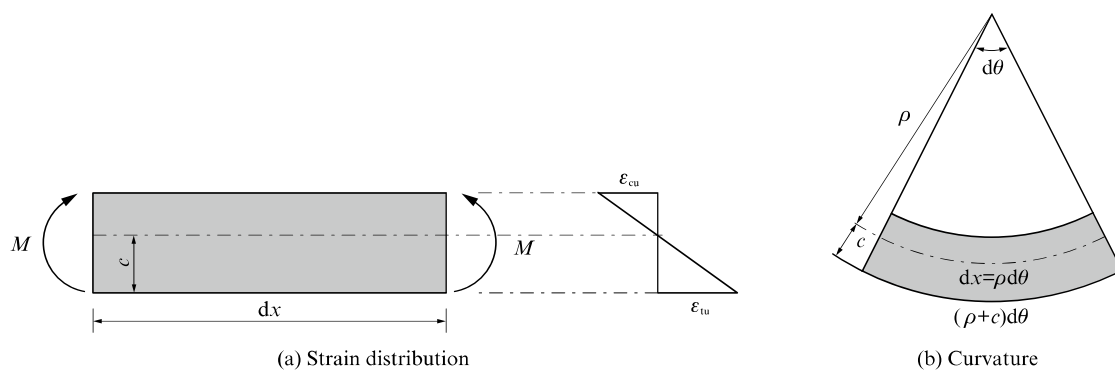


图 5 板隔离体的应变分布和曲率

Fig. 5 Strain distribution and curvature of slab free body

Kanda 等^[28] 以及 Li 等^[29] 研究发现, PVA 纤维会出现滑移-硬化行为, 而刚性纤维如钢纤维会出现

滑移-软化行为. Lin 等^[27] 研究发现, 如果忽略 PVA 纤维的滑移-硬化行为, 会使 δ_{tu} 明显偏低. 对于有滑

移-软化现象的钢纤维, δ_{tu} 取值参考 Li 等^[30] 的研究. 根据 Lin 等^[27] 的建议, 考虑 PVA 纤维滑移-硬化行为, δ_{tu} 可按式(7)计算.

$$\delta_{tu} = \frac{l_f}{2} \tilde{\delta}_1 \quad (7)$$

式中: $\tilde{\delta}_1 = \frac{c-2}{3c}$, c 为裂缝半径, $c = \frac{\gamma l_f}{2d_f}$; l_f 为 PVA 纤维长度, 取为 12 mm; d_f 为 PVA 纤维直径, 取为 0.039 mm; γ 为无量纲的硬化参数, 可由单纤维拔出曲线拟合结果取经验值^[30] 或通过摩尔干涉法直接获得^[31], 根据 Wu 等^[25] 的研究, 本文中 γ 值取为 0.5.

Wu 等^[32] 研究发现, 完全饱和和开裂状态下的极限裂缝间距理论值(x_d^{theory})可由式(8)确定.

$$x_d^{\text{theory}} = \frac{l_f - \sqrt{l_f^2 - 2\pi\phi l_f x}}{2} \quad (8)$$

式中: $\phi = \frac{4}{\pi g}$; $x = \frac{V_m \sigma_{mu} d_f}{4V_f \tau_i}$, σ_{mu} 为基体抗拉强度, 由于基体配比相似, 根据 Wu 等^[32] 的研究, 本文中 σ_{mu} 取为 3 MPa.

Kanda 等^[33] 研究发现, 对于 PVA 纤维等聚合物纤维增强水泥基复合材料, 其开裂状态为非饱和

开裂状态, 其实际裂缝间距 x_d 要比式(8)中计算的 x_d^{theory} 值大. 因此, 根据 Wu 等^[34] 及 Alwan^[35] 的研究, 通过引入韦伯分布函数, 可以将实际裂缝间距 x_d 表示为式(9).

$$x_d = \frac{x_d^{\text{theory}}}{1 - F(\bar{c}_{mc})} \quad (9)$$

式中: $F(\bar{c}_{mc}) = \exp\left[-\frac{1}{\lambda} \left(\frac{\bar{c}_0}{\bar{c}_{mc}}\right)^m\right]$; m 为韦伯模数, 水泥基材料的 m 通常假设在 2~3 之间, 考虑到在搅拌过程中纤维可能带来的附加缺陷, 本文根据 Wu 等^[34] 的建议取 $m = 2$; $\bar{c}_0$ 为参考裂缝半径, $\bar{c}_0 = \left(\frac{\sqrt{\pi} K_m}{2 \sigma_{mu}}\right)^2$; λ 为尺度参数, 可由试验数据反推得到, 本文取为 50; K_m 为基体断裂韧度, 参考 Ahmed 等^[20] 的研究结果取值为 1 MPa · m^{0.5}.

表 2 为各组试件抗弯强度 σ_{bu} 和极限弯曲挠度 (D) 的理论计算结果与试验结果的对比, 其中 $\sigma_{bu\text{-theory}}/\sigma_{bu\text{-test}}$ 均值为 0.98, 标准差为 0.061, 变异系数为 0.062, $D_{\text{theory}}/D_{\text{test}}$ 均值为 1.06, 标准差为 0.037, 变异系数为 0.035.

表 2 各组试件的平均抗弯强度和极限弯曲挠度的理论值与试验值对比

Table 2 Comparison between theoretical and experimental results of average flexural strength and ultimate flexural deflection for each groups

Sample	$\sigma_{bu\text{-theory}}/\text{MPa}$	$\sigma_{bu\text{-test}}/\text{MPa}$	$\sigma_{bu\text{-theory}}/\sigma_{bu\text{-test}}$	$D_{\text{theory}}/\text{mm}$	$D_{\text{test}}/\text{mm}$	$D_{\text{theory}}/D_{\text{test}}$
PVA-SHCC	5.56	5.62	0.98	26.08	25.53	1.02
SF-PVA/SHCC-1	6.46	7.23	0.90	22.25	20.37	1.09
SF-PVA/SHCC-2	7.49	7.87	0.95	15.92	14.54	1.09
SF-PVA/SHCC-3	8.41	8.30	1.01	11.67	10.84	1.08
SF-PVA/SHCC-4	9.35	8.84	1.06	9.50	9.27	1.02

从表 2 可以看出, 计算模型可以较好地预测 SF-PVA/SHCC 的弯曲性能. 其中, 极限弯曲挠度的理论计算结果均高于试验结果, 是因为理论计算中假定裂缝是均匀等间距分布的, 是一种理想状态, 而实际试验中 SHCC 的裂缝分布不均匀, 裂缝开展是不充分的, 因此实际情况下 SHCC 极限挠度的试验值低于理论计算值.

3 结论

(1) 钢纤维劣化了 SHCC 的弯曲变形能力和多缝开裂能力; 随着钢纤维掺量由 0% 增加到 1.00%, SHCC 的极限弯曲挠度降低了 63.7%; 随着钢纤维掺量的提高, SHCC 的弯曲多缝开裂能力进一步劣化; 钢纤维对提高 SHCC 的弯曲承载能力有利, 材料的抗弯强度随钢纤维掺量的提高而增大, 随着钢纤维掺量由 0% 增加到 1.00%, SHCC 的抗弯强度

提高了 57.3%.

(2) 本文提出的弯曲性能计算方法可以较好地预测 SF-PVA/SHCC 的抗弯强度和极限弯曲挠度.

参考文献:

- [1] QUDAH S, MAALEJ M. Application of engineered cementitious composites(ECC) in interior beam-column connections for enhanced seismic resistance[J]. Engineering Structures, 2014, 69: 235-245.
- [2] ZHANG Y X, DENG M K, DONG Z F. Seismic response and shear mechanism of engineered cementitious composite(ECC) short columns[J]. Engineering Structures, 2019, 192: 296-304.
- [3] COSTA F B, RIGHI D P, GRAEFF A G. Experimental study of some durability properties of ECC with a more environmentally sustainable rice husk ash and high tenacity polypropylene fibers[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 505-513.

- [4] 曹明莉, 许玲, 张聪. 高延性纤维增强水泥基复合材料的微观力学设计、性能及发展趋势[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5): 632-642.
- CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. Review on micromechanical design, performance and development tendency of engineered cementitious composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(5): 632-642. (in Chinese)
- [5] AHMED A, ASSEM A H, MOHAMED K, et al. Evaluating the cracking behavior of ECC beam-column connections under cyclic loading by acoustic emission analysis[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 958-968.
- [6] 王振波, 张君, 王庆. 混杂纤维增强延性水泥基复合材料力学性能与裂宽控制[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 216-221.
- WANG Zhenbo, ZHANG Jun, WANG Qing. Mechanical behavior and crack width control of hybrid fiber reinforced ductile cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2): 216-221. (in Chinese)
- [7] MAALEJ M, QUEK S T, AHMED S F U, et al. Review of potential structural applications of hybrid fiber engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 216-227.
- [8] AL-GEMEEL A, YAN Z, OSAMA Y. Use of hollow glass microspheres and hybridfibres to improve the mechanical properties of engineered cementitious composite[J]. Construction and Building Materials, 2018, 171: 858-870.
- [9] KHIN T S, ZHANG Y X, ZHANG L C. Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 399-407.
- [10] KHIN T S, ZHANG Y X, ZHANG L C. Impact resistance of hybrid-fibre engineered cementitious composite panels[J]. Composite Structures, 2013, 104: 320-330.
- [11] POURFALAH S. Behaviour of engineered cementitious composites and hybrid engineered cementitious composites at high temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 921-937.
- [12] ALESSANDRO P F, HIROZO M, TOMOYA N. Tailoring hybrid strain-hardening cementitious composites[J]. ACI Materials Journal, 2014(3/4): 211-218.
- [13] BELL J, ZHANG Y X, SOE K. High velocity impact behaviour of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels[J]. Advanced Materials Research, 2012, 450-451: 563-567.
- [14] SOE K T, ZHANG Y X, ZHANG L C. Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composite[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 399-407.
- [15] SOE K T, ZHANG Y X, ZHANG L C. Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels[J]. Composite Structures, 2013, 104: 320-330.
- [16] LI Q H, GAO X, XU S L. Multiple effects of nano-SiO₂ and hybrid fibers on properties of high toughness fiber reinforced cementitious composites with high volume fly ash[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 72: 201-212.
- [17] ZHANG J, WANG Z B, WANG Q. Simulation and test of flexural performance of polyvinyl alcohol-steel hybrid fiber reinforced cementitious composite[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(30): 4291-4305.
- [18] LIU J, TAN K H. Fire resistance of strain hardening cementitious composite with hybrid PVA and steel fibers[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 600-611.
- [19] WANG Z B, ZHANG J, WANG J H, et al. Tensile performance of polyvinyl alcohol-steel hybrid fiber reinforced cementitious composite with impact of water to binder ratio[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 49(18): 2169-2186.
- [20] AHMED S F, MAALEJ M, PARAMASIVAM P. Analytical model for tensile strain hardening and multiple cracking behavior of hybrid fiber-engineered cementitious composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(7): 527-539.
- [21] MAALEJ M, LI V C. Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1994, 6(4): 513-528.
- [22] OU Y, TSAI M, LIU K. Compressive behavior of steel-fiber-reinforced concrete with a high reinforcing index[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 24(2): 207-215.
- [23] NING X L, DING Y N, ZHANG F S. Experimental study and prediction model for flexural behaviour of reinforced SCC beam containing steel fibers[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 644-653.
- [24] 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.
- [25] WU H, LI V C. Fiber/cement interface tailoring with plasma treatment[J]. Cement & Concrete Composites, 1999, 21(3): 205-212.
- [26] 蔡向荣, 徐世娘. UHTCC 薄板弯曲荷载-变形硬化曲线与单轴拉伸应力-应变硬化曲线对应关系研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 8-16.
- CAI Xiangrong, XU Shilang. Study on corresponding relationships between flexural load-deformation hardening curves and tensile stress-strain hardening curves of UHTCC[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 8-16. (in Chinese)
- [27] LIN Z, LI V C. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1997, 45(5): 736-787.
- [28] KANDA T, LI V C. Tensile stress-strain modeling of pseudo strain-hardening cementitious composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2): 147-156.
- [29] LI V C, STANG H. Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites[J]. Advanced Cement Based Materials, 1997, 6(1): 1-20.
- [30] WANG Y, LI V C, BACKER S. Modelling of fibre pull-out from a cement matrix[J]. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1988, 10(3): 143-149.
- [31] SHAO Y, LI Z, SHAH S P. Matrix cracking and interface

- debonding in fiber-reinforced cement-matrix composites [J]. Advanced Cement Based Materials, 1993, 1(2):55-56.
- [32] WU H, LI V C. Snubbing and bundling effects on multiple crack spacing of discontinuous random fiber-reinforced brittle matrix composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1992, 75(12):3487-3489.
- [33] KANDA T, LI V C. Multiple cracking sequence and saturation in fiber reinforced cementitious composites[J]. Concrete Research and Technology, 1995, 9(2):19-32.
- [34] WU H, LI V C. Stochastic process of multiple cracking in discontinuous random fiber reinforced brittle matrix composites [J]. International Journal of Damage Mechanics, 1995 (4): 83-102.
- [35] ALWAN J M. Modeling of the mechanical behavior of fiber reinforced cement based composites under tensile loads[D]. Michigan: University of Michigan, 1994.

~~~~~

(上接第 6 页)

- [16] BAI M, NIU D T, WU X. Experiment study on the chloride penetration of steel fibre reinforced concrete [J]. Advanced Materials Research, 2009, 79-82:1771-1774.
- [17] VAN DEN HEEDE P, DE KEERSMAECKER M, ELIA A, et al. Service life and global warming potential of chloride exposed concrete with high volumes of fly ash[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 80:210-223.
- [18] 陈伟. PVA 纤维混凝土力学性能及抗氯离子渗透性能试验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2019.
- CHEN Wei. Experimental study on mechanical properties and resistance chloride penetration of PVA fiber concrete [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)