

文章编号:1007-9629(2021)01-0063-08

钢纤维增强高强轻骨料混凝土的力学性能

叶艳霞¹, 王宗彬¹, 谢夫林¹, 付翠红¹, 张志银²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;

2. 成都基准方中建筑设计有限公司西安分公司, 陕西 西安 710061)

摘要: 为提高高强轻骨料混凝土(HLAC)的强度和韧性,在 HLAC 中分别掺入体积分数为 0.5%~2.0%的微细型、端钩型、波纹型钢纤维,研究了钢纤维类型及其体积分数对钢纤维增强高强轻骨料混凝土(SFHLAC)的抗压、劈裂抗拉、抗折和抗剪强度等力学性能的影响,分析了 SFHLAC 的韧度因子和承载力变化系数等材料韧性指标的变化特点. 结果表明:除体积分数为 2.0%的波纹型钢纤维增强高强轻骨料混凝土外,SFHLAC 的力学强度和韧性指标均随着钢纤维体积分数的增大而增大;微细型钢纤维对 HLAC 的增强增韧效果最好,端钩型钢纤维对 HLAC 抗折强度的提高效果与微细型钢纤维接近,但对其他力学强度和韧性的改善均不如微细型钢纤维,波纹型钢纤维对 HLAC 的增强增韧效果均较差;综合考虑新拌混合料工作性能后,给出了 3 种典型钢纤维的工程应用建议体积分数.

关键词: 高强轻骨料混凝土; 钢纤维; 力学性能; 韧性

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.009

Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced High-Strength Lightweight Aggregate Concrete

YE Yanxia¹, WANG Zongbin¹, XIE Fulin¹, FU Cuihong¹, ZHANG Zhiyin²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

2. Xi'an Datum Fangzhong Architectural Design Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to improve the strength and toughness of high-strength lightweight aggregate concrete (HLAC), 0.5% to 2.0% volume fraction of micro-fine, end hook and corrugated steel fibers were mixed into HLAC respectively. The mechanical properties of steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete(SFHLAC) such as compression, splitting tensile, flexural and shear strength were studied. The characteristics of material toughness such as toughness factor and bearing capacity variation coefficient of SFHLAC were also analyzed. The results show that except for the corrugated steel fiber reinforced high-strength lightweight aggregate concrete with 2.0% volume fraction of corrugated steel fiber, the strength and toughness of SFHLAC increase with the increase of the steel fiber volume fraction; the micro-fine steel fiber has the best reinforcement and toughening effect on HLAC; the improvement effect of the end hook steel fiber and the micro-fine steel fiber on flexural strength of the HLAC is similar, but the improvement of other mechanical strength and toughness is not as good as that of micro-fine steel fiber; the effect of corrugated steel fiber on the strength and toughness of HLAC is poor; after comprehensively considering the working performance of the fresh mixture, the recommended volume fraction for engineering applications of three typical steel fibers are given.

Key words: high-strength lightweight aggregate concrete; steel fiber; mechanical property; toughness

收稿日期:2019-09-16; 修订日期:2020-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978060);西安市科技计划项目资助(2020KJRC0124)

第一作者:叶艳霞(1970—),女,河南漯河人,长安大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: yeyanxia@chd.edu.cn

高强轻骨料混凝土(HLAC)的表观密度小于 $1\,950\text{ kg/m}^3$, 强度不低于 LC40, 是轻质、高强、节能环保的结构材料^[1-2]. 在高层、大跨、桥梁、海事和软土地基工程中, HLAC 具有广泛的应用前景和良好的社会效益. 随着高强轻质陶粒生产技术的进步, HLAC 的制备工艺不断成熟, 且轻质陶粒的生产原料(工业废渣、粉煤灰、煤矸石、浮石、黏土等)储备丰富, 为 HLAC 的推广应用提供了保障. 随着 HLAC 强度的提高, 其脆性更加明显, 不利于其在一些高受拉和高剪切结构部位的应用. 因此, HLAC 的增强增韧成为近些年的研究热点之一.

文献[3-5]借鉴了钢纤维增强普通混凝土的研究经验, 利用钢纤维(SF)来改善 HLAC 各项力学性能, 提高了其韧性和延性. Campione 等^[3]研究表明, 同一类型和掺量的钢纤维可使膨胀黏土和陶粒轻骨料混凝土抗压强度提高 30% 左右, 对浮石轻骨料混凝土抗压强度基本没有影响. Ma 等^[4]将 13 mm 微细型钢纤维加入到 3 种类型粗骨料混凝土中, 使混凝土抗压强度分别提高了 19%、40% 和 42%, 抗折强度分别提高了 108%、92% 和 78%, 表明粗骨料类型对钢纤维增强混凝土抗压强度的影响较大. 刘汉勇等^[5]同样证实了钢纤维对 HLAC 各项强度和韧性均有明显改善, 其对 HLAC 抗压强度的改善优于低强度等级轻骨料混凝土和普通混凝土. 朱海堂等^[6]研究发现不同类型钢纤维对混凝土的强度增强效应存在较大差异, 且有明显的尺寸效应. 由此可见, 钢纤维类型、尺寸参数、粗骨料类型等对 HLAC 的性能影响较大, 有必要对钢纤维增强高强轻骨料混凝土(SFHLAC)的增强增韧效应及机理进行系统研究.

本文选取工程中常用的微细型钢纤维(M-SF)、端钩型钢纤维(H-SF)和波纹型钢纤维(C-SF)3 种典型钢纤维, 研究了钢纤维类型及其体积分数对 HLAC 抗压、劈裂抗拉、抗折和抗剪强度的影响, 分析了 SFHLAC 的韧度因子和承载力变化系数, 为工程应用和试验研究提供参考.

1 试验

1.1 原材料

选用 P·O 42.5 型普通硅酸盐水泥(C), 表观密度为 $3\,100\text{ kg/m}^3$; I 级粉煤灰(FA), 密度为 $2\,600\text{ kg/m}^3$; 微硅粉(SF), 密度为 $2\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 粗骨料采用 5~16 mm 连续级配碎石型页岩陶粒

(A), 筒压强度为 6.2 MPa, 堆积密度为 750 kg/m^3 , 表观密度为 $1\,360\text{ kg/m}^3$, 1 h 吸水率¹⁾为 3.2%, 24 h 吸水率为 3.8%; 细骨料(S)采用细度模数 2.6 的普通河砂, 表观密度为 $2\,600\text{ kg/m}^3$; 减水剂采用聚羧酸高效减水剂, 减水率为 25%~27%; 钢纤维采用 M-SF、H-SF 和 C-SF, 其特征参数见表 1.

表 1 钢纤维的特征参数
Table 1 Characteristic parameters of steel fibers

Type	Average length/mm	Equivalent diameter/mm	Aspect ratio	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/MPa
M-SF	13	0.2	65	$\geq 2\,850$	240
H-SF	25	0.5	50	$\geq 1\,000$	240
C-SF	30	0.8	38	≥ 650	210

1.2 试验设计

参照 JSCE-SF-4《Method of test for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete》, 采用绝对体积法进行强度等级为 LC50 的高强轻骨料混凝土配合比设计, 基准 HLAC 的配合比见表 2. 试件编号规则如下: P 代表基准 HLAC; M-SF0.5、H-SF0.5、C-SF0.5 分别表示钢纤维 M-SF、H-SF、C-SF 的体积分数 $\varphi_{\text{M-SF}}$ 、 $\varphi_{\text{H-SF}}$ 、 $\varphi_{\text{C-SF}}$ 均为 0.5% 的 SFHLAC, 其他按此类推; M-SF-HLAC、H-SFHLAC 和 C-SFHLAC 分别表示微细型、端钩型和波纹型钢纤维增强高强轻骨料混凝土.

表 2 基准高强轻骨料混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of benchmark HLAC kg/m^3						
C	Water	FA	SF	A	S	Water reducer
440.0	165.0	82.5	27.5	511.0	709.0	4.4

1.3 试件制作

根据 JGJ 51—2002《轻骨料混凝土技术规程》和 CECS13—2009《纤维混凝土试验方法标准》, 采用容量为 60 L 的强制搅拌机进行搅拌, 混凝土拌和物的制作工序为: 先将晾干的河砂和胶凝材料干拌 2 min, 接着加入掺有减水剂的水搅拌 2 min, 制成砂浆浆体, 然后加入润湿 24 h 的陶粒继续搅拌 1 min, 最后在搅拌机转动状态下均匀加入钢纤维搅拌 4 min 后出料. 新拌基准 HLAC 拌和物的坍落度和拓展度分别为 244 mm 和 680 mm, 流动性较好; 随着钢纤维体积分数 φ_{SF} 的增大, 拌和物工作性能逐渐变差, $\varphi_{\text{SF}}=1.5\%$ 时, 拌和物坍落度和拓展度分别为 190~210 mm 和 410~520 mm, $\varphi_{\text{SF}}=2.0\%$ 时, 拌和物流动性骤降, 其中 M-SF2.0 的扩展度只有 190 mm,

1) 文中涉及的吸水率、水胶比等除特殊说明外均为质量分数或质量比.

流动性极差,将拌和物一次入模,制作抗压、抗折、劈裂抗拉和抗剪强度试件(每组各3个),用铁棒敲击试件侧壁大约30次并在地面上轻轻振动,用抹刀将上表面抹平,成型24 h后拆模并洒水养护28 d(西安室外6月份气候),养护完成后进行力学性能试验。

1.4 试验方法

根据CECS13—2009标准进行力学性能试验,抗压测试采用立方体试件,试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,劈裂抗拉、抗剪和抗折强度试件尺寸均为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,抗压、劈裂抗拉和抗折强度试件的尺寸换算系数分别取0.90、0.80、0.82。力学性能测试在万能试验机上完成,荷载数据通过计算机软件Test Expert.net采集,小梁跨度中间位置的纵向位移采用DH3820准静态应变采集系统及其配套的位移传感器进行数据采集,抗折强度试验加载速率 0.1 mm/min 。

将试验所得荷载-位移(σ - ϵ)曲线进行拟合,受力初期的直线段峰值点即为初裂点,该点对应的荷载和位移分别为试件的初裂荷载和初裂位移(δ)。韧性指数 $\eta_{m,n}$ 包括 $\eta_{m,5}$ 、 $\eta_{m,10}$ 、 $\eta_{m,30}$,其含义为当位移分别达 3.0δ 、 5.5δ 和 15.5δ 时,荷载-位移曲线和横坐标轴所围面积与位移达初裂位移 δ 时所围面积之比。承载力变化系数 $\zeta_{m,n}$ 为:

$$\zeta_{m,n} = (\eta_{m,n} - \alpha) / (\alpha - 1) \quad (1)$$

式中: α 为给定位移与初裂位移的比值,取 $\alpha = 3.0$ 、 5.5 、 15.5 。

为了比较不同SFHLAC的韧度,参照文献[7]计算韧性指标 T_{150} (T_{150} 为挠度达 $L/150$ 时对应的荷载-位移曲线与横坐标所围面积),对应平均强度的韧度因子(TF)为:

$$TF = T_b L / bh^2 \delta_k = 150 T_{150} / bh^2 \quad (2)$$

式中: T_b 为韧性指标; L 、 b 、 h 分别为支座间距、试件截面宽度和试件截面高度; δ_k 为给定的挠度 $L/150$ 。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

比强度为混凝土的抗压强度与其干表观密度之比,SFHLAC的抗压强度(f_{cu})和比强度见图1。

由图1可见:不同钢纤维类型SFHLAC试件的抗压强度和比强度差异较大; φ_{SF} 在 $0.5\% \sim 1.5\%$ 范围内递增时,同一钢纤维类型SFHLAC的抗压强度和比强度亦随之增大; $\varphi_{SF} = 2.0\%$ 时,试件M-SF2.0的抗压强度和比强度增长幅度减弱,而试件H-SF2.0和C-SF2.0的抗压强度和比强度却降低。

φ_{M-SF} 在 $0.5\% \sim 2.0\%$ 范围内,M-SF易分散,凝

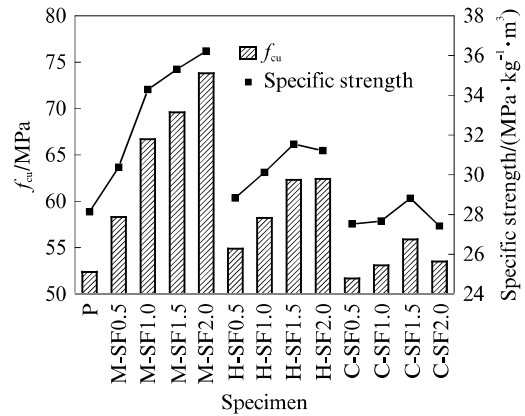


图1 SFHLAC的抗压强度和比强度

Fig. 1 Compressive strength and specific strength of SFHLACs

结硬化后M-SF与水泥基体黏结性能较好,对HLAC产生较强的环向约束力,因此M-SFHLAC试件的抗压强度较基准试件P提高最为显著;当 $\varphi_{M-SF} = 2.0\%$ 时,试件的比强度达到 $36.23\text{ MPa}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$,试件M-SF2.0的抗压强度和比强度较基准试件P分别提高 40.8% 和 28.8% ; $\varphi_{M-SF} \leq 1.0\%$ 时,M-SFHLAC的抗压强度增幅明显, $\varphi_{M-SF} > 1.5\%$ 后,拌和物流动性大幅降低,因此建议 φ_{M-SF} 取 $0.5\% \sim 1.0\%$ 。

对比图1中 φ_{SF} 相同的SFHLAC试件的抗压强度,并结合表1,试件的抗压强度增幅变化顺序为M-SFHLAC > H-SFHLAC > C-SFHLAC;与基准试件P相比,试件H-SF2.0的抗压强度和比强度分别提高了 19.1% 和 8.3% ,略低于文献[5,8]中同类型的压痕型(32 mm,长径比50)钢纤维的抗压增强效果,这表明形状、几何尺寸、力学性能等参数相近的同类型钢纤维对HLAC的抗压增强效果较为一致。文献[6,9]中掺入与本试验H-SF类似、体积分数不超过 2.0% 的钢纤维时,使高强混凝土和普通轻骨料混凝土抗压强度仅提高了 10.0% 左右,说明H-SF钢纤维对HLAC的抗压增强效果较高强混凝土和普通轻骨料混凝土更优。从破坏机理分析可知,HLAC破坏断面与普通混凝土不同,前者骨料及水泥基体均开裂破坏,而后者主要为水泥基体开裂破坏,钢纤维在HLAC中能更好地发挥约束变形和辅助受力作用。3种钢纤维中,C-SF对HLAC抗压强度的提高效果最差,仅为 6.5% 。其原因在于,本试验中选用的C-SF在相同体积分数下的纤维数量较少,不易分散均匀,相对较低的力学性能使C-SF对基材破坏强度提高的贡献度也偏低,成型后的试件上表面略鼓起,试件的密实度降低,试件在承受压应

力时易变形,纤维约束变形和辅助受力效果都较弱.

为保障钢纤维对 HLAC 的抗压增强效应,建议优先选用较大长径比的小尺寸直钢纤维.

2.2 劈裂抗拉强度

SFHLAC 的劈裂抗拉强度(f_{ts})和拉压比(f_{ts}/f_{cu})见图 2. 由图 2 可见:不同钢纤维类型的 SF-HLAC 劈裂抗拉强度与拉压比随 φ_{SF} 的变化规律一致; φ_{SF} 为 0.5%~2.0% 时,M-SF、H-SF 与 C-SF 可使 HLAC 的劈裂抗拉强度分别提高 155.0%、88.4% 和 42.2%,钢纤维对劈裂抗拉强度的增强效果可以达到抗压强度增强效果的 4 倍左右. 文献[10]指出,劈拉试验过程中钢纤维主要通过水泥胶体传递应力,界面的黏结强度决定钢纤维传递应力的水平,M-SF 在试件劈裂面上分布较密,其与水泥可以形成较强的化学胶结作用,对 HLAC 抗拉强度的增强效果最好. 因此在保障钢纤维抗拉强度的情况下,应优选长径比较大的 M-SF 对 HLAC 进行抗拉增强. 在一定范围内随着 φ_{SF} 的增加,钢纤维数量增多,对裂缝源的控制作用加强,劈裂抗拉强度随之增加. φ_{M-SF} 、 φ_{H-SF} 为 0.5% 和 1.0% 时,SFHLAC 的劈裂抗拉强度增长最明显,而 φ_{H-SF} 、 φ_{C-SF} 为 2.0% 时,SFHLAC 的劈裂抗拉强度基本不再增长甚至降低,主要原因在于当 φ_{SF} 增加到一定程度时,较大尺寸钢纤维周围水泥胶体的裹浆厚度减小,不足以提供所需的传力能力,使增强效果不理想.

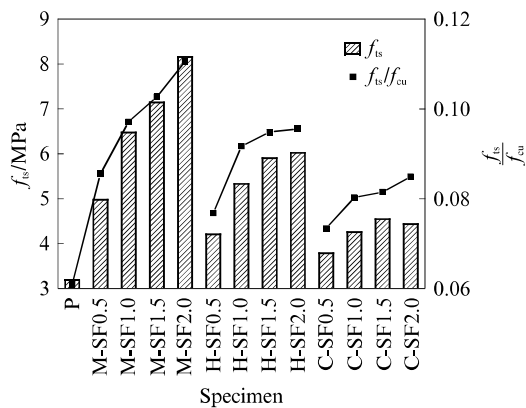


图2 SFHLAC 的劈裂抗拉强度和拉压比

Fig. 2 Splitting tensile strength and ratio of tensile to compressive strength of SFHLACs

拉压比是反映钢纤维对混凝土脆性改善作用的一个指标^[6],本文设计的 HLAC 的拉压比为 1/16.4, φ_{SF} 在 0.5%~2.0% 范围内,对应的 SFHLAC 的拉压比分别为 1/11.7~1/9.0、1/13.0~1/10.5 和 1/13.6~1/11.8. 由此可见,钢纤维可以在不同程度上改善 HLAC 的脆性,M-SF 对 HLAC 的脆性

改善尤为明显,M-SFHLAC 的拉压比与普通混凝土的拉压比(1/12.0~1/8.0)较为接近.

2.3 抗折强度

初裂抗折强度($f_{cf,ini}$)和阻裂系数(极限抗折强度 $f_{cf,lim}$ 和初裂抗折强度的比值, $f_{cf,lim}/f_{cf,ini}$)分别反映了材料抵御初期裂缝荷载及阻止裂纹开展的能力^[11]. 图 3(a)为 SFHLAC 试件的极限抗折强度和折压比($f_{cf,lim}/f_{cu}$),图 3(b)为 SFHLAC 试件初裂抗折强度和阻裂系数,图 4 为 SFHLAC 试件弯折试验后的断面图.

由图 3 可见:基准试件 P 的极限抗折强度为 5.07 MPa,远低于文献[6]中相近等级普通混凝土(7.71 MPa);SFHLAC 的初裂和极限抗折强度均随 φ_{SF} 增大而提高;与基准试件 P 相比,试件 M-SF2.0 和 H-SF2.0 的初裂抗折强度分别提高了 24.5% 和 20.1%,极限抗折强度分别提高了 62.1%、55.6%. 观察试件 M-SF1.5 和 H-SF1.5 的开裂破坏过程可知,试件初始裂缝细小,裂缝开展缓慢,钢纤维抵御初始开裂的能力较强. 尽管 H-SF 与水泥的黏结面积小于 M-SF,但 H-SF 的端钩在一定程度上提高了钢纤维的锚固性能,结合图 4(b)可知:H-SF 对 HLAC 试件开裂后的阻裂效应略优于 M-SF,因此认为 M-SF 和 H-SF 对 HLAC 试件抗折强度增强效果相当. 由图 4(a)、(b)可见,M-SF1.5 和 H-SF1.5 试件断裂面上的 M-SF 和 H-SF 产生了明显塑性变形,这说明钢纤维起到了增强作用.

由图 3 还可见:C-SF 对 HLAC 极限抗折强度的提高作用较小, φ_{C-SF} 为 0.5%~2.0% 时,SF-HLAC 试件极限抗折强度并未随 φ_{C-SF} 增大而上升,试件 C-SF2.0 的抗折强度与基准试件 P 基本相同;试件 C-SF1.5 的初裂和极限抗折强度分别较基准试件 P 提高了 1.7% 和 10.7%. 由图 4(c)可见,试件破坏断面上大部分 C-SF 未起到阻裂作用,C-SF 未被拉直就被拔出,断面上仅可见少量钢纤维被拉断,C-SF 的阻裂和增强效应都较差. 文献[6]研究发现体积分数为 2.0% 的 30.5 mm H-SF(长径比 30.5)和 32.4 mm C-SF(长径比 57.4)可使普通混凝土抗折强度分别提高 47.1% 和 7.0%,这与本文试验结果基本吻合. 对比文献[6]的研究结论发现:钢纤维对提高 HLAC 抗折强度贡献的拉应力主要通过与水泥胶体的黏结传递;在水泥胶体强度相同的情况下,尽管 SFHLAC 会因为骨料断裂而导致其整体强度低于普通钢纤维混凝土,但钢纤维对不同骨料混凝土抗折强度增强率的贡献相差不大.

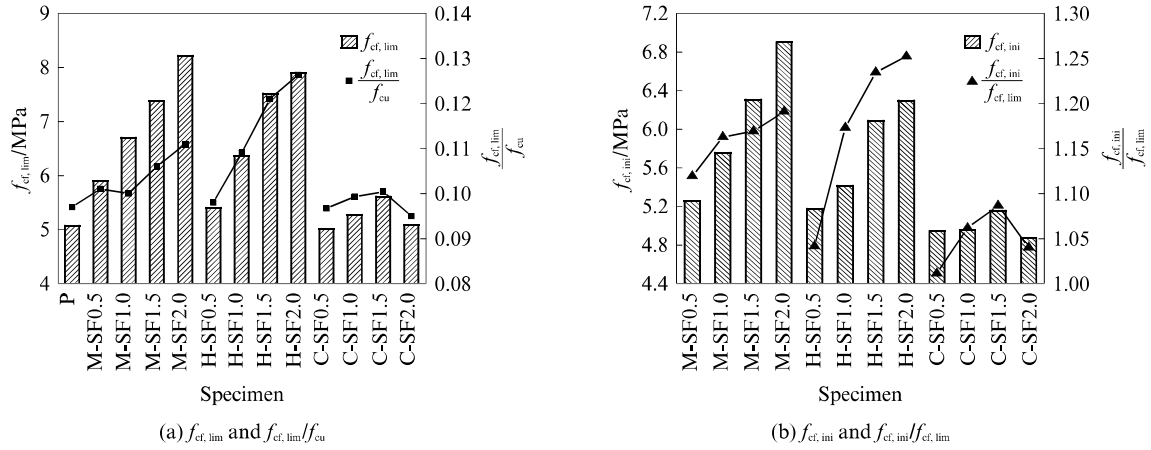


图 3 SFHLA 的抗折强度指标

Fig. 3 Index of flexural strength of SFHLACs



图 4 SFHLAC 试件弯折试验后的断面图

Fig. 4 Flexural cross-sectional view of SFHLACs

由图 3(a)还可见:3 种类型钢纤维对 HLAC 试件折压比的影响规律差异较大; φ_{SF} 为 0.5%~2.0% 时,不同 SFHLAC 试件的折压比分别为 0.101~0.111、0.098~0.126 和 0.097~0.100, H-SF 对 HLAC 折压比的改性效果较好,而 C-SF 的掺入不利于 HLAC 折压比的提高.基准试件 P 的折压比为 0.093,由于基材强度等级较高,导致本文与文献[12]给出的轻骨料混凝土折压比拟合结果(0.12)存在较大差异.

2.4 抗剪强度

SFHLAC 的抗剪强度(f_s)和剪压比(f_s/f_{cu})见图 5. 由图 5 可见:基准试件 P 的剪压比为 1/11.30,这是因为基准试件 P 中基本没有骨料的咬合作用,剪切面上骨料直接被剪断.对比文献[7-13]中普通轻骨料混凝土和高强混凝土的剪压比分别为 1/7.03 和 1/9.03,说明基准试件 P 的剪脆性较明显.

由图 5 还可见:钢纤维对 HLAC 的剪切韧性改善较为明显,这是因为 SFHLAC 试件裂缝带上的钢纤维具有很好的“桥联作用”,试件在破坏过

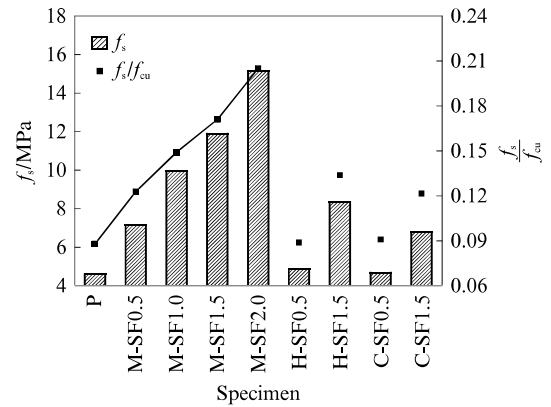


图 5 SFHLAC 的抗剪强度和剪压比

Fig. 5 Shear strength and ratio of shear-compression of SFHLACs

程中具有较好的完整性;与基准试件 P 相比, M-SF1.5、H-SF1.5 和 C-SF1.5 试件的抗剪强度分别提高 157.1%、80.4% 和 47.0%,其剪压比分别为 1/5.83、1/7.45 和 1/8.20,说明钢纤维对 HLAC 剪切性能的改善效果与剪断面上钢纤维的数量有关,数量越多,HLAC 裂缝源的控制能力越强;M-SF 对 HLAC 的抗剪强度提高最为明显,可达

226.7%。因此, M-SF 对 HLAC 可以起到很好的抗剪切增强效应, 在一些轻骨料混凝土框架节点、剪力墙等高剪力部位掺入一定量(考虑拌和料的工作性能, 建议 $\varphi_{\text{M-SF}}$ 为 0.5%~1.5%)的 M-SF, 既对轻骨料混凝土的施工性影响不大, 又会大幅度提高混凝土结构的抗剪切性能, 从而提高结构的耗能能力和安全储备。

2.5 荷载-位移曲线

SFHLAC 的弯曲试验荷载-位移(σ - ϵ)曲线见图 6。由图 6 可见: 不同钢纤维类型和体积分数使 SFHLAC 试件荷载-位移曲线形状有较大差别, 增韧效果差异较大; H-SF0.5 和 C-SF0.5 试件在达到极限强度后继续加载, 其荷载-位移曲线出现陡然下降, 而 M-SF0.5 试件在达到极限强度后继续加载,

其荷载-位移曲线较顺滑, 表现出较好的增韧效应; 随着 φ_{SF} 的增大, SFHLAC 试件的荷载-位移曲线上移, 曲线形状也更趋饱满, 表现出更好的材料韧性和延性; 当 φ_{SF} 为 0.5%~2.0% 时, SFHLAC 试件荷载-位移曲线峰值点对应的位移分别为 0.119~0.274、0.052~0.130 和 0.050~0.065 mm, M-SF-HLAC 试件的延性明显优于其他两者; M-SFHLAC 试件的荷载-位移曲线存在明显的屈服段, 达峰值荷载后曲线基本呈线性下降; H-SFHLAC 试件的荷载-位移曲线达峰值荷载后快速下降, H-SF 在变形达到一定程度后其锚固作用明显变差; C-SFHLAC 试件的荷载-位移曲线几乎没有屈服段, 峰值点对应荷载较低、位移较小, 达峰值点后曲线陡降, 试件耗能能力较差。

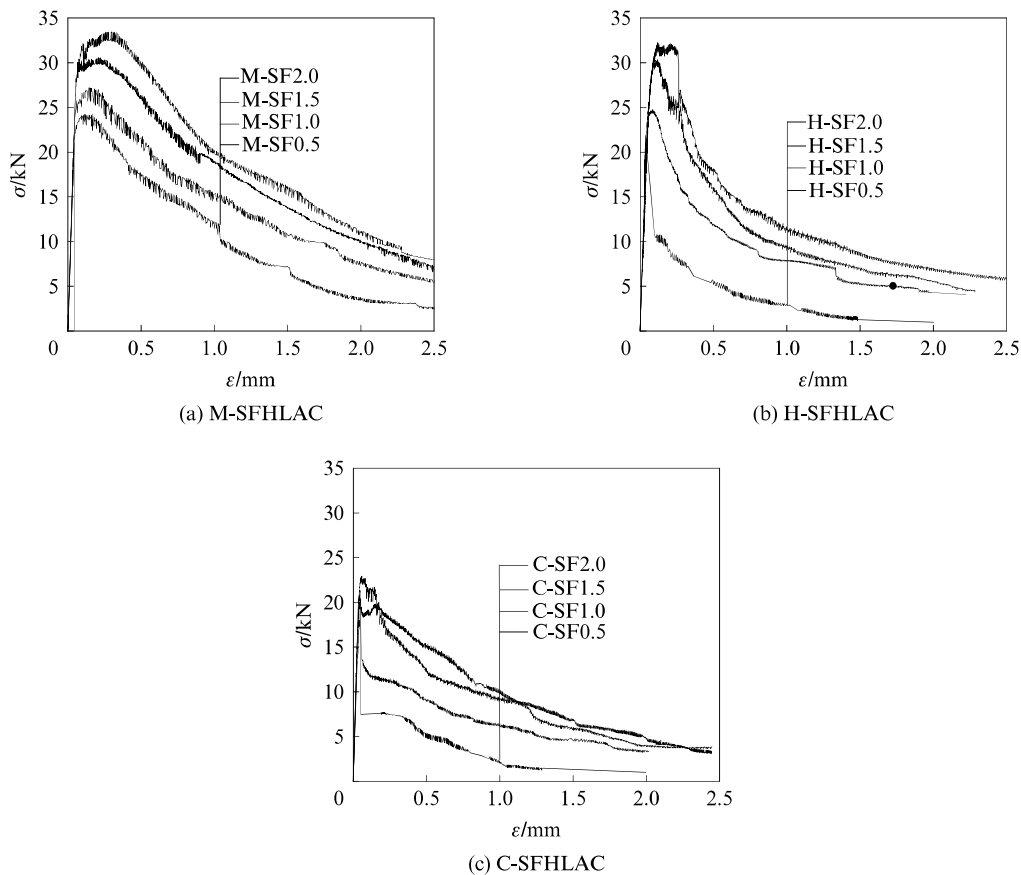


图6 SFHLAC 的弯曲试验荷载-位移曲线
Fig. 6 σ - ϵ curves of bending test for SFHLACs

2.6 韧度因子和承载力变化系数

SFHLAC 的韧度因子见图 7。由图 7 可见: φ_{SF} 为 0.5%~2.0% 时, SFHLAC 试件的韧度因子随 φ_{SF} 的增大而降幅增长; 不同钢纤维类型的 SFHLAC 对由 φ_{SF} 变化引起的韧性增长幅度相差不大; M-SF 对 M-SF0.5 试件韧度的增长贡献明显强

于其他 2 种钢纤维, 其韧度因子为后两者的 3 倍左右; 当 φ_{SF} 为 1.0%~2.0% 时, M-SFHLAC 的韧度也较 H-SFHLAC 和 C-SFHLAC 提高了约 1.5~2.1 倍, 说明 M-SF 对 HLAC 的增韧效应较好。

SFHLAC 的弯曲承载力变化系数见图 8。由图 8 可知: 随着 φ_{SF} 的增大, SFHLAC 试件的弯曲承载力变

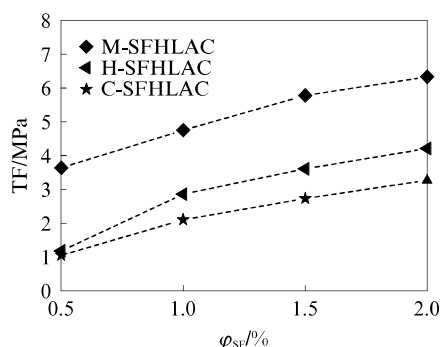


图7 SFHLAC的韧度因子

Fig. 7 Toughness factor of SFHLACs

化系数增大,试件韧性提高;钢纤维类型对 SFHLAC 试件的固有弹塑性属性影响较大;M-SFHLAC 的承载力变化系数 $\zeta_{m,n}$ 基本大于 1,具有较好的变形持荷和耗能能力;在小变形 (3.0δ 、 5.5δ) 下, H-SF-HLAC 的承载力变化系数 $\zeta_{m,5}$ 和 $\zeta_{m,10}$ 大于 1,大变形 (15δ) 下对应的 $\zeta_{m,30}$ 数值降低较多,大变形下的韧性较差;C-SFHLAC 的承载力变化系数 $\zeta_{m,n}$ 在各 φ_{SF} 下均小于 1,钢纤维与水泥基体协同性较差。推荐 φ_{M-SF} 为 $0.5\% \sim 1.0\%$, φ_{H-SF} 为 $1.0\% \sim 1.5\%$ 。

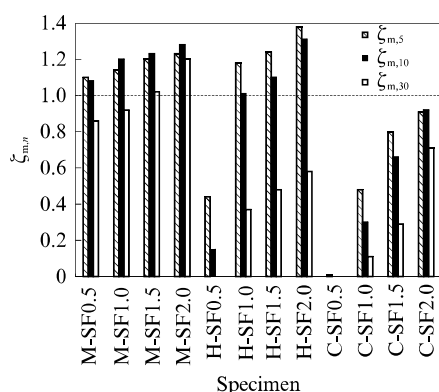


图8 SFHLAC的弯曲承载力变化系数

Fig. 8 Variation coefficient of flexural resistance of SFHLACs

3 结论

(1)除体积分数为 2.0% 的波纹型钢纤维 (C-SF) 增强高强轻骨料混凝土 (HLAC) 外,钢纤维增强高强轻骨料混凝土 (SFHLAC) 的力学强度和韧性指标均随着钢纤维体积分数的增大而增大。相同体积分数的微型型钢纤维 (M-SF)、端勾型钢纤维 (H-SF)、C-SF 对 HLAC 的抗剪、劈裂抗拉、抗折和抗压强度的增强效果依次递减。

(2)钢纤维体积分数为 $0.5\% \sim 2.0\%$ 时, M-SF 对 HLAC 的增强增韧效果最好; H-SF 对 HLAC 抗

折强度与 M-SF 具有相近的提高效果,但对 HLAC 的其他力学强度和韧性的提高效果不如 M-SF; C-SF 对 HLAC 的增强增韧效果均较差,尤其对其抗压和抗折强度基本没有影响。

(3)综合考虑拌和物的工作性能、SFHLAC 的力学和韧性特性, M-SF 的建议体积分数为 $0.5\% \sim 1.0\%$, H-SF 的建议体积分数为 $1.0\% \sim 1.5\%$; C-SF 的建议体积分数为 $1.0\% \sim 1.5\%$, 增韧时不推荐参加 C-SF。

参考文献:

- [1] 赵国藩. 混凝土及其增强材料的发展与应用[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(1): 8-13.
ZHAO Guofan. Development and application of concrete and its reinforcing materials [J]. Journal of Building Materials, 2000, 3(1): 8-13. (in Chinese)
- [2] 叶列平, 孙海林, 陆新征, 等. 高强轻骨料混凝土结构性能、分析与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
YE Lieping, SUN Hailin, LU Xinzhen, et al. High-strength lightweight aggregate concrete structure-performance, analysis and calculation [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [3] CAMPIONE G, MIRAGLIA N, PAPIA M. Mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight concrete with pumice stone or expanded clay aggregates [J]. Materials Construction, 2001, 34(4): 201-210.
- [4] MA H L, CUI C, LI X, et al. Study on mechanical properties of steel fiber reinforced autoclaved lightweight shell aggregate concrete [J]. Materials & Design, 2013, 52: 565-571.
- [5] 刘汉勇, 王立成, 宋玉普, 等. 钢纤维高强轻骨料混凝土力学性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 110-117.
LIU Hanyong, WANG Licheng, SONG Yupu, et al. Experimental study on mechanical properties of steel fiber high strength lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 110-117. (in Chinese)
- [6] 朱海堂, 高丹盈, 汤寄予. 钢纤维高强混凝土的强度指标及其相互关系 [J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 323-327.
ZHU Haitang, GAO Danying, TANG Jiyu. Strength index and correlation of steel fiber high strength concrete [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 323-327. (in Chinese)
- [7] 李京军, 牛建刚, 刘宏振, 等. 钢纤维轻骨料混凝土韧性指标评价方法对比 [J]. 建筑结构学报, 2016, 46(2): 39-42.
LI Jingjun, NIU Jiangang, LIU Hongzhen, et al. Comparative study of evaluation methods for toughness index in steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Building Structure, 2016, 46(2): 39-42. (in Chinese)
- [8] 董祥, 高建明, 吉伯海. 纤维增强高性能轻骨料混凝土的力学性能研究 [J]. 工业建筑, 2005(增刊 1): 680-683, 662.
DONG Xiang, GAO Jianming, JI Bohai. Study on mechanical properties of fiber reinforced high performance lightweight aggregate concrete [J]. Industrial Construction, 2005 (Suppl

- 1):680-683,662. (in Chinese)
- [9] 王海涛,王立成.钢纤维改善轻骨料混凝土力学性能的试验研究[J].建筑材料学报,2007,10(2):188-194.
WANG Haitao, WANG Licheng. Experimental study on mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(2): 188-194. (in Chinese)
- [10] 汤寄予,高丹盈,朱海堂,等.钢纤维对高强混凝土弯曲性能影响的试验研究[J].建筑材料学报,2010,13(1):85-89.
TANG Jiyu, GAO Danying, ZHU Haitang, et al. Experimental study on the effect of steel fiber on the bending property of high strength concrete[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1):85-89. (in Chinese)
- [11] 秦鸿根,刘斯凤,孙伟,等.钢纤维掺量和类型对混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2003,6(4):364-368.
QIN Honggen, LIU Sifeng, SUN Wei, et al. Effect of steel fiber content and type on concrete properties[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(4):364-368. (in Chinese)
- [12] 李平江,刘巽伯.高强页岩陶粒混凝土的基本力学性能[J].建筑材料学报,2004,7(1):113-116.
LI Pingjiang, LIU Xunbo. Basic mechanical properties of high strength shale ceramsite concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(1):113-116. (in Chinese)
- [13] 高丹盈,朱海堂,汤寄予.钢纤维高强混凝土的抗剪强度[J].硅酸盐学报,2005,33(1):82-86.
GAO Danying, ZHU Haitang, TANG Jiyu. Shear strength of steel fiber high strength concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(1):82-86. (in Chinese)
-
- (上接第 62 页)
- [19] 裴景成,范陆薇,谢浩.云南龙陵黄龙玉的振动光谱及 XRD 光谱表征[J].光谱学与光谱分析,2014,34(12):3411-3414.
PEI Jingcheng, FAN Luwei, XIE hao. Study on the vibrational spectra and XRD characters of huanglong jade from Longling County, Yunnan Province [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(12):3411-3414. (in Chinese)
- [20] ZHAO D W, ZHANG Z T, LIU L L, et al. Investigation on slag fiber characteristics: Mechanical property and anti-corrosion performance [J]. Ceramics International, 2015, 41 (4): 5677-5687.
- [21] 刘磊.常压低温等离子体沉积多孔硅纳米颗粒薄膜的过程研究[D].上海:东华大学,2010.
LIU Lei. The process of porous silicon-based nanoparticulate thin film by atmospheric plasma enhanced vapor deposition [D]. Shanghai: Donghua University, 2010. (in Chinese)
- [22] 王广建.玄武岩纤维复合过滤材料的研究[D].天津:河北工业大学,2004.
WANG Guangjian. Study on basalt fiber composite filtration materials[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [23] BASHIR S T, YANG L, LIGGAT J J, et al. Kinetics of dissolution of glass fibre in hot alkaline solution[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(3):1710-1722.
- [24] ZINCK P, PAY M F, REZAKHANLOU R, et al. Mechanical characterization of glass fibers as an indirect analysis of the effect of surface treatment [J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(9):2121-2133.
- [25] RYBIN V A, UTKIN A V, BAKLANOVA N I. Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 53:1-8.
- [26] FÖRSTER T, SCHEFFLER C, MÄDER E, et al. Dissolution behaviour of model basalt fibers studied by surface analysis methods[J]. Applied Surface Science, 2014, 322:78-84.
- [27] KHAWAM A, FLANAGAN D R. Solid-state kinetic models: basics and mathematical fundamentals[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(35):17315-17328.
- [28] SHAH S P, DANIEL J I, LUDIRDJA D. Toughness of glass fiber reinforced concrete panels subjected to accelerated aging [J]. PCI Journal, 1987, 32(5):82-99.