

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.099



# 塑钢纤维轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究

牛建刚, 梁剑, 焦孟友

(内蒙古科技大学 土木工程学院, 包头 014010)

**摘要:** 试验制作了塑钢纤维掺量分别为 0、3、6、9 kg/m<sup>3</sup> 的 4 根轻骨料混凝土梁, 研究塑钢纤维对轻骨料混凝土梁受弯性能的影响。结果表明: 塑钢纤维有效地延缓了梁裂缝的发展, 减小了最大裂缝宽度, 使裂缝变得多而密; 梁的开裂弯矩和极限弯矩随塑钢纤维掺量的增加均得到不同程度的提高, LC-9 梁的开裂弯矩和极限弯矩相较于 LC-0 梁分别提高了 72% 和 8.43%; 纤维掺量增加, 梁的屈服挠度减小, 极限挠度增大, 挠度延性系数  $\mu_f$  增大, 最大提高了 92.23%; 塑钢纤维使梁的相对受压区高度略微增大, 持荷能力提高, 降低了受拉钢筋应变, 延缓了钢筋的屈服时间。

**关键词:** 塑钢纤维; 轻骨料混凝土; 受弯性能; 延性

中图分类号: TU528.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)05-0092-07

## Experimental study on flexural behavior of plastic steel fiber lightweight aggregate concrete beams

Niu Jiangan, Liang Jian, Jiao Mengyou

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, P. R. China)

**Abstract:** Four lightweight aggregate concrete beams with plastic steel fiber content of 0 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup>, 6 kg/m<sup>3</sup>, 9 kg/m<sup>3</sup> were produced, to study the effect of plastic steel fiber on the flexural properties of lightweight aggregate concrete beams. The results show that plastic steel fiber effectively delay the development of beam cracks and reduce the maximum crack width and make the cracks much denser. The cracking moment and the ultimate moment increase with the proportion of plastic steel fiber, the cracking moment and ultimate moment of the LC-9 beam are increased by 72% and 8.43%, respectively, compared with the LC-0 beam. With the fiber content increases, the yield deflection of the beam increases and the ultimate deflection increases. Meanwhile the deflection ductility coefficient  $\mu_f$  increases, with a maximum increase of 92.23%. The plastic steel fiber reduces the height of the relative compression zone of the beam, the load-holding capacity is improved, and the strain of steel bar is reduced, and the yield time of the steel bar is delayed.

**Keywords:** plastic steel fiber; lightweight aggregate concrete; flexural behavior; ductility

收稿日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(51368042); 内蒙古自治区青年科技英才支持计划(No. NJYT-18-A06)

作者简介: 牛建刚(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构及混凝土结构耐久性研究, E-mail: niujiangan@imust.edu.cn.

Received: 2018-12-25

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(No. 51368042); Program for Young Talents of Science and Technology in Universities of Inner Mongolia Autonomous Region(NJYT-18-A06)

**Author brief:** Niu Jiangan (1976-), professor, doctor, main research interests: concrete structure and durability of concrete structure, E-mail: niujiangan@imust.edu.cn.

轻骨料混凝土具有轻质、高强等特点<sup>[1-2]</sup>,被普遍用于高层、大跨等实际工程中<sup>[3]</sup>。塑钢纤维密度小、耐腐蚀,作为增强材料能够显著改良轻骨料混凝土过脆、韧性差等缺点<sup>[4-5]</sup>。将两者结合,即得到性能更加优良的塑钢纤维轻骨料混凝土<sup>[6-7]</sup>。

近几年,纤维混凝土梁发展较为迅速,学者们对其进行了大量的抗弯性能试验研究。研究发现,钢纤维的掺入能够明显提高钢筋混凝土梁的开裂荷载、极限荷载,减小钢筋应变,增加梁的抗弯刚度和延性,延缓裂缝发展,降低梁的最大裂缝宽度<sup>[8-11]</sup>。同时,钢纤维自身的缺点也较为突出,在混凝土中易生锈腐蚀,导致其增强作用得不到体现。在对合成纤维混凝土梁受弯性能进行研究时发现,合成纤维的掺入同样可提高梁的开裂荷载、极限荷载,增加梁延性,改善轻骨料混凝土梁加载后期挠度增长过快的现象<sup>[12-14]</sup>。但目前对合成纤维混凝土梁抗弯性能试验的研究相对较少,且所用的合成纤维都很细,导致合成纤维本身的增强增韧效果得不到充分体现。

本文采用的塑钢纤维为聚丙烯粗纤维,可避免纤维过细而造成纤维与混凝土粘结不足、易被抽出、易断等缺陷。通过控制纤维掺量进行塑钢轻骨料混凝土梁的抗弯性能试验,分析其受弯性能,为在实际工程中的应用提供相应的依据。

## 1 试验内容

### 1.1 试验材料

水泥采用内蒙古蒙西水泥股份有限公司生产的P·O 42.5级普通硅酸盐水泥;细骨料选用包头本地河砂,骨料颗粒级配合格,经冲洗后含泥量为2.7%,细度模数为2.94,堆积密度为1 575 kg/m<sup>3</sup>;塑钢纤维选用宁波大成新材料股份有限公司生产的塑钢纤维(高性能改性聚丙烯粗纤维),该纤维呈波浪形,其性能参数如表1所示;粗骨料为宜昌宝珠陶粒开发有限责任公司生产的连续级配烧结圆球型页岩陶粒,陶粒的性能指标如表2所示;减水剂采用聚羧酸减水剂;钢筋为包钢生产的HPB300光圆钢筋和HRB400级月牙肋钢筋,具体参数见表3;水为普通自来水。

表1 塑钢纤维性能参数

Table 1 Performance parameters of plastic steel fiber

长度/mm	直径/mm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa
30	0.8	0.95	530

表2 陶粒性能指标

Table 2 Performance metrics of Ceramsite

类型	尺寸/mm	表观密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	筒压强 度/MPa	吸水率 (1h)/%
烧结页岩陶粒	5~20	1 415	789	8.5	5.3

表3 钢筋的物理性能

Table 3 Physical properties of steel bars

钢筋型号	直径 d/mm	屈服强度 f <sub>y</sub> /MPa	极限强度 f <sub>u</sub> /MPa	弹性模量 E <sub>s</sub> /MPa
HPB300	6	344	463	2.1×10 <sup>5</sup>
HPB300	8	349	485	2.1×10 <sup>5</sup>
HRB400	16	427	597	2.0×10 <sup>5</sup>

### 1.2 配合比及混凝土强度

混凝土初步配合比设计由松散体积法确定,再通过试配确定最终配合比,如表4所示。

在浇注混凝土时,每根梁试件预留了6个150 mm×150 mm×150 mm的标准立方体试块,与梁试件在相同条件下养护,其实测立方体抗压强度平均值如表5所示。

表4 轻骨料混凝土配合比

Table 4 Mix proportion of lightweight aggregate concrete

设计强度等级	水/ (kN·m <sup>-3</sup> )	水泥/ (kN·m <sup>-3</sup> )	砂/ (kN·m <sup>-3</sup> )	轻骨料/ (kN·m <sup>-3</sup> )	减水剂/ %
LC30	150	380	686	634	1

表5 立方体试块平均抗压强度

Table 5 Average compressive strength of concrete cube

类型	LC-0	LC-3	LC-6	LC-9
抗压强度/MPa	36.1	39.4	38.7	38.1

### 1.3 试件设计

试验设计了4根轻骨料混凝土梁,长度为2 100 mm,截面尺寸为150 mm×300 mm。其一为素轻骨料混凝土梁,编号LC-0,其余3个均为塑钢纤维轻骨料混凝土梁,编号分别为LC-3、LC-6、LC-9,即纤维掺量分别为3、6、9 kg/m<sup>3</sup>。试验所有试件配筋形式相同,受拉纵筋为2 $\Phi$ 16,架立筋为2 $\Phi$ 8(不贯通);箍筋为 $\Phi$ 6@120,保护层厚度为20 mm。具体配筋如图1所示。

### 1.4 加载及测试方案

1.4.1 测试方案 在每根纵向受拉钢筋的中点位

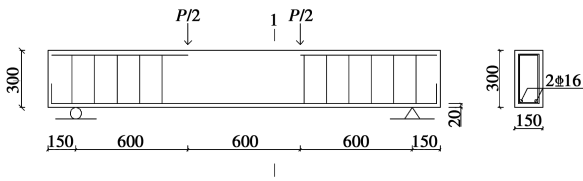


图1 试件配筋图

Fig. 1 Specimen dimension and details of bars

置粘贴型号为 BX12-10AA 的钢筋应变片,在梁跨中侧面位置沿梁高度等距离粘贴 5 片标距为 80 mm 的型号为 BX120-80AA 的混凝土应变片。在跨中位置各布置位移计,以测量跨中挠度;在两端支座放置对称位移计以测量支座位移,从而消除支座沉降误差,具体如图 2 所示。

1.4.2 加载装置与制度 试验采用三分点集中加载,加载装置如图 2 所示。加载制度按照《混凝土结构试验方法标准》<sup>[15]</sup>中的规定进行分级加载。

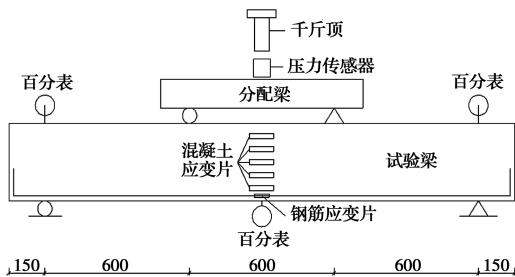


图2 试验加载装置

Fig. 2 Test setup

## 2 试验结果

### 2.1 试验现象及破坏特征

当荷载较小时,未掺加塑钢纤维的轻骨料混凝土梁,未发生明显变化。当荷载到达 25 kN 左右时,梁跨中底部出现第 1 条裂缝,紧接着在两加载点位置的梁底也出现裂缝。荷载持续增加,两加载点之间纯弯区段内裂缝不断增加且延伸,但裂缝宽度扩展不明显。当荷载达到 80 kN 左右时,纯弯段内裂缝不再增加,而弯剪区开始出现斜裂缝,延伸较为迅速。荷载继续增加,当受拉纵向钢筋屈服时,梁挠度增大,纯弯段内裂缝迅速发展,形成 1~2 条明显裂缝,裂缝最大宽度为 0.35 mm,且裂缝高度均超过梁高的 2/3,同时,上部受压区混凝土出现多条水平细小裂缝,并伴随着“砰砰”的响声;当到达极限荷载后,荷载不再增加,挠度继续增大,压区混凝土被压碎,试件破坏,为典型的适筋梁破坏,其破坏形态如图 3(a)所示。

其他 3 根塑钢纤维轻骨料混凝土梁破坏过程相似,以 LC-9 梁为例说明其破坏过程。当荷载较小时,梁未发生明显变化。荷载增加至 43 kN 时,在跨中底部出现第 1 条竖向裂缝。荷载持续增加,纯弯段内裂缝增多。在荷载达到 85 kN 左右时,纯弯段裂缝发展停滞,弯剪区裂缝出现,并向着加载点方向延伸。钢筋屈服时,梁挠度增大,纯弯段内裂缝迅速发展,形成 3~4 条明显裂缝,裂缝最大宽度为 0.26 mm,裂缝高度均超过梁高的 2/3。压区混凝土出现裂缝、突起,裂缝处有乱向的纤维分布,部分纤维已被拉断,并伴随纤维被拉断的响声。当达到极限荷载后,荷载不再增加,挠度增大,受压区混凝土被压碎,试件破坏,为适筋破坏,其破坏形态如图 3(d)所示。

对比试验现象发现,随着塑钢纤维掺量的增加,各梁的开裂荷载增大,其中,LC-3、LC-6 和 LC-9 梁的开裂荷载分别为 30、34、43 kN,这主要是因为,塑钢纤维的掺入提高了混凝土的抗拉强度,在 0~9 kg/m<sup>3</sup> 的纤维掺量范围内,掺量越多,混凝土抗拉强度提高越大,所以,试验梁的开裂荷载随纤维掺量的增加而增大。图 3 为各梁裂缝图,LC-0 梁裂缝较为稀疏,在加载过程中发展较快,破坏时裂缝间距较大,压区混凝土被压碎,呈粉块状脱落。而其他 3 根梁在加载过程中,随着纤维掺量的增加,裂缝发展逐渐变得缓慢,裂缝条数增多,间距变小,最大裂缝宽度减小。这主要是因为:纤维在梁内的乱向分布,起到了桥接混凝土的作用,抑制了裂缝的发展;在 0~9 kg/m<sup>3</sup> 的纤维掺量范围内,掺量越多,纤维的桥接作用越明显。压区混凝土呈块状突起状态,且各块状混凝土之间有纤维连接,未发生明显崩落现象。4 根梁整体破坏时,受拉纵向钢筋均屈服,压区混凝土被压碎,破坏前有明显预兆。

### 2.2 M-f 曲线

各试验梁的弯矩-挠度( $M-f$ )曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,4 根试验梁  $M-f$  曲线总体发展趋势相似,均可分为 3 个阶段。第一阶段为弹性阶段,荷载较小时,挠度随弯矩增长呈线性变化,4 根试验梁的初始刚度基本一致,挠度变化基本相同。当受拉区边缘混凝土达到其极限拉应变时,梁出现裂缝,进入带裂缝工作阶段, $M-f$  曲线出现转折点,且转折点位置随塑钢纤维掺量的增加而提高(图 4 附有转折点处详图),说明塑钢纤维提高了轻骨料混凝土梁

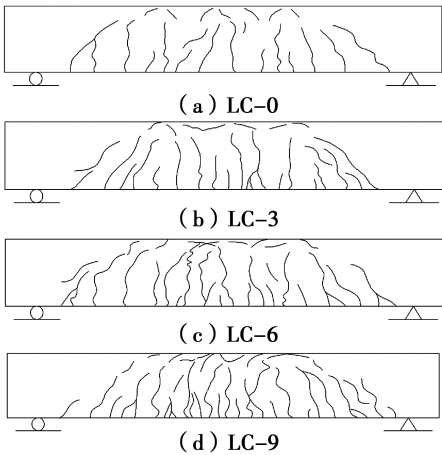


图 3 梁的破坏形态

Fig. 3 Failure mode of beams

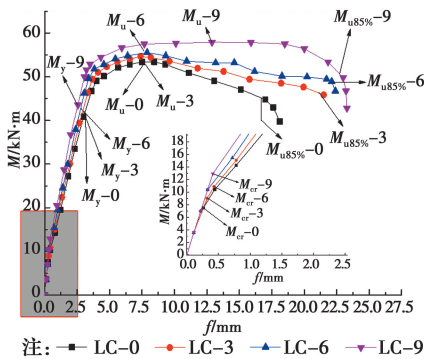


图 4  $M-f$  曲线图

Fig. 4  $M-f$  curves of beams

的开裂弯矩。之后挠度开始呈非线性增长,曲线斜率减小,梁刚度减小。虽然此阶段各条曲线走势大致相同,但差异开始突显,随着纤维掺量的增加,梁刚度增大,挠度减小。当受拉纵向钢筋达到屈服时,梁进入破坏阶段。受拉纵向钢筋屈服后,各梁挠度并没有表现出骤然的增加,而是同前一阶段挠度发展速度相仿,但随着弯矩的不断增大,各梁的刚度开始急剧下降,挠度急剧增大。其中,LC-0 梁在受拉钢筋屈服后,迅速达到峰值弯矩值,之后弯矩以较快的速度下降,挠度明显增加。而其他 3 根梁弯矩峰值均略大于 LC-0 梁,纤维掺量增加,持荷能力和变形能力也略有增大,这主要是因为是在加载过程中,梁的相对受压区高度随纤维掺量的增加而略微减小(图 6 可直接看出),使内力臂略微增大,从而提高了梁的峰值弯矩。

### 2.3 梁的开裂弯矩、峰值弯矩和延性

表 6 给出了各根梁的开裂弯矩、峰值弯矩(文中所说的弯矩均为梁跨中弯矩,其值为  $M=(P/2) \times 0.6$ )及屈服挠度、峰值挠度、下降至 85% 峰值弯矩

对应的挠度(若试验结束时弯矩未下降至峰值的 85%,取实验结束时的挠度值)和挠度延性系数,其中,挠度延性系数  $\mu_f$  用来表征梁的延性,而挠度延性系数  $\mu_f$  为梁下降至峰值弯矩的 85% 时所对应的挠度  $\Delta_u$  与屈服挠度  $\Delta_y$  的比值。

表 6 梁的特征荷载及挠度

Table 6 Characteristic load and deflection of beams

类型	开裂弯矩 $M_{cr}/$ (kN·m)	屈服弯矩 $M_y/$ (kN·m)	峰值弯矩 $M_u/$ (kN·m)	屈服挠度 $\Delta_y/$ mm	峰值挠度 $\Delta_u/$ mm	85% 峰值 弯矩对应 挠度/mm	$\mu_f$
LC-0	7.5	42.3	53.4	3.51	7.39	16.57	4.72
LC-3	9.0	43.5	54.6	3.05	8.20	21.37	7.01
LC-6	10.2	44.2	55.5	2.52	7.89	22.31	8.85
LC-9	12.9	44.6	57.9	2.35	12.63	23.22	9.88

由表 6 可知:1)轻骨料混凝土梁的开裂弯矩随塑钢纤维掺量的增加而提高,LC-3、LC-6 和 LC-9 梁的开裂弯矩较 LC-0 梁分别提高了 20%、36% 和 72%,说明塑钢纤维对轻骨料混凝土梁起到了很好的阻裂作用。2)各梁的峰值弯矩值随着纤维掺量的增加而略有增大,LC-3、LC-6 和 LC-9 梁分别比 LC-0 提高 2.25%、3.93% 和 8.43%。

同时,从表 6 也可看出,随着塑钢纤维掺量的增加,梁的屈服挠度减小,而极限挠度增大;挠度延性系数  $\mu_f$  随着塑钢纤维掺量的增加而增大,即 LC-3、LC-6 和 LC-9 梁分别比 LC-0 梁的挠度延性系数提高了 48.52%、87.5% 和 109.32%,说明塑钢纤维对梁延性的提高作用显著。

### 2.4 跨中截面应变分布及 $M-\xi$ 曲线

图 5 为梁跨中截面混凝土表面应变沿截面高度分布图。明显看出,试验梁混凝土表面在各级弯矩作用下应变沿截面高度的分布基本符合平截面假定,其中,当梁达到峰值弯矩时,混凝土应变也符合平截面假定。图中部分曲线缺失,是由于应变片受到破坏。

图 5 中,由各梁跨中截面混凝土表面应变沿截面高度分布的情况,得出各梁在不同弯矩等级情况下的相对受压区高度  $x$ ,由公式  $\xi=x/h_0$ ,得出各梁的弯矩-截面相对受压区高度曲线( $M-\xi$ ),如图 6 所示。

由图 6 可看出,加载过程中,各梁受压区高度变化过程基本相似,大致可分为 3 个阶段。加载开始时,各梁中和轴保持在截面物理形心位置处, $\xi$  值略

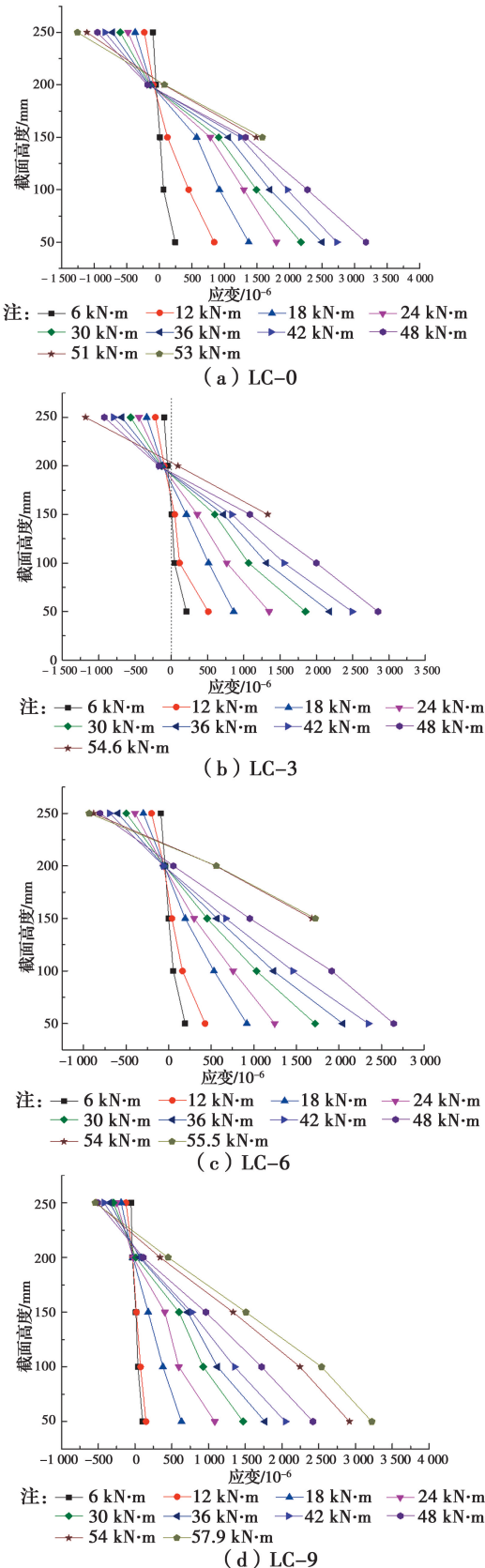


图 5 混凝土应变沿截面高度分布

Fig. 5 Strain distribution along mid-span section of beams

大于 0.5, 因为将梁放在支座上之前, 混凝土应变片已粘贴完成, 在梁的自重作用下产生应力, 截面形成

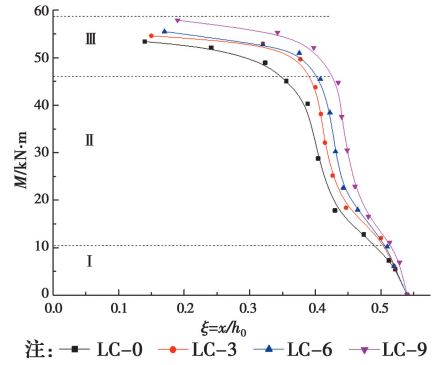


图 6  $M-\xi$  曲线

Fig. 6  $M-\xi$  curves of beams

了拉、压区, 因为受拉区配有受拉钢筋, 截面重心下降, 所以  $\xi$  初始值略大于 0.5。弯矩增大,  $\xi$  值开始缓慢减小, 纤维掺量增大, 中和轴略有上移。当拉区混凝土开裂后, 弯矩持续增大, LC-9 梁  $\xi$  值最大, 中和轴位置上移最小, LC-6 梁和 LC-3 梁  $\xi$  值相近, 而 LC-0 梁  $\xi$  值相比最小, 中和轴上移幅度最大, 但整体趋势中和轴在上移。弯矩继续增大, 当受拉钢筋屈服后, 裂缝显著开展,  $\xi$  值急剧减小, 中和轴迅速上移。

### 2.5 跨中弯矩-钢筋应变

试验梁跨中钢筋应变随弯矩变化曲线, 如图 7 所示。

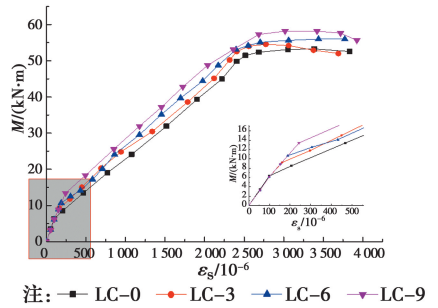


图 7  $M-\epsilon_s$  曲线图

Fig. 7  $M-\epsilon_s$  curves of beams

由图 7 可见, 4 根试验梁跨中钢筋应变总体变化趋势一致。钢筋应变随弯矩增加而增加。荷载较小时, 4 根梁钢筋应变基本相同, 呈线性增长。梁开裂后, 在应变图上为出现一折点, 曲线斜率有所减小, 且明显看出各试验梁钢筋应变转折点高度的差异。随纤维掺量的增加, 折点位置提高, 即开裂弯矩提高。在带裂缝工作阶段, 各梁钢筋的  $M-\epsilon_s$  曲线已出现明显区别, 在相同弯矩作用下, 纤维掺量越多, 钢筋的应变值越小。荷载持续增加, 当钢筋达到屈服时, 钢筋应变出现了突增现象, 同时可看出钢筋的

屈服弯矩随纤维掺量的增加而增加,之后各组梁  $M-\epsilon_s$  曲线出现第二个转折点,弯矩不再增加,钢筋应变急剧增大。

通过分析总结认为,梁开裂以后,塑钢纤维协同纵向钢筋共同工作的作用明显,有效地起到了附加筋的作用,从而减小了纵向钢筋的应变,进而也推迟了钢筋的屈服时间。

### 3 结论

1)塑钢纤维轻骨料混凝土梁在加载过程中截面应变分布基本符合平截面假定,并且都经历了弹性、带裂缝工作和破坏3个阶段,表现出适筋梁的破坏特征。塑钢纤维的掺入有效地限制了裂缝的发展,明显降低了裂缝宽度,使裂缝变得多而密。

2)塑钢纤维的掺入明显提高了梁的开裂弯矩,且纤维掺量越多,提高效果越明显;而峰值弯矩略有提高。其中,LC-9梁的开裂弯矩和峰值弯矩相较于LC-0梁分别提高了72%和8.43%。

3)纤维掺量增加,梁的屈服挠度减小,极限挠度增大,挠度延性系数  $\mu_f$  增大,LC-3、LC-6和LC-9梁的挠度延性系数分别比LC-0梁提高了26.99%、72.23%和92.23%,说明塑钢纤维对轻骨料混凝土梁的延性提升效果显著。

4)塑钢纤维协同纵向钢筋起到抗拉作用,有效地提升了梁的持荷能力,同时,减小了受拉钢筋应变,延缓了钢筋屈服时间。

### 参考文献:

- [1] BASHAR I I, ALENGARAM U J, JUMAAT M Z, et al. Engineering properties and fracture behaviour of high volume palm oil fuel ash based fibre reinforced geopolymer concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 286-297
- [2] GÜNEYISI E, GESOĞLU M, İPEK S. Effect of steel fiber addition and aspect ratio on bond strength of cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 358-365.
- [3] HASSANPOUR M, SHAFIGH P, MAHMUD H B. Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement - A review [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37(12): 452-461.
- [4] 唐巍,张广泰,董海蛟,等.纤维混凝土耐久性能的研究综述[J].材料导报,2014,28(11):123-127.

TANG W, ZHANG G T, DONG H J, et al. Review on durability of fiber concrete [J]. Material Guide, 2014, 28(6): 123-127. (in Chinese)

- [5] BEHFARNIA K, BEHRAVAN A. Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels [J]. Materials & Design, 2014, 55: 274-279.
- [6] 牛建刚,李京军,尹亚柳,等.塑钢纤维轻骨料混凝土力学性能及最佳纤维掺量试验研究[J].硅酸盐通报,2016,35(1):87-91.
- NIU J G, LI J J, YIN Y L, et al. Experimental investigation on mechanical properties and optimal fiber content in plastic steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(1): 87-91. (in Chinese)
- [7] 牛建刚,谢承斌,郝吉.冻融下预湿方式对塑钢纤维轻骨料混凝土与钢筋粘结性能的影响[J].土木建筑与环境工程,2018,40(3):66-72.
- NIU J G, XIE C B, HAO J. Bonding properties of plastic fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(3): 66-72. (in Chinese)
- [8] 宁喜亮,丁一宁.钢筋纤维自密实混凝土梁裂缝宽度试验研究[J].工程力学,2017,34(4):116-124.
- NING X L, DING Y N. Experimental research on crack width of steel fibers reinforced self-consolidating concrete beams [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4):116-123. (in Chinese)
- [9] 孙小凯,刁波,叶英华.钢筋超高性能纤维混凝土梁抗弯性能研究[J].工业建筑,2012,42(11):16-21.
- SUN X K, DIAO B, YE Y H. Flexural behavior experiments of ultra-high performance concrete beams reinforced with steel bar and hybrid-fiber [J]. Industrial Construction, 2012, 42(11): 16-21. (in Chinese)
- [10] 薛瑞,吴禹,周俊敏.不同掺量钢筋纤维自密实混凝土梁的抗弯性能有限元分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2015,40(8):68-74.
- XUE R, WU Y, ZHOU J M, et al. On flexural behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete beam of different admixture amounts with finite element analysis [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 40(8): 68-74. (in Chinese)
- [11] 宋宇婷.不同钢纤维率钢纤维再生混凝土梁的抗弯性

- 能试验研究[D]. 成都: 西华大学, 2013.
- SONG Y T. Experimental study on flexural capacity of SFRC beam with different rate of steel fiber [D]. Chengdu: Xihua University.
- [12] 周静海, 张东, 杨永生. 废弃纤维再生混凝土梁受弯性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(2): 290-296.
- ZHOU J H, ZHANG D, YANG Y S. Test study on flexural properties of waste fiber recycled concrete beams[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2013, 29(2): 290-296. (in Chinese)
- [13] 唐军务, 张琦彬, 雷霜如, 等. 轻骨料混凝土梁弯曲性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 269-273.
- TANG J W, ZHANG Q B, LEI S R, et al. Experimental research on flexural behaviors of lightweight concrete beams [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2010, 38(3): 269-273. (in Chinese)
- [14] 候雨丰. 杜拉纤维天然轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- HOU Y F. Experimental study on flexural behavior of dur-afiber natural lightweight aggregate concrete beams [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [15] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 胡玲)