

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.132

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



玄武岩纤维改性 HSCC 柱偏心受压试验研究

王钧,白雪石,薛鹤

(东北林业大学 土木工程学院,哈尔滨 150040)

摘要:为研究玄武岩纤维的加入对高强自密实混凝土长柱受力性能的改善作用,以玄武岩纤维体积掺量 0.1% 和 0.2%、长度 15 mm 和 30 mm 为参数,设计制作了 10 个长细比为 6 的高强自密实混凝土长柱,进行偏心受压试验。结果表明:玄武岩纤维的加入,可明显改善高强自密实混凝土柱偏心受压的受力性能、延性;大、小偏心受压构件开裂荷载分别提升 20.7%、11.8%,极限承载力最大增幅为 18.2%、16.7%;大、小偏心构件受压过程中,玄武岩纤维的加入使应力峰值对应的混凝土应变受到较为显著的影响,当达到大极限承载力时,最大的拉、压应变下降 25.0%、15.0%;由于玄武岩纤维的作用,大偏心受压试件达到极限承载力时,跨中最大挠度提升 7.6%,提高了构件变形能力,但纤维长度、体积掺量改变引起的挠度效应不大。

关键词:玄武岩纤维;高强自密实混凝土;柱;承载力;变形

中图分类号:TU375.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)01-0090-08

Experimental study on basalt fiber modifying HSCC columns under eccentric compression

Wang Jun, Bai Xueshi, Xue He

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, P. R. China)

Abstract: In order to study the improvement of high-strength self-compacting concrete (HSCC) slender column after adding basalt fiber, ten HSCC slender columns in a slenderness ratio of 6 were designed for eccentric compression test, based on the parameters of basalt fiber volume in 0.1% and 0.2%, length in 15mm and 30mm. The results show that the addition of basalt fiber can significantly improve the stress performance and ductility of HSCC columns under eccentric compression. The cracking load of large and small eccentric compression members is increased by 20.7% and 11.8% respectively, and the maximum increase in ultimate bearing capacity is 18.2% and 16.7% respectively. During the compression of large and small eccentric members, the addition of basalt fiber has a remarkable impact on the concrete strain corresponding to its stress peak. When the maximum ultimate bearing capacity is reached, the maximum tensile and compressive strains are reduced by 25.0% and 15.0%; when the large eccentric compression specimens reaches the ultimate bearing capacity under the action of basalt fiber, the maximum deflection in the mid-span increases by 7.6%, which improves the member's deform-ability while has no big deflection effect by the change of fiber length and volume content.

收稿日期:2019-02-21

基金项目:黑龙江省博士后科研启动基金(LBH-Q15011)

作者简介:王钧(1967-),女,教授,博士,主要从事(纤维)混凝土结构基本理论、预应力混凝土(组合)结构研究, E-mail: jun.w.619@163.com。

Received:2019-02-21

Foundation items: Post-Doctoral Initial Scientific Research Fund Project of Heilongjiang Province (No. LBH-Q15011)

Author brief: Wang Jun (1967-), professor, PhD, main research interests: (fiber) basic theory of concrete structure, prestressed concrete (combination) structure, E-mail: jun.w.619@163.com.

Keywords: basalt fiber; high-strength self-compacting concrete; columns; bearing capacity; deformation

玄武岩纤维(BF)以良好的抗拉性、耐腐蚀性、广阔的温度适用范围等优势,使其与混凝土结合可广泛应用于严寒、沿海等工作环境复杂、恶劣的建筑物中^[1-4]。在实际工程中,针对建筑物因大跨、重载和结构复杂等因素,引起的混凝土结构自重大、浇筑后振捣困难、施工不易等问题,高强自密实混凝土(HSCC)可有效发挥作用^[5-6]。将 BF 应用到 HSCC 结构中,不仅可在提高混凝土强度等级、减轻自重的同时解决振捣困难、减少噪声,还可以提高混凝土的抗裂性,提高结构耐久性^[7-9]。

实际工程中,钢筋混凝土柱常处于偏心受压受力状态,因此,开展玄武岩纤维改性 HSCC 柱偏心受压性能研究具有重要的理论意义与工程应用价值。目前,关于玄武岩纤维应用到混凝土柱的研究相对较少,王新忠等^[10-11]、侯敏等^[12]、夏海涛^[13]等分别针对配筋玄武岩纤维混凝土柱、玄武岩纤维再生混凝土柱、玄武岩纤维高强混凝土柱的受压性能展开研究。然而,以自密实、高强为特性,结合 BF 改性的 HSCC 柱偏心受力性能研究尚未见报道,基于 HSCC 的应用广泛程度,有必要作进一步探讨^[14-15]。

以玄武岩纤维的体积掺量、长度、结构柱受压的偏心距为变量,制备 BF 改性 HSCC 构件柱,进行偏心受压试验,研究 BF 的加入对配筋 HSCC 柱受力性能的改善效果,丰富 BF 改性 HSCC 的研究内容。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共设计 5 组 10 个 HSCC 长柱试件,每组两个柱分别进行偏心距为 40、120 mm 的受压试验。为探究 BF 对试件受力性能的影响,BF 体积掺量分别取 0、0.1%、0.2%,长度分别取 15、30 mm,偏心距分别取 40、120 mm。试件基本参数与编号规则分别见表 1、图 1。

表 1 试件基本参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	纤维体积掺量/%	长度/mm	初始偏心距/mm
Z1E6B0	0		120
Z2E2B0	0		40
Z3E6B1L15	0.1	15	120
Z4E2B1L15	0.1	15	40
Z5E6B2L15	0.2	15	120
Z6E2B2L15	0.2	15	40
Z7E6B1L30	0.1	30	120

续表1

试件编号	纤维体积掺量/%	长度/mm	初始偏心距/mm
Z8E2B1L30	0.1	30	40
Z9E6B2L30	0.2	30	120
Z10E2B2L30	0.2	30	40

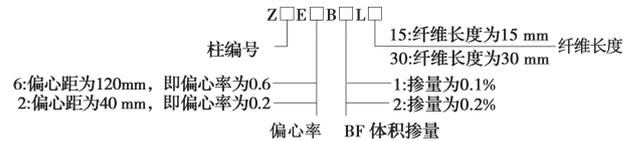


图 1 试件编号规则

Fig.1 Labeling rule of specimens

根据《金属材料拉伸试验》(GT/B 288.1—2010)测得纵筋、箍筋的屈服强度与抗拉强度如表 2。为避免柱偏心受压时发生局压破坏,于柱顶布置 4 mm 厚钢板,试件设计尺寸与配筋情况详见图 2。

表 2 钢筋力学性能

Table 2 The mechanical properties of steel bars

种类	屈服强度/ MPa	屈服强度/ 平均值/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗拉强度/ 平均值/ MPa
HRB400(C16)	406.3、409.2	407.8	544.1、550.0	547.1
HRB400(C8)	401.8、403.2	402.5	540.8、541.4	541.1

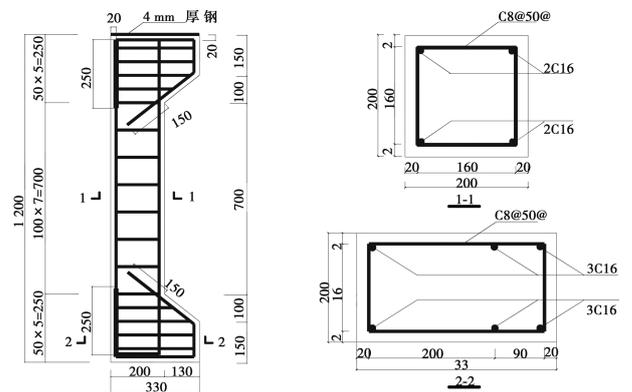


图 2 试件的配筋

Fig.2 The reinforcing bars of the specimen

1.2 试验材料及力学性能参数

根据《高强混凝土应用技术规程》(JGJ/T 281—2012)等规范,设计混凝土强度等级为 C60 高强自密实混凝土,设计配合比^[15]如表 3 所示。主要组成材料为:水泥采用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥,性能指标见表 4;细骨料选用中砂,细度模数为 2.71、表观密度为 2 530 kg/m³;粗骨料选用粒径小于 20 mm 的碎石,表观密度为 2 733 kg/m³,粒径级配为 5~

20 mm;减水剂选用聚羧酸系高效减水剂,减水率为 40%;掺合料采用 I 级粉煤灰及微硅粉;纤维选用山东聚源玄武岩纤维股份有限公司生产的短切玄武岩纤维,具体参数如表 5 所示。

表 3 混凝土基准配合比

Table 3 Benchmark mix proportion of concrete (kg · m⁻³)

水泥	硅灰	粉煤灰	砂	碎石	水	减水剂
428.5	61.2	122.4	770.3	882.2	140.0	12.2

表 4 水泥性能指标

Table 4 Performance indexes of cement

凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
175	241	21.8	42.7	4.6	7.7

表 5 玄武岩纤维物理力学性能指标

Table 5 Physical and mechanical properties of basalt fiber

纤维种类	长度/mm	直径/ μm	抗拉强度/MPa	抗拉模量/GPa
玄武岩纤维	15,30	15	3 000~4 500	85~110

浇筑混凝土前,对混凝土进行了强度值及流动性测试试验。混凝土强度值由同条件下成型养护 28 d 的 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试块按《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)测得后取平均值,扩展度依据《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)测得,结果列于表 6。

表 6 混凝土强度值及流动性指标

Table 6 Concrete strength and liquidity index

编号	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa	扩展度/mm
C60/B0	67.1,66.3,67.0	66.8	739
C60/B1L15	77.9,78.5,76.7	77.7	722
C60/B1L30	70.6,69.8,69.6	70.0	717
C60/B2L15	72.4,74.5,71.2	72.7	694
C60/B2L30	68.9,67.8,69.1	68.6	680

1.3 加载方案

试验采用人工加载千斤顶的方式。试件上、下端均放置刀口铰支座,图 3 为加载装置图。据《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—2012)进行 1~2 次预加载,荷载值为计算承载力的 10%,计算承载力按规范^[16]公式计算得到。正式加载采用分级单调加载,每级加载计算极限荷载的 10%,加载达到

极限荷载的 80%后开始缓慢加载,每级加荷减半,不同阶段的持荷时间统一按规范要求,记录各级荷载所对应的变形值及裂缝开展情况等,直至试件破坏,停止试验,获取试件实测承载力及破坏形态。

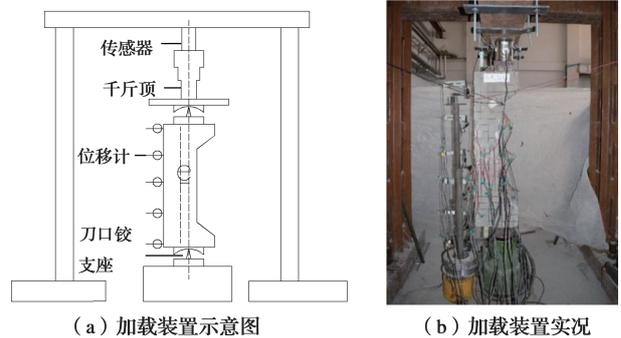


图 3 加载装置图

Fig.3 Schematic of loading apparatus

1.4 测点布置与数据采集

为分析试件受压过程中的混凝土、钢筋应变与试件侧向挠度的变化,对构件表面混凝土、内部钢筋布置应变片,其位置如图 4 所示。图 4(b)中标注的 a 侧为图 4(a)试件左视图,b 侧为图 4(a)试件右视图。所有试验数据由数据采集系统采集。

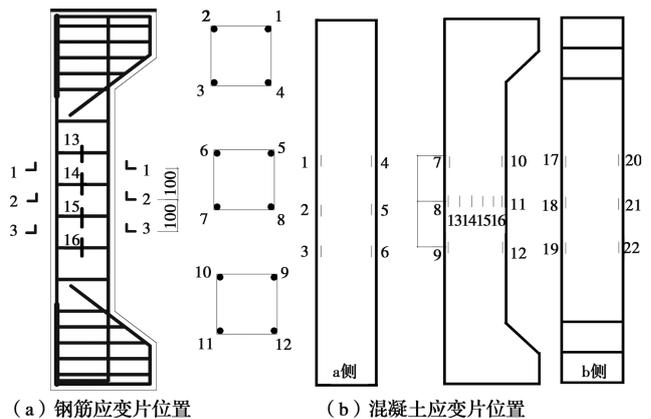


图 4 测点布置图

Fig.4 Layout of measuring points

2 试验结果与分析

2.1 试验现象与破坏形态

大偏心受压破坏的 5 个试件,其破坏形态、跨中纵向钢筋荷载-应变曲线分别如图 5(a)、图 6(a)所示。当加载接近计算承载力 20%时,柱中部 a 侧先后出现 2 条横向裂缝;随着荷载的不断增大,a 侧不断出现新裂缝的同时,旧裂缝持续向水平方向两侧延伸,直至贯通,此时,构件的侧向挠度也渐为明显,a 侧中部裂缝的宽度逐渐变大,发展为主裂缝。在受力过程中,当加载约达到极限承载力的 80%时,监测到 a 侧受拉钢筋应力达到屈服,继续加载,b 侧

混凝土被压碎。构件最终纵向钢筋的受拉应变均大于受压应变,受拉钢筋均屈服而受压钢筋应变较小,尚未达屈服。大偏心构件呈现明显的延性破坏特征。

小偏心受压破坏的 5 个试件,其破坏形态、跨中纵向钢筋荷载-应变曲线分别如图 5(b)、图 6(b)所示。在荷载增加过程中,试件的 a 侧出现较少弯曲裂缝,且裂缝发展较缓慢。当构件接近破坏时,b 侧牛腿处出现竖向裂缝,试件内部持续发出“嘶嘶”的声音。随着声音不断加急变大,受压承载力达到极

限,试件突然发出很大“砰”的响声,b 侧中部附近混凝土压碎脱落,少部分碎块崩出,破坏处呈锥体,裸露出部分箍筋与纵筋,全过程中,受拉与受压钢筋均未发生屈服,掺加纤维的小偏心构件和对照组构件都表现为脆性破坏。

2.2 荷载分析

将 10 个偏心受压柱的开裂荷载及极限承载力数据进行整理、统计,大、小偏心受压试验结果如表 7、表 8 所示。

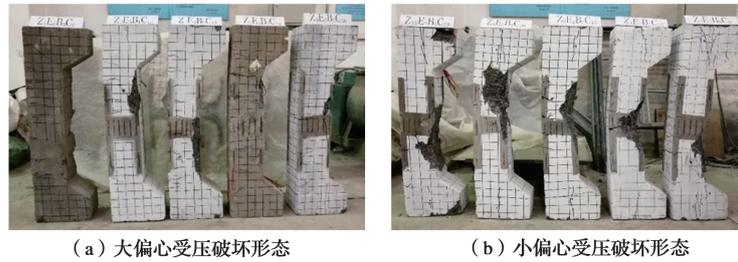


图 5 受压破坏形态

Fig.5 Failure mode of compression

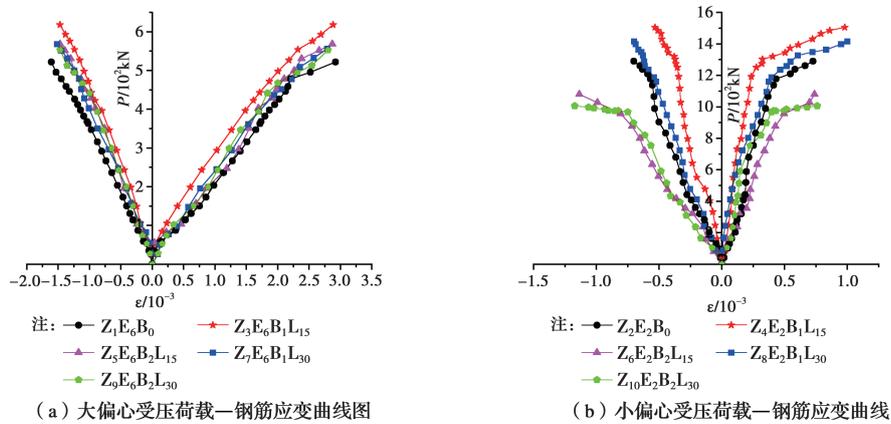


图 6 荷载钢筋应变曲线

Fig.6 Load-strain curve of the steel bar

表 7 大偏心受压试验结果

Table 7 Measured result of large eccentric compression members

试件编号	开裂荷载 P_{cr}/kN	开裂荷载提高幅度/%	极限荷载 P_u/kN	极限荷载 提高幅度/%	计算承载力 P_c/kN
Z ₁ E ₆ B ₀	87		523		419.0
Z ₃ E ₆ B ₁ L ₁₅	105	20.7	618	18.2	487.6
Z ₅ E ₆ B ₂ L ₁₅	103	18.4	568	8.6	456.3
Z ₇ E ₆ B ₁ L ₃₀	96	10.3	557	6.5	439.0
Z ₉ E ₆ B ₂ L ₃₀	101.9	17.1	553	5.7	430.4

由表 7 可以看出,玄武岩纤维的加入提高了大偏心受压 HSCC 柱的开裂荷载和极限荷载。在大偏心构件受力过程中,纤维的加入分担部分拉区混凝土应力,延缓拉区混凝土微裂缝的产生,有效推迟受拉钢筋屈服,使构件受力过程中能够承担更高的荷载,进而提高构件极限承载力。当玄武岩纤维体

积掺量为 0.1%、纤维长度为 15 mm 时, P_{cr} 、 P_u 提高幅度最大,分别为 20.7%、18.2%。

由表 8 可知,BF 体积掺量 0.1%时,可显著提升小偏心受压 HSCC 柱开裂荷载与极限承载力,当纤维长度为 15 mm 时,试验组 P_{cr} 、 P_u 值最大,较对照试件提高 11.8%、16.7%。

表 8 小偏心受压试验结果

Table 8 Measured result of small eccentric compression members

试件编号	开裂荷载 P_{cr}/kN	开裂荷载 提高幅度/%	极限荷载 P_u/kN	极限荷载 提高幅度/%	计算承载力 $P_{\bar{u}}/kN$
Z ₂ E ₂ B ₀	360		1 290		1 240.6
Z ₄ E ₂ B ₁ L ₁₅	402.6	11.8	1 505	16.7	1 405.6
Z ₆ E ₂ B ₂ L ₁₅	322	-10.6	1 079	-16.4	1 348.7
Z ₈ E ₂ B ₁ L ₃₀	390.5	8.5	1 415	9.7	1 316.9
Z ₁₀ E ₂ B ₂ L ₃₀	330	-8.3	1 006	-22.0	1 300.5

因此,对于偏心受压柱,体积掺量为 0.1%、长度为 15 mm 的玄武岩纤维参数是改性 HSCC 柱偏心受压性能的较理想参数值。BF 的加入能有效阻止 HSCC 柱偏心受压时初始裂缝产生,并延缓其增长,提高 HSCC 柱开裂后的持荷能力。

这是因为,由于适量 BF 在高强自密实混凝土中的乱向分布状态,使纤维之间呈三维无规则相互搭接方式,与周围的骨料共同作用,构成大范围的空间网状结构,使柱中钢筋骨架得到二次加强,构成新的受力骨架体系,能够承担一部分应力集中的对混凝土产

生的破坏。同时,纤维的掺入,主要提高构件抗拉性能。在应力作用下,可消耗部分能量,削弱受力过程中应力传递至柱拉区混凝土的速度与强度,从而起到改善混凝土脆性开裂的作用,延缓初始裂缝的产生。

在微裂缝出现后,纤维还可发挥桥接裂缝的作用,并使裂缝开裂路径更曲折,减慢微裂缝持续扩展的速率,提高构件开裂后达到破坏时的极限承载力。

基于表 7、表 8 试验数据,分析试件偏心受压时开裂荷载、极限荷载随参数变化的规律,结果如图 7、图 8 所示。

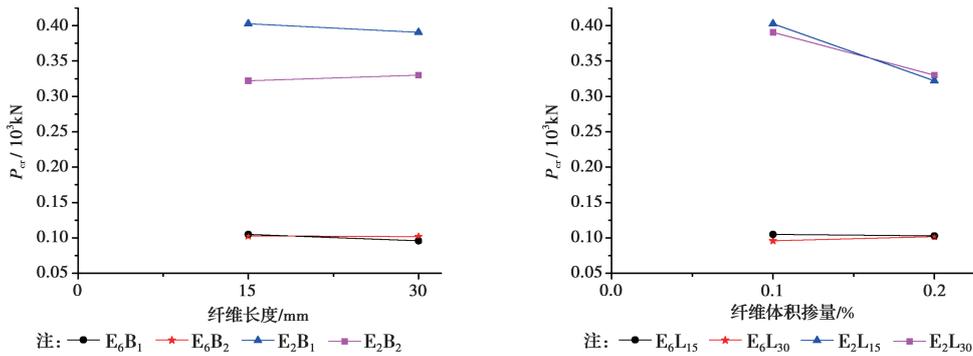


图 7 开裂荷载变化趋势图

Fig.7 Variation trend of cracking load

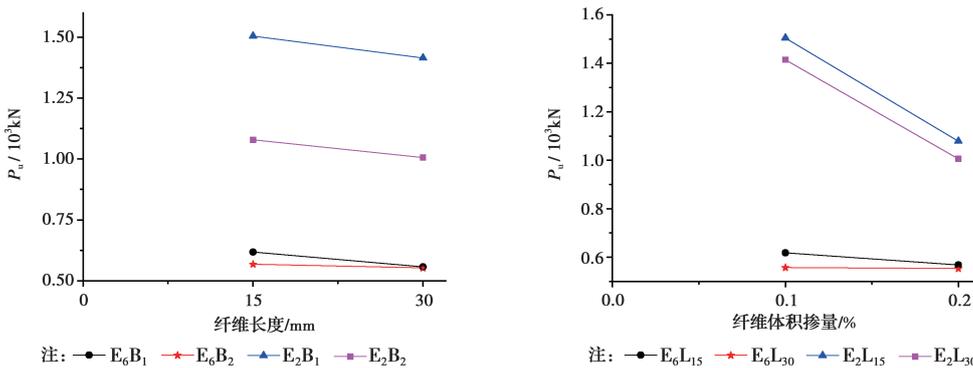


图 8 极限承载力变化趋势图

Fig.8 Variation trend of ultimate capacity

由图 7、图 8 中的曲线走向可知,随着纤维长度的增加,大偏心受压柱开裂荷载、极限荷载总体下降趋势,但较纤维体积掺量的变化,纤维长度的改变对 P_{cr} 、 P_u 实测值影响更大,纤维长度由 15 mm 增至 30 mm, P_{cr} 、 P_u 较对照组降低 10.4%、11.7%。

这是因为,当纤维体积掺量一定,长度为 30 mm 的 BF 数量是长度为 15 mm 的 1/2,致使纤维发挥桥接作用削弱。虽然,纤维体积掺量过多时,对大偏心受压构件产生降低作用,但仍未超过掺入纤维对其的增强作用,大偏心受压构件受力过程中抗拉性能起主导作用,导致纤维长度由 15 mm 增至 30 mm 时,对大偏心受压构件开裂荷载、极限承载力的改善效果降低。

对于小偏心受压试件,由图 7、图 8 中的曲线观察,当纤维长度由 15 mm 增至 30 mm 时,试件开裂荷载值、极限荷载值上下波动较小。而随纤维体积

掺量的增大,纤维对混凝土性能的影响较为明显,当玄武岩纤维长度 15 mm,体积掺量由 0.1% 增至 0.2% 时,柱开裂荷载与极限荷载呈现出 22.4%、33.1% 较大幅度下降,表明玄武岩纤维体积掺量改变对试件小偏心受压性能的作用更明显。

这是因为,当 BF 掺量为 0.2% 时,自密实性能降低,增大纤维在其中团聚风险,使得构件的内部缺陷增多。对于小偏心受压构件,当纤维掺量过高,纤维对基材性能的增强作用减弱效果进一步表现在受力过程中,致使构件韧性受到较大影响,加速其破坏过程。

2.3 混凝土荷载-应变分析

为探究加载过程中,玄武岩纤维的加入对混凝土构件应变变化的影响,分别绘制大、小偏心受压构件 a、b 侧中部拉、压区混凝土的荷载-应变曲线,如图 9 所示。其中,图 9(a)、(b) 应变数据分别选取图 4 所示 a、b 侧柱中混凝土应变片数据的平均值。

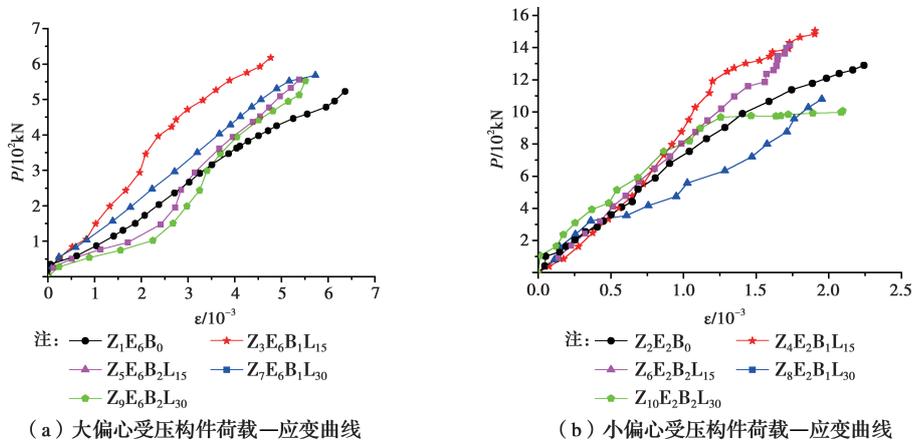


图 9 偏心受压构件荷载-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curve of eccentric compression members

从图 9 可以看出:在同级荷载受力作用下,BF 体积掺量 0.1%、长度 15 mm 的玄武岩纤维高强自密实混凝土柱大、小偏心受压下的混凝土拉、压应变均较对照组小,且在最大幅度提高极限承载力的同时,试件的最大拉、压应变可分别降低对照组的 25.0%、15.0%。

这是由于混凝土在受力过程中,内部由初始微小裂缝的产生逐渐过渡到宏观裂缝的出现并发展,部分薄弱混凝土砂浆整体被分裂,导致裂面间产生一定相对滑移,而在混凝土中掺入适量 BF,可在裂缝处增强摩阻力,并以其较高的弹性模量分担更多的承载力,提高混凝土柱极限承载力,从而降低压区混凝土产生的最大应变值。

2.4 荷载-挠度分析

为分析玄武岩纤维的加入对构件受力过程中跨中挠度变化的影响,以大偏心受压构件为例,绘制了

荷载-跨中挠度关系曲线,如图 10 所示。

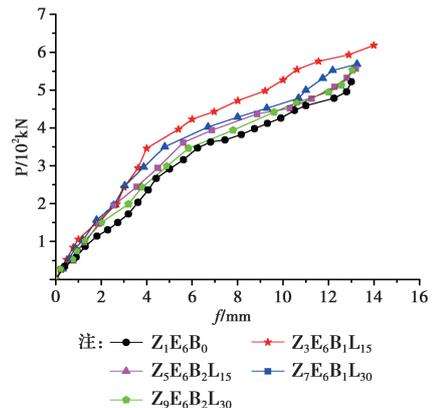


图 10 荷载-跨中挠度曲线

Fig.10 Load-Middle Span Deflection Curves

观察与分析图 10 可知,在承受相同荷载时,加入纤维的混凝土构件,构件跨中挠度值小于对照组,

达到极限承载力时,跨中最大变形增幅 7.6%。纤维的掺入可较小幅度的改善 HSCC 柱构件的变形能力。由于玄武岩纤维在拉区混凝土中发挥了较好的增韧阻裂作用,当接近极限荷载时,跨中变形虽增大,但增长幅度小于对照组构件,降低了由柱中变形的迅速增大而引起的附加弯矩值的加剧增长,从而使柱的承载力得到相应提高。

3 结论

基于玄武岩纤维改性 HSCC 柱偏心受压试验,获得不同纤维掺量、纤维长度、偏心距等参数改变时柱受力性能的试验结果,基于试验与分析获得如下结论。

1)对于偏心受压柱,体积掺量为 0.1%、长度为 15 mm 的玄武岩纤维参数是改性 HSCC 柱偏心受压性能的相对最佳值。

2)当掺入最佳参数的玄武岩纤维时,大、小偏心受压构件的开裂荷载最大增幅分别为 20.7%、11.8%,极限承载力也达到增幅最大值,分别为 18.2%、16.7%。

3)玄武岩纤维的掺入可有效分担混凝土应变,较为显著地影响大偏心受压构件拉区混凝土与小偏心受压构件压区混凝土的最大应变值,最佳掺量时可分别减小 25.0%、15.0%。

4)玄武岩纤维的掺入可在一定程度上改善混凝土柱构件的变形能力,使大偏心受压构件中部最大挠度增幅达到 7.6%,但 BF 体积掺量、长度参数的改变对挠度影响不大。

参考文献:

- [1] ZHAO Y R, WANG L, LEI Z K, et al. Study on bending damage and failure of basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 460-470.
- [2] TABATABAEI Z S, VOLZ J S, GLIHA B P, et al. Development of long carbon fiber-reinforced concrete for dynamic strengthening [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(10): 1446-1455.
- [3] ZELINKA S L, RAMMER D R. Environmental degradation of fiber-reinforced polymer fasteners in wood [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(5): 627-631.
- [4] 王钧, 马跃, 张野, 等. 短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验与分析 [J]. 工程力学, 2014, 31(Sup1): 99-102, 114.
- WANG J, MA Y, ZHANG Y, et al. Experimental research and analysis on mechanical properties of chopped basalt fiber reinforced concrete [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(Sup1): 99-102, 114. (in Chinese)
- [5] 王钧, 薛鹤, 李婷. 混杂纤维高强自密实混凝土弯曲韧性试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 88-93.
- WANG J, XUE H, LI T. Experiment on flexural toughness of high-strength self-compacting concrete with hybrid fiber [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2): 88-93. (in Chinese)
- [6] SHAFIQ N, NURUDDIN M F, SALIH A F M, et al. Characterization of stand chopped basalt fiber self-compacting reinforced concrete (SCB-SCC) [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 567: 356-361.
- [7] YANG Z S, ZHANG Y Z. Test and simulation of basalt fiber steel tubes concrete [J]. Metallurgical and Mining Industry, 2015, 12(7): 242-247.
- [8] WANG H, LI C X, ZHOU W, et al. Experimental study on the ultimate bearing capacity of long basalt fiber-reinforced concrete (BFRC)-filled steel tube columns under axial compression [J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2016, 9(5): 158-163.
- [9] DUBEY R, KUMAR P. Experimental study of the effectiveness of retrofitting RC cylindrical columns using self-compacting concrete jackets [J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 104-117.
- [10] 王新忠, 李传习. 玄武岩纤维混凝土长柱偏心受压承载能力试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(10): 3242-3246.
- WANG X Z, LI C X. Experimental study on load-carrying capacity of basalt fiber reinforced concrete long columns under eccentric compression [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(10): 3242-3246. (in Chinese)
- [11] 王新忠, 李传习, 周维. 钢筋玄武岩纤维混凝土短柱轴心受压承载能力试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 809-815.
- WANG X Z, LI C X, ZHOU W. Experimental study on load-carrying capacity of basalt fiber reinforced concrete short columns under axial compression [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(3): 809-815. (in Chinese)
- [12] 侯敏, 董江峰, 袁书成, 等. 玄武岩纤维再生混凝土及其轴压短柱力学性能分析 [J]. 华北水利水电学院学报, 2013(1): 41-45.
- HOU M, DONG J F, YUAN S C, et al. Experimental research of mechanical properties of basalt fiber aggregate concrete and its short columns under axial compression [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013(1): 41-45. (in Chinese)
- [13] 夏海涛. 高铁特大桥施工组织设计与纤维高强混凝土

- 柱的性能研究[D]. 安徽 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- XIA H T. Study on the design of high speed railway bridge construction and the performance of fiber reinforced concrete column [D]. Huainan, Anhui; Anhui University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] LU YY, LIU Z Z, LI S, et al. Axial compression behavior of hybrid fiber reinforced concrete filled steel tube stub column [J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 96-107.
- [15] 王凤池, 官爽, 孙畅, 等. 废弃玻璃细骨料钢筋混凝土柱的受压性能 [J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40 (4): 135-141.
- WANG F C, GUAN S, SUN C, et al. Compression behaviors of reinforced recycled glass fine aggregate concrete columns [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(4): 135-141. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 胡玲)