

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.06.004

混掺高延性纤维混凝土组合十字形短柱抗震性能研究

王晓伟¹, 张 薇¹, 赵恩辉², 郭永钢³, 慕 儒¹, 周 健¹, 赵灿灿¹, 刘昊奇¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津乐杰建材有限公司, 天津 300401;

3. 天津飞龙勤和混凝土有限公司, 天津 300400)

摘要:为改善钢筋混凝土十字形短柱的抗震性能,将高延性纤维混凝土用于十字形短柱底部。通过对混掺高延性纤维混凝土组合十字形短柱(R/ECC)和普通钢筋混凝土十字形对比柱(RC)进行拟静力试验,分析其裂缝开展模式、破坏形态、滞回性能、延性、耗能能力和刚度退化等,研究混掺高延性纤维混凝土对十字形短柱抗震性能的提升作用。结果表明,在十字形短柱底部采用混掺高延性纤维混凝土,可有效控制裂缝的开展,减小裂缝宽度,改善柱底混凝土的压溃剥落状态;短柱的延性和耗能能力明显提高,刚度退化缓慢,承载力有一定提高。相比 RC 柱,R/ECC 柱位移延性系数、峰值点和极限点时累积滞回耗能分别提高 7.3%、225.5% 和 44.6%,受剪承载力提高 9.5%。

关键词:十字形短柱;混掺高延性纤维混凝土;组合柱;抗震性能;拟静力试验

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)06-040-11

Seismic behavior of hybrid high ductility fiber reinforced concrete composite cross-shaped short columns

WANG Xiaowei¹, ZHANG Wei¹, ZHAO Enhui², GUO Yonggang³, MU Ru¹, ZHOU Jian¹,
ZHAO Cancan¹, LIU Haoqi¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401,

P. R. China; 2. Tianjin Lejie Building Materials Co., Ltd., Tianjin 300401, P. R. China;

3. Tianjin Feilong Qinhe Concrete Co., Ltd., Tianjin 300400, P. R. China)

Abstract: To improve the seismic behavior of the cross-shaped short column, the concrete was substituted with high ductility fiber reinforced concrete in the bottom of the cross-shaped short column. Quasi-static tests on the hybrid high ductility fiber reinforced concrete composite cross-shaped short column (R/ECC) and the reinforced concrete cross-shaped short column (RC) were carried out. The crack propagation mode, failure characteristics, hysteretic behavior, ductility, energy dissipation and stiffness degradation were compared to investigate the seismic behavior of the R/ECC column. The results show that the hybrid high ductility fiber reinforced concrete can effectively control the development of the crack, decrease the width of the crack and improve the state of collapse and spalling. The ductility and energy dissipation of the composite column are improved obviously. The

收稿日期:2022-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178199,52078180)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(52178199,52078180).

作者简介:王晓伟(1973—),女,副教授,博士,主要从事纤维混凝土材料研究,(E-mail)wangxw0424@163.com。

通信作者:慕儒,男,教授级高工,博士生导师,(E-mail)ru_mu@hotmail.com。

stiffness degradation becomes lower, and the shear capacity is improved. Compared with RC column, the displacement ductility factor, as well as the cumulative hysteretic energy dissipation at the peak and limit points of R/ECC column increased by 7.3%, 225.5% and 44.6%, respectively, and the shear capacity increased by 9.5%.

Keywords: cross-shaped short column; hybrid high ductility fiber reinforced concrete; composite columns; seismic performance; quasi-static tests

异形柱的柱肢与墙同厚,可避免室内出现棱角,室内空间布置更灵活,同时增大室内有效使用面积。异形柱结构既经济又美观,符合现代人的居住需求,具有很好的发展前景^[1-2]。异形柱截面不规则,与普通矩形柱相比,受力时柱肢混凝土更易开裂,破坏时脆性特征更明显,柱底易压溃,且异形柱通常在短柱范围,弯曲变形性能有限,延性较差,抗震性能差,限制了异形柱结构的使用。

改善异形柱结构的抗震性能,是解决异形柱结构使用受限的关键。提升异形柱抗震性能的方法主要有:1)增设暗柱^[3];2)配置交叉筋^[4];3)配置型钢^[5-8];4)采用高强钢筋^[9-11];5)加入纤维。异形柱柱肢尺寸小,配置交叉筋、密排箍筋等措施造成钢筋拥挤,影响混凝土的施工质量;使用型钢增大了结构用量;采用高强钢筋,只有在高配箍的条件下,抗震性能良好。王铁成等^[12]在异形柱柱底加入聚丙烯纤维(PP纤维)研究其对异形柱抗震性能的影响,发现加入PP纤维可推迟柱的开裂,提高异形柱的位移延性,但耗能有所下降。

传统的纤维混凝土(FRC, fiber reinforced concrete)虽在一定程度上提升了混凝土的抗裂性和延性,但在受力时,由第1条裂缝出现引起局部破坏后依然发生应变软化的张拉特性。工程水泥基复合材料(ECC, engineered cementitious composites)是一种具有高延性、良好的假应变硬化和多裂缝开展特性的乱向分布短纤维增强水泥基复合材料。聚乙烯醇纤维(PVA纤维)由于高强高弹模、亲水性好,是比较理想的增强材料,Li等^[13-14]开始将PVA纤维用于ECC,制成PVA-ECC。ECC材料具有高韧性、高耐损伤能力,改善了混凝土材料自身的脆性缺陷,调整基体材料及配合比将PVA纤维用于制备高延性纤维混凝土材料,并用于混凝土构件以改善构件的延性,提高构件的抗震性能。邓明科等^[15]以水泥、矿物掺合料和最大粒径为1.18 mm的细河砂为基体材料,日产PVA纤维为增强材料制备了高延性纤维混凝土材料,研究了高延性纤维混凝土矩形短柱的抗震性能。潘金龙等^[16]以水泥、矿物掺合料和细石英砂为基体材料,日产PVA纤维为增强材料制备了ECC,研究了ECC/RC组合矩形柱的抗震性能。潘钻峰等^[17]以水泥、矿物掺合料和平均粒径为110 μm细石英砂为基体材料,日产PVA纤维为增强材料制备了ECC,研究了3种不同剪跨比的钢筋ECC矩形柱的抗震性能。结果表明,高延性纤维混凝土材料减小了普通矩形柱的裂缝宽度,有效控制了裂缝的发展,提高了普通矩形柱的抗震性能。目前,研究成果主要是用单掺日产PVA纤维作为增强材料的高延性纤维混凝土进行矩形柱的抗震性能研究,未见高延性纤维混凝土异形柱抗震性能的深入研究。异形截面柱的受力性能不同于矩形柱,有必要对高延性纤维混凝土异形柱抗震性能进行系统研究。

文中采用粒径范围为0.2~0.4 mm的细河砂,国产和日产混掺PVA纤维制备高延性纤维混凝土,将其用于十字形短柱柱底,通过拟静力试验,对比分析混掺高延性纤维混凝土组合十字形短柱与普通钢筋混凝土十字形短柱的破坏形态、延性及耗能能力等,研究混掺高延性纤维混凝土材料对十字形短柱抗震性能的影响,为其在异形柱实际工程的应用奠定基础。

1 试验概况

1.1 十字形短柱设计

设计制作了1根混掺高延性纤维混凝土组合十字形短柱(R/ECC柱)与1根同尺寸普通钢筋混凝土十字形短柱(RC柱)。其中,R/ECC柱在柱底部(350 mm柱高范围)使用混掺高延性纤维混凝土。十字形短柱的截面尺寸及配筋如图1所示,肢高350 mm,肢厚120 mm,柱高800 mm,水平加载点至柱底

700 mm, 剪跨比为2, 试验轴压比为0.15。纵筋和箍筋均采用HRB400级钢筋, 纵筋配筋率为2.57%, 箍筋间距为60 mm, 其材性性能如表1所示。

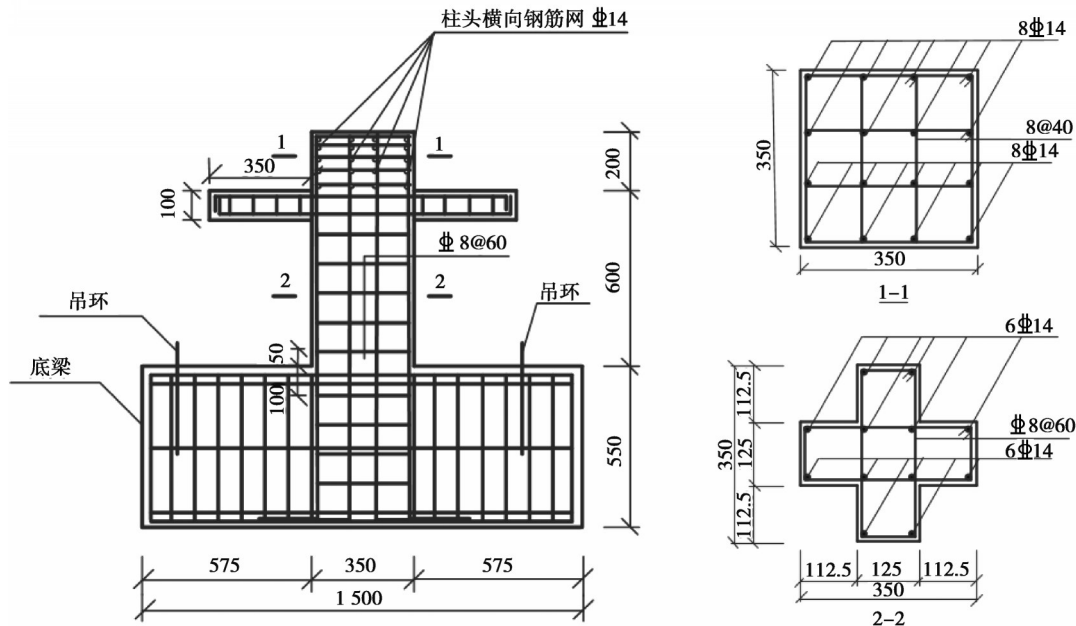


图1 十字形短柱截面尺寸及配筋

Fig. 1 Dimensions and reinforcement of cross-shaped short columns

表1 钢筋力学性能

Table 1 Mechanical properties of steels

钢筋类型	直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
HRB400	8	586.9	690.5
HRB400	14	433.2	601.8

混掺高延性纤维混凝土由水泥、粉煤灰、硅灰、砂、水、减水剂组成基体材料, PVA纤维作为增强材料。其中, 水泥采用标号等级为P·O 42.5普通硅酸盐水泥, 粉煤灰采用I级粉煤灰, 砂选用粒径范围为0.2~0.4 mm的普通细河砂, 减水剂是聚羧酸型高效减水剂, 减水率为18%。纤维选用日本可乐丽公司生产的KURALON™ K-II型PVA纤维和中国宝华林公司生产的PVA纤维, 2种纤维的体积掺量均为1%, 纤维的性能参数如表2所示。混掺高延性纤维混凝土和普通混凝土的配合比如表3所示。

表2 纤维性能参数

Table 2 Performance indicators of PVA

名称	长度/mm	直径/ μm	强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
可乐丽	12	39	1 620	42.8	6.00	1.30
宝华林	12	39	1 600	40.0	6.42	1.28

表3 基体材料配合比

Table 3 Mix proportion of matrix

材料	水泥	粉煤灰	硅灰	砂子	石子	水	PVA纤维 (日产)	PVA纤维 (国产)
混掺高延性纤维混凝土	487	730	64	461	—	359	12.8	13
混凝土	434	—	—	758	1 046	182	—	—

柱子均采用立式分段浇筑,先浇筑基础梁部分,再浇筑十字形短柱柱身部分。对于R/ECC柱,为防止柱底与基础梁接触面因材料不同分段浇筑发生粘结破坏,普通混凝土浇筑至距基础梁顶面100 mm处,待基础梁初凝后将基础梁表面凿毛处理,清除表面浮灰;然后,距柱底350 mm范围内浇筑混掺高延性纤维混凝土,用振捣棒振捣密实,静置4 h后浇筑普通混凝土至柱顶。

十字形短柱制作时,普通混凝土预留3个150 mm×150 mm×150 mm标准立方体试块,3个150 mm×150 mm×300 mm标准棱柱体试块,混掺高延性纤维混凝土预留3个100 mm×100 mm×100 mm立方体试块,3个100 mm×100 mm×300 mm棱柱体试块,6个15 mm×100 mm×350 mm平板试件,并与十字形短柱在同等条件下进行养护。实测普通混凝土立方体抗压强度为43.4 MPa,轴心抗压强度为37.3 MPa;混掺高延性纤维混凝土立方体抗压强度为50.2 MPa,轴心抗压强度为42.3 MPa。通过平板直接拉伸试验测得混掺高延性纤维混凝土极限抗拉强度为4.79 MPa,极限延伸率为0.679%,图2和图3所示分别为混掺高延性纤维混凝土平板试件受拉应力-应变曲线及其裂缝开展形态。

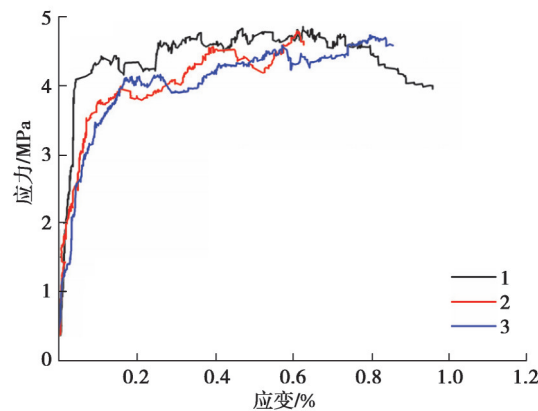


图2 混掺高延性纤维混凝土受拉应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of the hybrid high ductility fiber reinforced concrete

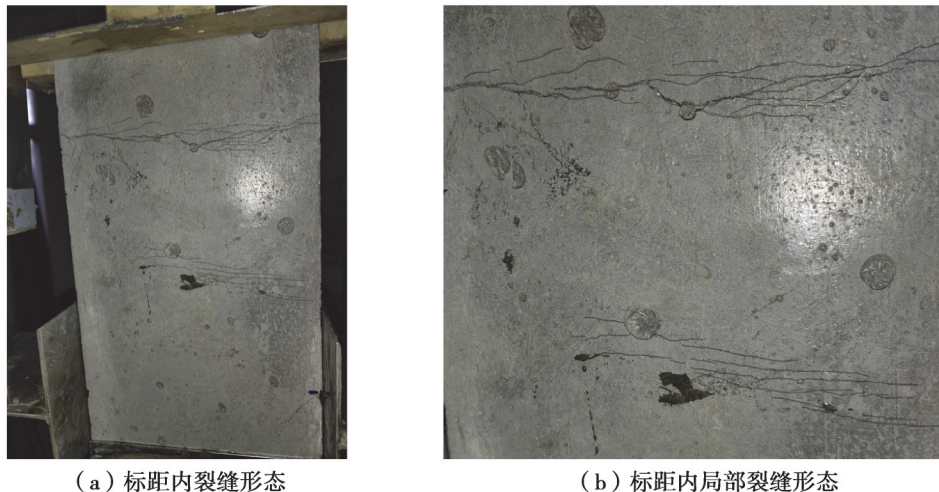


图3 混掺高延性纤维混凝土裂缝开展形态

Fig. 3 The crack pattern of the hybrid high ductility fiber reinforced concrete

1.2 加载方案

试验加载装置如图4所示,使用50 t千斤顶施加竖向轴力,50 t水平作动器施加水平作用力。为了保

证往复加载时柱顶自由滑动,在柱顶千斤顶与反力架横梁之间设置滑动支座。根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T 101—2015),试验水平加载采用力-位移混合加载。加载制度如图5所示,屈服前十字形短柱采用力控制加载,每级循环1次加载;屈服后采用位移控制加载,每级增幅为十字形短柱纵向受力钢筋屈服时对应的位移 Δ_y ,每级循环3次加载。加载至荷载下降至峰值荷载的80%时停止加载,试验结束。

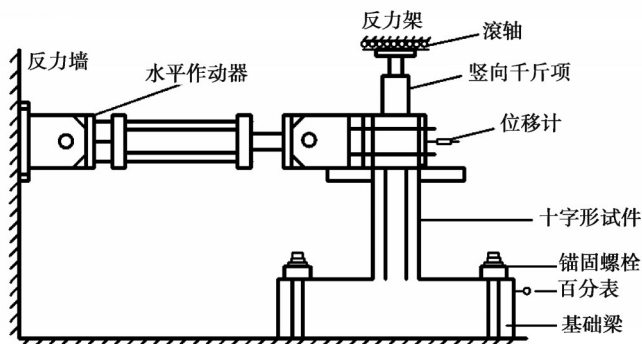


图4 拟静力试验加载装置
Fig. 4 Quasi-static test setup

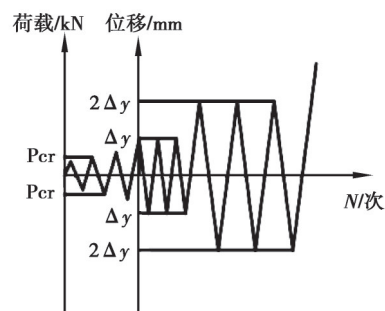
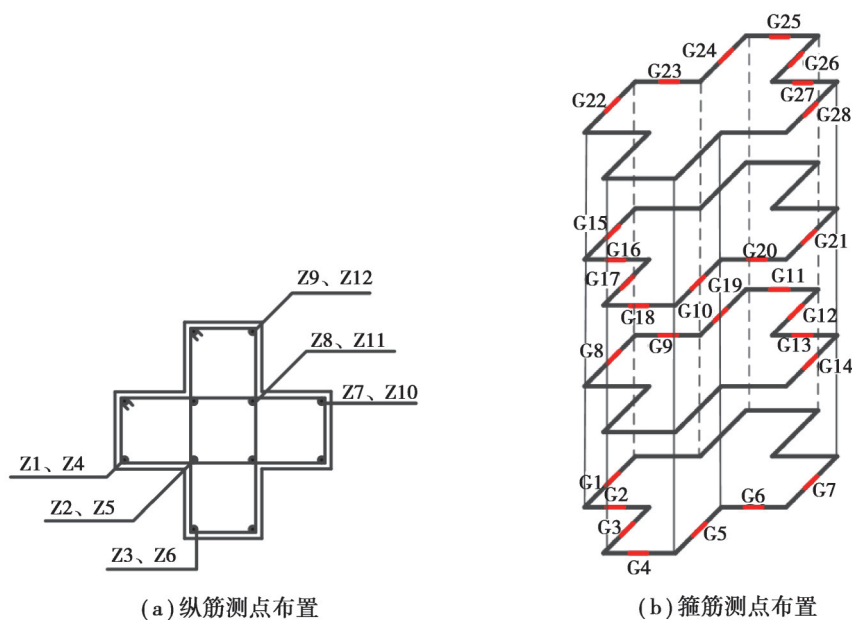


图5 加载制度
Fig. 5 Loading system

1.3 测点布置及数据采集

如图4所示,在十字形短柱顶部水平加载点中心位置布置1个位移计测十字形短柱的顶点位移,由DH3816静态应变测试系统采集位移计的数据。在底梁一侧布置百分表,试验时,人工监测底梁的水平位移。水平荷载采用DH3816静态应变测试系统通过荷载传感器进行数据采集。十字形短柱纵筋应变片布置,如图6(a)所示,分别布置在距柱底50 mm处和200 mm处。箍筋应变片从柱底向上布置于四排箍筋上,如图6(b)所示。钢筋应变片通过导线与DH3816静态应变测试系统相连,采集纵筋和箍筋的应变。



(a) 纵筋测点布置

(b) 箍筋测点布置

图6 应变片位置

Fig. 6 Arrangement of strain gauges

2 裂缝及破坏特征

2个十字形短柱均经历了初裂、裂缝发展、极限和破坏4个阶段,最终均发生弯剪破坏,破坏形态如

图7所示,对比分析2个短柱的裂缝开展及破坏形态。

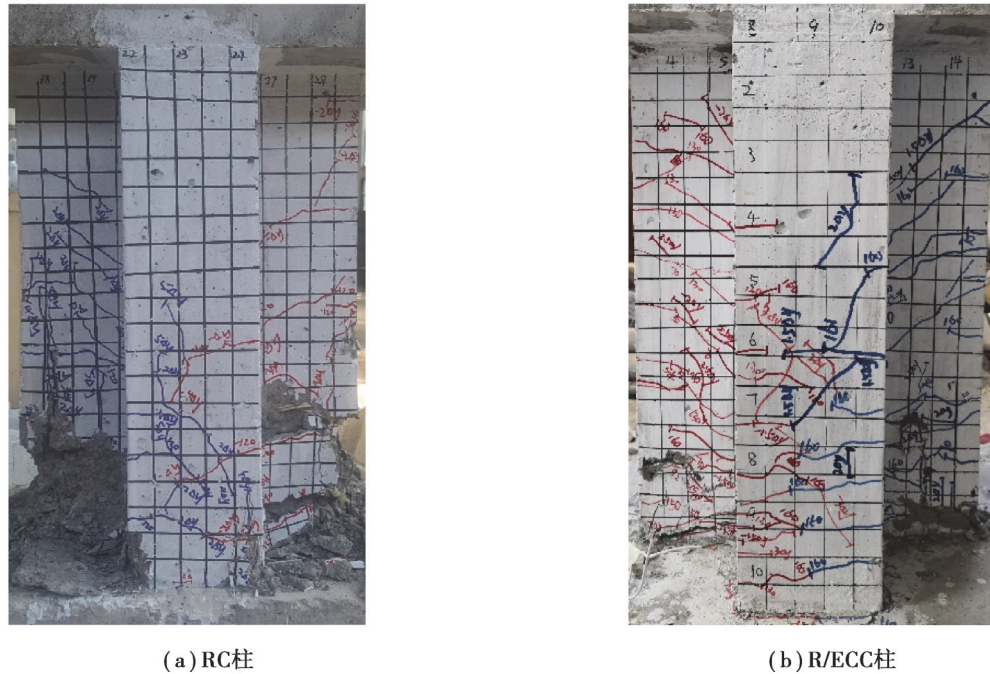


图7 十字形短柱破坏形态

Fig. 7 Failure modes of cross-shaped short columns

根据加载方向对十字形短柱的12个面进行编号,如图8所示。

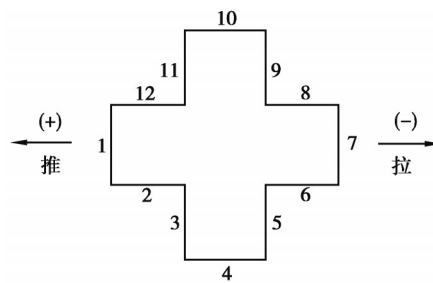


图8 十字形短柱各面编号

Fig. 8 Serial number of the cross-shaped short column surfaces

两柱裂缝开裂模式相似,均先在腹板外侧(1、7面)出现水平裂缝,随后在腹板内侧(2、6、8、12面)出现水平裂缝和斜裂缝。随着加载位移的增大,翼缘(3、4、5、9、10、11面)各面随后开始出现裂缝。

R/ECC柱与RC柱裂缝发展过程明显不同。R/ECC柱、RC柱分别加载至其峰值荷载26%、29%时,出现第1条裂缝。十字形短柱开裂后,随着荷载的增大,R/ECC柱新增裂缝较多,裂缝宽度扩展缓慢且明显小于RC柱;RC柱新增裂缝数量不多,随着荷载的增大,裂缝继续延伸扩展。R/ECC柱、RC柱分别加载至其峰值荷载的85%、78%时屈服,R/ECC柱在屈服后至峰值点这一阶段新增裂缝数量最多。峰值荷载过后,R/ECC柱翼缘外侧(4、10面)中部部分水平裂缝贯通,少量较短斜裂缝交叉,腹板外侧(1、7面)底部水平贯通裂缝宽度增大,大量纤维被拉断或拔出,有少量竖向裂缝出现,破坏时柱底部混凝土未剥落,纵筋未断裂。RC柱翼缘外侧(4、10面)剪切斜裂缝交叉并延伸,腹板外侧(1、7面)出现较多竖向裂缝,竖向裂缝与水平裂缝交错,破坏时柱底部混凝土大面积压溃和剥落,腹板一侧2根纵向受力钢筋

断裂。

R/ECC柱相比于RC柱，在低周反复荷载作用下裂缝数量多且细密，表明高延性纤维混凝土材料假应变硬化和多裂缝开展的特性，使R/ECC柱在试验过程中裂缝数量增多，裂缝宽度减小；纤维的桥联作用，有效地控制了裂缝宽度的发展，破坏时柱底混凝土仍能保持较好的完整性。

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

滞回曲线是衡量柱抗震性能的重要指标，根据试验获得的十字形短柱顶部水平荷载与水平位移绘制滞回曲线，试验百分表检测得到的基础梁水平滑移很小，采用柱顶位移计所测结果作为柱顶水平位移。十字形短柱滞回曲线如图9所示。

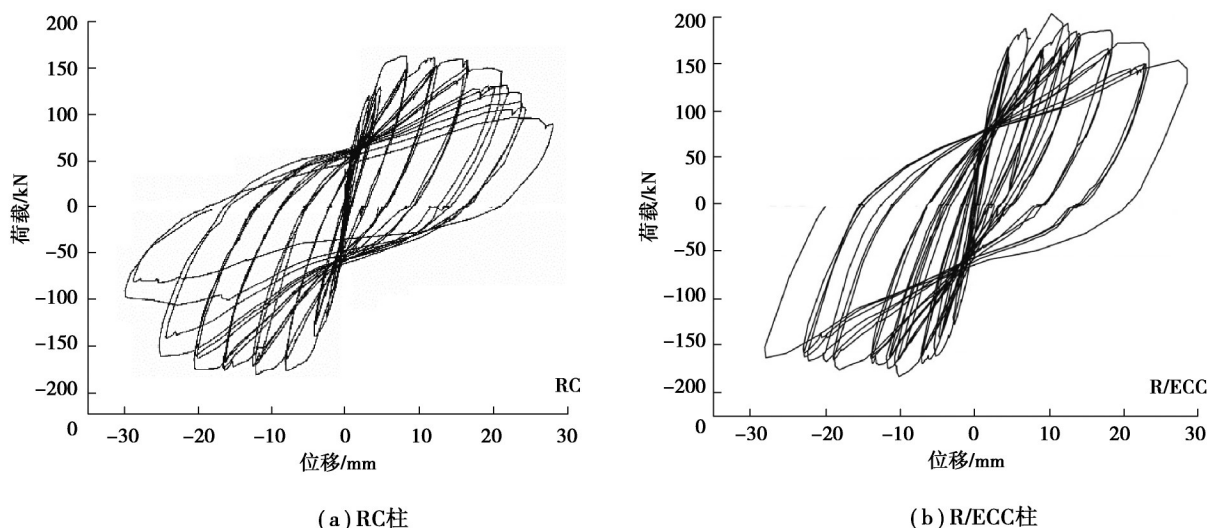


图9 十字形短柱滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic loops of cross-shaped short columns

由图9可知，在加载初期，R/ECC柱和RC柱的滞回曲线无明显差别。混凝土尚未开裂，加载曲线与卸载曲线基本重合，十字形短柱残余变形很小。十字形短柱开裂后，进入弹塑性阶段，残余变形逐渐增大，滞回环包围的面积持续增长。屈服前，两柱滞回曲线饱满程度相差不大；屈服后，R/ECC柱相比RC柱，滞回曲线更为饱满，表现出更强的耗能能力。峰值荷载过后，R/ECC柱承载力较RC柱下降缓慢，滞回环面积较大，表现出较好的滞回性能。这是由于R/ECC柱裂缝处纤维的桥联作用使得混掺高延性纤维混凝土开裂后纤维及纤维与基体之间的黏结力继续承担荷载，有效减缓了峰值荷载后承载力下降的速度。

3.2 骨架曲线和延性

通过骨架曲线的轨迹，可直观反映出柱的承载力大小和刚度退化趋势，根据骨架曲线得到其屈服位移和极限位移，十字形短柱骨架曲线如图10所示。由图可知，加载初期十字形短柱处于弹性工作阶段，两柱骨架曲线基本重合。开裂后，随着荷载的增加，骨架曲线斜率逐渐平缓，短柱刚度开始退化，R/ECC柱斜率下降比RC柱慢，强化阶段较长。R/ECC柱的承载力相较于RC柱略有提高，峰值荷载后，R/ECC柱骨架曲线下降段较RC柱平缓，承载力下降和刚度退化缓慢，极限位移较大。

通过骨架曲线，采用能量等值法确定十字形短柱的屈服点，以骨架曲线上荷载下降至峰值荷载80%时，所对应的点确定十字形短柱的极限点。

柱的延性可通过延性系数进行衡量，柱延性系数用式(1)计算。

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y, \quad (1)$$

式中： μ 为延性系数； Δ_y 为试件屈服荷载所对应的水平位移； Δ_u 为试件峰值荷载下降至80%所对应的水平位移。

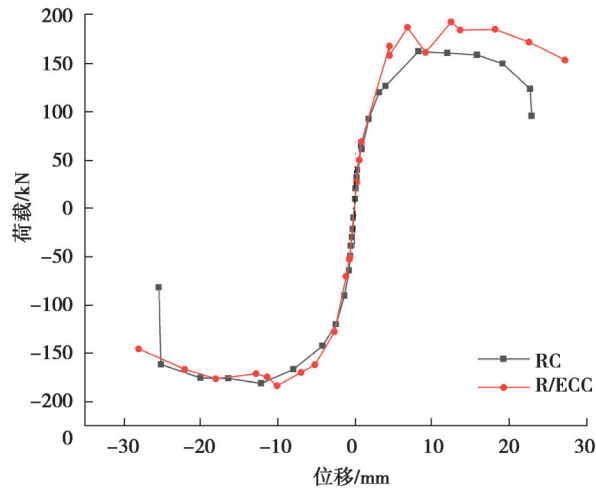


图 10 十字形短柱骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of cross-shaped short column

两柱屈服点、峰值点及极限点分别对应的荷载、位移以及两柱的延性系数如表 4 所示。

表 4 十字形短柱承载力、位移及延性系数

Table 4 Bearing capacity, displacement and ductility coefficient of cross-shaped short columns

十字形短柱	荷载/kN			位移/mm			延性系数 μ
	屈服	峰值	极限	屈服	峰值	极限	
RC	140.38	171.90	137.52	4.90	10.19	23.52	4.80
R/ECC	164.93	188.27	150.62	5.24	11.29	27.01	5.15

由图 10 和表 4 的结果可知,对比柱的峰值荷载反映 2 个短柱受剪承载力的大小, R/ECC 柱相比 RC 柱承载力提高 9.5%, 表明使用混掺高延性纤维混凝土对十字形短柱的受剪承载力具有一定的提高作用。R/ECC 柱、RC 柱位移延性系数分别为 5.15 和 4.80, 极限位移分别为 27.01 mm 和 23.52 mm。相比 RC 柱, R/ECC 柱的延性系数提高 7.30%, 极限位移增大 14.8%。结果表明, 在十字形短柱底部采用混掺高延性纤维混凝土可提高十字形短柱的延性和变形能力。在水平荷载作用下, 纤维可以有效阻止、约束基体内部微裂缝的扩展, 并有效桥接裂缝, 多条裂缝共同扩展, 提高了十字形短柱的延性和变形能力。

3.3 耗能能力

柱的耗能能力是评价其抗震性能的重要指标, 通过等效黏滞阻尼系数 h_e 和累积耗能 2 个参数对比分析 R/ECC 柱和 RC 柱的耗能能力。等效黏滞阻尼系数用式 (2) 计算, 计算简图如图 11 所示。

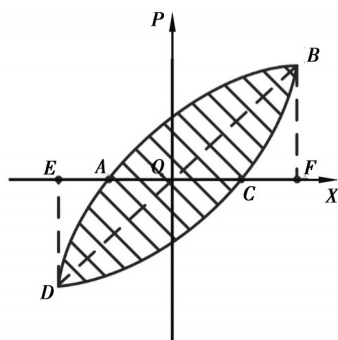


图 11 等效黏滞阻尼系数计算简图

Fig. 11 The calculation diagram of equivalent viscous damping coefficient

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \times \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBF+ODE)}}, \quad (2)$$

式中： $S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回曲线实际包围的面积； $S_{(OBF+ODE)}$ 为理想弹性结构达到相同位移时所吸收的能量。

等效粘滞阻尼系数越大代表其耗能能力越强，十字形短柱等效黏滞阻尼系数随位移变化趋势如图12所示，两柱各阶段的累积耗能如表5所示。

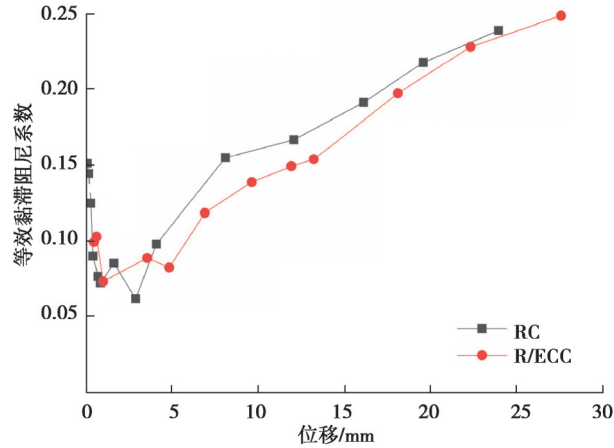


图12 十字形短柱等效黏滞阻尼系数曲线

Fig. 12 Equivalent viscous damping coefficient curves of cross-shaped short columns

表5 十字形短柱累积耗能

Table 5 Accumulated energy dissipations of cross-shaped short columns

十字形短柱	累积滞回耗能/(kN·mm)		
	屈服点	峰值点	极限点
RC	1 034.78	4 079.62	37 234.11
R/ECC	1 313.70	13 279.18	53 848.88

由图12可知，加载初期，两柱等效黏滞阻尼系数均较小，呈下降趋势。屈服后，R/ECC柱等效黏滞阻尼系数随加载位移的增大呈增长趋势；加载后期，R/ECC柱的等效粘滞阻尼系数增长速率相比于RC柱增长更快；短柱破坏时，R/ECC柱等效黏滞阻尼系数大于RC柱，表明后期R/ECC柱耗能能力强。

由表5可知，两柱在屈服前累积滞回耗能差别不大；在峰值点和极限点时，R/ECC柱累积滞回耗能明显高于RC柱，分别比RC柱提高了225.5%和44.6%，表明在十字形柱底使用混掺高延性纤维混凝土显著提高了柱的耗能能力。在开裂过程中，纤维桥接裂缝，有效阻止裂缝的扩展，基体发生多裂缝开裂，纤维不断地被拔出、拔断，需要消耗大量的能量。

3.4 刚度退化

采用等效刚度来表示柱的刚度退化特性，如图13所示，为十字形短柱等效刚度随柱顶位移变化的刚度退化曲线。由图13可知，两柱在屈服前，刚度退化曲线较陡峭；屈服后，刚度退化速率随位移增大逐渐降低。负向加载中，R/ECC柱与RC柱刚度退化曲线相互交错，表现出相近的变化趋势。正向加载中，在加载初期R/ECC柱与RC柱刚度退化趋势相近；屈服后，R/ECC柱相比RC柱刚度退化率较低，这是由于混掺高延性纤维混凝土较高的延性和假应变硬化特性在十字形短柱出现较多裂缝后混掺高延性纤维混凝土仍能继续工作，抵抗反复作用力，减缓了十字形短柱刚度退化速度。

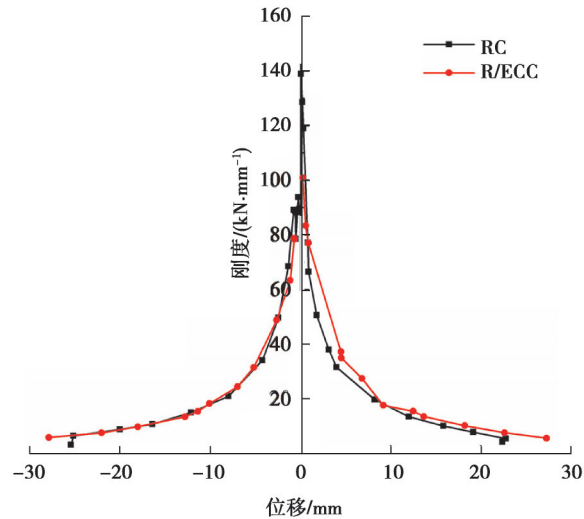


图13 十字形短柱刚度退化曲线

Fig. 13 Stiffness degradation curves of cross-shaped short columns

4 结 论

通过低周反复荷载作用下 R/ECC 短柱和 RC 短柱的对比试验,分析了在十字形短柱底部采用混掺高延性纤维混凝土对柱破坏形态、滞回性能、骨架曲线、延性、耗能能力和刚度退化等的影响,结论如下:

1) R/ECC 柱呈现多裂缝开裂的特征,裂缝细而密,多为水平裂缝,在翼缘外侧有少量较短交叉斜裂缝;破坏时,柱底混凝土未剥落,截面保持完整,表明在十字形短柱底部采用混掺高延性纤维混凝土有效防止了柱底混凝土压溃,改善了十字形短柱柱底薄弱现象及其破坏特征。

2) 在柱底采用混掺高延性纤维混凝土可提高十字形短柱的受剪承载力和位移延性,减缓刚度退化速率。相比 RC 柱, R/ECC 柱受剪承载力提高 9.5%,位移延性系数提高 7.3%,骨架曲线下降段趋势较平缓。

3) 混掺高延性纤维混凝土显著提高了十字形短柱的耗能能力。相比 RC 柱, R/ECC 柱滞回曲线更加饱满,在峰值点和极限点的累积滞回耗能分别提高 225.5% 和 44.6%。

参考文献

- [1] 隋章. 论异形柱结构在多层住宅中的应用[J]. 江西建材, 2016(4): 26, 31.
Sui Z. On the application of special-shaped column structure in multi-storey residence[J]. Jiangxi Building Materials, 2016(4): 26, 31.(in Chinese)
- [2] 赖世模. 浅谈多层建筑异形柱结构设计[J]. 低碳世界, 2015(22): 234-235.
Lai S M. Discussion on structural design of special-shaped columns in multi-storey buildings[J]. Low Carbon World, 2015(22): 234-235.(in Chinese)
- [3] 曹万林, 胡国振, 崔立长, 等. 钢筋混凝土带暗柱异形柱抗震性能试验及分析[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 16-20, 26.
Cao W L, Hu G Z, Cui L C, et al. Experiment and analysis of seismic behavior of the +, L, T-shaped columns with concealed columns[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 16-20, 26.(in Chinese)
- [4] 曹万林, 黄选明, 宋文勇, 等. 带交叉钢筋异形截面短柱抗震性能试验研究及非线性分析[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 30-37.
Cao W L, Huang X M, Song W Y, et al. Experiment and non-linear element analyses of seismic behavior of short specially shaped columns with crossed reinforcing bars[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 30-37.(in Chinese)
- [5] Chen Z P, Xu J J, Xue J Y. Hysteretic behavior of special shaped columns composed of steel and reinforced concrete (SRC)[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(2): 329-345.
- [6] Fang L, Zhang B, Jin G F, et al. Seismic behavior of concrete-encased steel cross-shaped columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 109: 24-33.
- [7] Zhou T, Jia Y M, Xu M Y, et al. Experimental study on the seismic performance of L-shaped column composed of concrete-

- filled steel tubes frame structures[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 114: 77-88.
- [8] 李艳艳, 张玮天. 十字形截面钢-混凝土组合异形柱的抗震性能[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(6): 54-60.
Li Y Y, Zhang W T. Seismic behavior of steel reinforced concrete cross-shaped columns[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(6): 54-60.(in Chinese)
- [9] Wang T C, Liu X A, Zhao H L. Experimental study of the seismic performance of L-shaped columns with 500 MPa steel bars [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-11.
- [10] Wang T C, Liu X, Zhao H L. Experimental research on seismic behavior of +-shaped columns reinforced with high-strength steel bars under cyclic loading[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(4): 982-993.
- [11] 王文洋, 赵海龙, 王铁成, 等. 配置 600 MPa 级钢筋的混凝土十形截面柱抗震性能试验[J]. *土木工程与管理学报*, 2017, 34(5): 126-132.
Wang W Y, Zhao H L, Wang T C, et al. Experimental on seismic behavior of cross-shaped concrete columns with 600 MPa-grade reinforcing bar[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2017, 34(5): 126-132.(in Chinese)
- [12] 王铁成, 郝贵强, 赵海龙, 等. 反复荷载作用下纤维增强异形柱的抗震性能试验[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(11): 957-963.
Wang T C, Hao G Q, Zhao H L, et al. Test on seismic behavior of special-shaped columns reinforced by fiber under cyclic loading[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(11): 957-963.(in Chinese)
- [13] Li V C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC[C]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6): 483-492.
- [14] Li V C. On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 215-230.
- [15] Deng M K, Zhang Y X. Seismic Performance of High-Ductile Fiber-Reinforced Concrete Short Columns[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-11.
- [16] Xu L, Pan J L, Chen J H. Mechanical behavior of ECC and ECC/RC composite columns under reversed cyclic loading[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(9):04017097.
- [17] Wu C, Pan Z F, Su R K L, et al. Seismic behavior of steel reinforced ECC columns under constant axial loading and reversed cyclic lateral loading[J]. *Materials & Structures*, 2017, 50(1):78.

(编辑 陈移峰)