

高轴压比下 PVA-ECC 柱抗震性能试验研究^{*}

汪梦甫[†], 张旭

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:设计了3根PVA-ECC柱进行低周反复加载试验,分析了高轴压比下配箍率变化对柱抗震性能的影响,并与普通钢筋混凝土柱进行对比,分析其在滞回性能、延性、耗能性能及刚度退化上的差异.结果表明:3根PVA-ECC柱在低周反复荷载作用下均发生弯曲破坏,没有出现普通钢筋混凝土柱的劈裂、剥落与黏结破坏;随着箍筋间距的减小,抗震延性得到改善,箍筋间距70 mm和50 mm的柱与间距90 mm的柱相比,位移延性、极限弹塑性位移角、等效黏滞阻尼系数分别增加了15.6%~16.3%,17.1%~20.6%和15.6%~17.8%;最后给出了满足一定位移延性和极限弹塑性位移角的抗震设计要求的最小配箍率的建议值.

关键词:抗震设计;PVA-ECC柱;配箍率;高轴压比

中图分类号:TU375.3;P315.9

文献标志码:A

Experimental Study on Seismic Performance of PVA-ECC Columns with High Axial Load Ratio

WANG Mengfu[†], ZHANG Xu

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract:In this paper, the low reversed cyclic loading tests of three PVA-ECC columns were carried out, and the influence of the stirrup ratio change on the seismic performance of the columns under the high axial load ratio was studied, and the hysteretic performance, ductility, energy dissipation capacity and stiffness degradation of the test PVA-ECC columns and the ordinary reinforced concrete columns were compared. The test results indicate that, under high axial load, the test specimen exhibited flexure failures with better ductility, and bond splitting, spalling of ECC as well as composite disintegration due to cyclic loading were prevented. With the decrease of the stirrup spacing of PVA-ECC columns, the seismic ductility was also improved greatly. Compared with the PVA-ECC column with stirrup spacing(90mm), the displacement ductility, the maximum drift ratio and the equivalent viscous damping ratios of the PVA-ECC columns with stirrup spacing 70 mm and 50 mm were improved by 15.6%~16.3%, 17.1%~20.6% and 15.6%~17.8%, respectively. Minimum stirrup ratio that can satisfy certain seismic requirement on displacement ductility and drift ratio were put forward.

Key words: seismic design; PVA-ECC columns; stirrup ratio; high axial load ratio

^{*} 收稿日期:2016-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278181, 51578225), National Natural Science Foundation of China(51278181, 51578225); 国家教育部博士点基金资助项目(20120161110022), Programs Foundation of Ministry of Education of China(20120161110022)

作者简介:汪梦甫(1965-),男,湖北通城人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: wangmengfu@126.com

在大型火力发电厂主厂房结构、高层或超高层钢筋混凝土结构、大跨结构以及其他重型工业建筑结构中,竖向荷载较大,经常会遇到柱的轴压比超过规范限值的问题^[1].为了改善高轴压比框架柱的延性与变形能力,国内外研究人员^[2-8]尝试用高强混凝土代替普通混凝土、用高强纵筋代替普通纵筋、用高强箍筋代替普通箍筋,并完成了许多高强箍筋高强混凝土短柱(剪跨比 ≤ 2.0)、高强箍筋高强混凝土普通框架柱(剪跨比为3.0左右)与高强箍筋高强混凝土长柱(剪跨比 ≥ 4.0)的拟静力试验.试验结果表明^[4-8]:在框架柱中采用高强混凝土,可降低轴压比,对其延性抗震和耗能有利,沿着整个柱高密配高强箍筋是保证高强混凝土框架柱在高轴压比下具有良好延性性能以及提高其轴压比限值的有效措施.然而,无论是普通混凝土还是高强混凝土,均具有显著的脆性特征,密配箍筋固然能改善柱的延性与耗能,但会因钢筋拥挤而影响混凝土柱的施工质量.

PVA-ECC是一种在水泥砂浆中掺入短纤维PVA(体积掺量不超过2%)的工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite,简称ECC),其主要特征为高延性、高韧性,在拉伸荷载作用下产生多条细密裂缝,极限拉应变可以稳定地达到3%以上^[9].这使得ECC与钢筋之间有一致协调的变形能力,即使钢筋受力状态达到塑性屈服时也是如此,在疲劳荷载作用下ECC变形大于其静载包络线,具有优异的变形能力^[10].近年来将PVA-ECC代替混凝土应于梁^[11-14]、结点^[15]、框架^[16-17]的研究较多,并进行了大量的抗震性能试验,试验结果表明:配筋ECC单元表现出了剪应力下的高延性特点、高能量吸收特点、大侧向位移下有稳定的结构整体性及滞后环,由于ECC优良的剪切延性,箍筋的配置数量可以减少甚至不用配置.与PVA-ECC梁的研究相比,以PVA-ECC代替混凝土应用于框架柱(即PVA-ECC柱)的研究不多,但也有颇具价值的成果.Fischer与Li^[18]完成了一根配有箍筋、二根未配箍筋(其中一根试验轴压比为0.1)共3根缩比为1/5、剪跨比为4.5的PVA-ECC柱的拟静力试验,并与相应普通钢筋混凝土柱试验结果进行了比较,结果表明:PVA-ECC柱的变形性能得到了改善,耗能能力得到极大提升,箍筋对PVA-ECC柱的影响可以忽略,没有出现劈裂、剥落与黏结破坏.Fischer与Fukuyama^[19]完成了一根未配箍筋试验轴压比为0.15、剪跨比为4.5的大尺度PVA-ECC柱的拟静力试验,进一步论证了Fischer与Li^[18]由小尺度模

型试验得出的结论.Gencturk与Elnashai^[20]完成了缩比为1/8、剪跨比为4.62的共15根PVA-ECC柱的单调加载、循环加载、静力时程加载试验及3根PVA-ECC柱的拟动力试验,并与相应普通钢筋混凝土柱试验结果进行了比较,结果表明:ECC柱的延性大大高于相应的普通混凝土柱,在保证生命安全和防止倒塌阶段,ECC柱的能量吸收能力较相应的普通混凝土柱增加分别为150%和50%.然而,现有PVA-ECC柱的研究存在如下问题:1)试验柱轴压比太小.由于轴压比对柱的延性与变形能力有重要影响,轴压比为零或轴压比为0.1的普通混凝土框架柱的延性本来就能满足设计需要,改用PVA-ECC柱的延性更好,只是锦上添花而已,其研究结论不能直接应用到高轴压比柱.2)试验柱的剪跨比太大.试验柱的剪跨比均大于4.0,柱截面承受剪应力相对弯曲应力较小,改用PVA-ECC柱并不能充分说明其抗剪能力优越,其研究结论不能直接应用到一般框架柱上(剪跨比为3.0左右).

为了深入了解高轴压比PVA-ECC柱的抗震性能,本文以文献[8]的3根高强箍筋、高强混凝土、高轴压比(设计轴压比最小为1.153)框架柱(剪跨比为2.78)为对比试件,将该3根试件的高强混凝土用PVA-ECC代替制作成箍筋间距不同(50 mm, 70 mm, 90 mm)的PVA-ECC柱,进行低周反复加载拟静力试验,研究PVA-ECC柱与文献[8]中钢筋混凝土柱的抗震性能差异和配箍率变化对PVA-ECC柱抗震性能的影响,分析该类新材料构件的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能能力以及刚度退化.该研究成果对超高韧性水泥基复合材料的广泛应用具有实际意义.

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验制作了3根PVA-ECC柱,试件几何尺寸与文献[8]中的混凝土柱相同.截面尺寸为180 mm \times 180 mm,柱身高度为650 mm,水平加载点距柱底500 mm,剪跨比为2.78.柱一端固定,另一端自由.固定端与基座相连,基座尺寸为1 800 mm \times 350 mm \times 400 mm.在柱端施加固定竖向轴力和低周反复水平荷载,试验轴压比 $n_c = 0.7$.试件截面尺寸及配筋构造见图1.本文参考文献[21]确定超高韧性水泥基复合材料配合比,见表1.表1中水泥采用P.O42.5普通硅酸盐水泥;硅灰平均粒径为88

nm,比表面积为 18 500 m²/g;石英砂粒径范围 0.9~2 mm;石英粉平均粒径 50 μm;FOX-8HP 型聚羧

酸减水剂;PVA 纤维采用日本可乐丽公司生产的 REC15×12 型号,其基本性能见表 2.

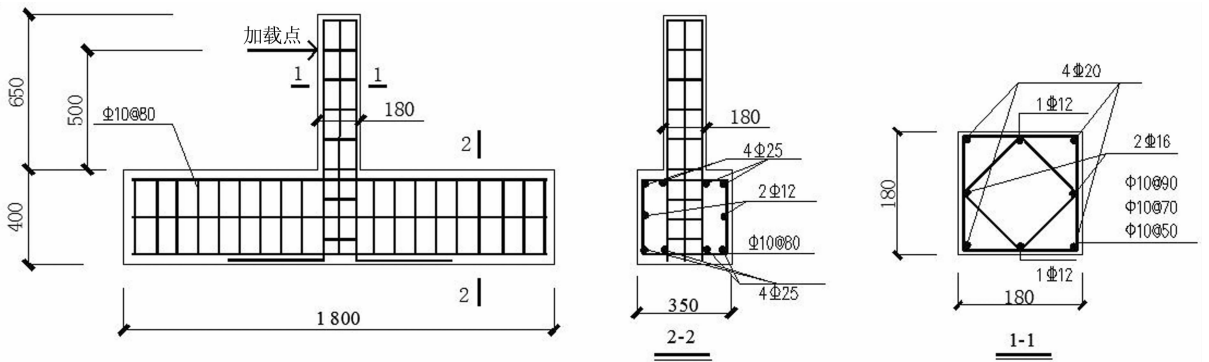


图 1 试件尺寸及截面配筋图(mm)

Fig. 1 Specimen dimensions and reinforcement(mm)

表 1 PVA-ECC 材料配合比

Tab. 1 PVA-ECC mix

水泥	硅灰	石英粉	石英砂	水灰比	减水剂	ρ _{PVA}	w _{SD623}	w _{BC992}
1	0.389	0.277	0.967	0.208	0.02	0.02	0.1	0.1

注:除 PVA 为体积分数外,其余均为与胶凝材料(水泥、硅灰)的质量分数.

表 2 PVA 纤维的基本性能

Tab. 2 Basic properties of PVA fibers

型号	密度/(g·m ⁻³)	直径/mm	细度/dtex	长度/mm	抗拉强度/MPa	模量/GPa
REC 15×12	1.3	0.04	15	12	1600	40

mm×150 mm 的立方体试块和 3 个 150 mm×150 mm×300 mm 的棱柱体试块,并与试件在同条件下养护 28 d,在试验前首先进行 PVA-ECC 试块抗压强度试验.目前关于 PVA-ECC 材料立方体和棱柱体强度之间的换算关系研究较少,所以本文采用棱柱体抗压强度实测平均值作为 PVA-ECC 的轴心抗压强度.本次试验的 3 根 PVA-ECC 柱和与其对比的 3 根普通钢筋混凝土柱试件参数见表 3;钢筋材料的力学性能见表 4;箍筋端头采用焊接搭接,焊接搭接长度为 10 d,如图 2 所示;PVA-ECC 拌合物如图 3 所示.

1.2 材料力学性能

试件浇筑时,每根试件预留 3 个 150 mm×150

表 3 试件参数表

Tab. 3 Parameters of specimens

试件	截面尺寸/mm×mm	立方体抗压强度/(N·mm ⁻²)	轴心抗压强度/(N·mm ⁻²)	试验轴压比 n _t	箍筋间距/mm	体积配箍率 ρ _v /%	配箍特征值 λ _{vd}
ECC-1	180×180	54.84	33.90	0.703	50	6.70	0.629
ECC-2	180×180	54.37	33.70	0.712	70	4.79	0.452
ECC-3	180×180	54.41	33.70	0.701	90	3.72	0.352
C-1	180×180	57.85	37.20	0.705	50	6.70	0.688
C-2	180×180	57.77	37.15	0.706	70	4.79	0.493
C-3	180×180	59.56	38.24	0.686	90	3.72	0.372

表 4 钢筋材料性能

Tab. 4 Steel material performance

钢筋强度等级	钢筋直径/mm	f _y /MPa	f _u /MPa
HRB400	20	496.6	631.0
	16	460.5	577.0
	12	474.1	589.4
HPB300	10	318.3	479.7

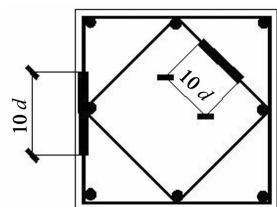


图 2 箍筋搭接焊示意图

Fig. 2 Sketch map of stirrups lap welding



图3 PVA-ECC 拌合物
Fig. 3 Mixing material of PVA-ECC

1.3 试验装置及加载制度

试验加载装置如图4所示,试件水平方向通过螺杆与固定在反力墙上的500 kN的电液伺服作动器连接起来施加低周往复水平力,轴向力通过千斤顶施加,千斤顶下端设置力传感器,力传感器下端设置滚轴,可以自由滚动.基座通过压梁、地锚螺栓锚固在试验台座上.

试验加载制度与文献[8]相同,首先施加竖向荷载并保持恒定,然后施加水平荷载.水平加载采用低周反复静力加载制度,采用位移控制.相应的每圈位移幅值为0.63 mm, 1 mm, 2 mm, 3.33 mm, 5 mm, 10 mm, 14.3 mm, 20 mm, 25 mm, ..., 对应的位移角分别为1/800, 1/500, 1/250, 1/150, 1/100, 1/50, 1/35, 1/25, 1/20, ..., 直到试件的水平承载力下降至峰值承载力的85%以下.

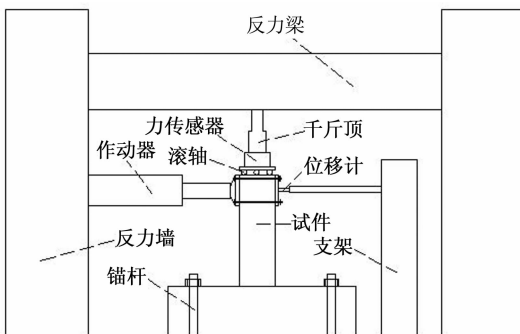


图4 试验加载装置图
Fig. 4 Test loading device

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

3根PVA-ECC柱均发生弯曲破坏,以试件ECC-2为例,试件在水平位移小于3.33 mm的情况下,荷载位移曲线为直线,基本处于弹性状态.水平

位移达到5 mm时在柱受拉侧距离柱根部5 mm处出现水平裂缝,反向水平位移达到5 mm时,柱受拉侧距离柱根部4 mm处出现水平裂缝,水平位移达到10 mm时,出现多条新的水平裂缝和斜向裂缝,柱角出现竖向的微裂缝,且原有裂缝有所发展.水平位移达到14.3 mm时,构件达到水平峰值承载力,柱根部受拉侧出现细而密的水平裂缝,柱身中部出现水平裂缝和斜裂缝.水平位移达到20 mm时,受拉侧的水平裂缝宽度增加,可观测到裂缝之间的纤维.柱角混凝土的竖向裂缝向上发展,混凝土表皮隆起,并且出现水平和竖向的交叉裂缝.水平位移达到25 mm时,柱角受压侧混凝土压酥,由于纤维的桥联作用,与常见普通钢筋混凝土柱破坏情形相比并没有出现混凝土大面积的剥落现象.水平位移达到30 mm时,水平承载力降到峰值承载力的85%以下试验终止.4个柱角部分的混凝土被压酥,由于纤维桥联作用,混凝土没出现大规模的剥落,箍筋和纵筋也都没有露出.

其余2个试件的破坏现象与ECC-2基本类似,柱角部分混凝土被压坏,混凝土被压酥.柱的2个侧面出现多条细而密的水平裂缝,柱正面和后面出现交叉的斜裂缝,总体来说破坏的时候出现的裂缝较多,各试件破坏形态如图5所示.

2.2 滞回性能分析

滞回曲线指结构或构件在低周反复荷载作用下的荷载-位移曲线,能够比较全面地反映承载能力、刚度、延性、刚度和强度退化规律以及耗能能力.滞回曲线越饱满,表明其耗能能力越强,抗震性能越好.图6为文献[8]中的3根试件以及本次试验中3根试件的力-位移曲线图.从图6可看出:水平位移较小时,试件基本处于弹性状态,各试件加载曲线斜率几乎不变,加卸载曲线几乎重合,残余变形小.可见在弹性阶段提高配箍特征值对各试件影响不大.随着水平位移增大,试件裂缝不断增多,残余变形逐渐增大,滞回环所包围的面积也不断变大,试件进入屈服阶段.进入屈服阶段后试件的加卸载曲线表现出如下特点:

1) 由于PVA-ECC材料具有应变硬化特性,变形能力较强,3根PVA-ECC柱滞回曲线形状饱满,捏拢现象不明显,正反两个方向图形基本对称.随着水平位移增大,滞回环所包围的面积也增大.

2) 箍筋间距相同时,使用超高韧性水泥基复合材料的ECC-1, ECC-2和ECC-3分别与使用普通钢筋混凝土的C-1, C-2和C-3相比,可以看出, ECC-1, ECC-2和ECC-3滞回环比C-1, C-2和C-3饱满,且在箍筋间距越大的时候饱满程度差别越明显.

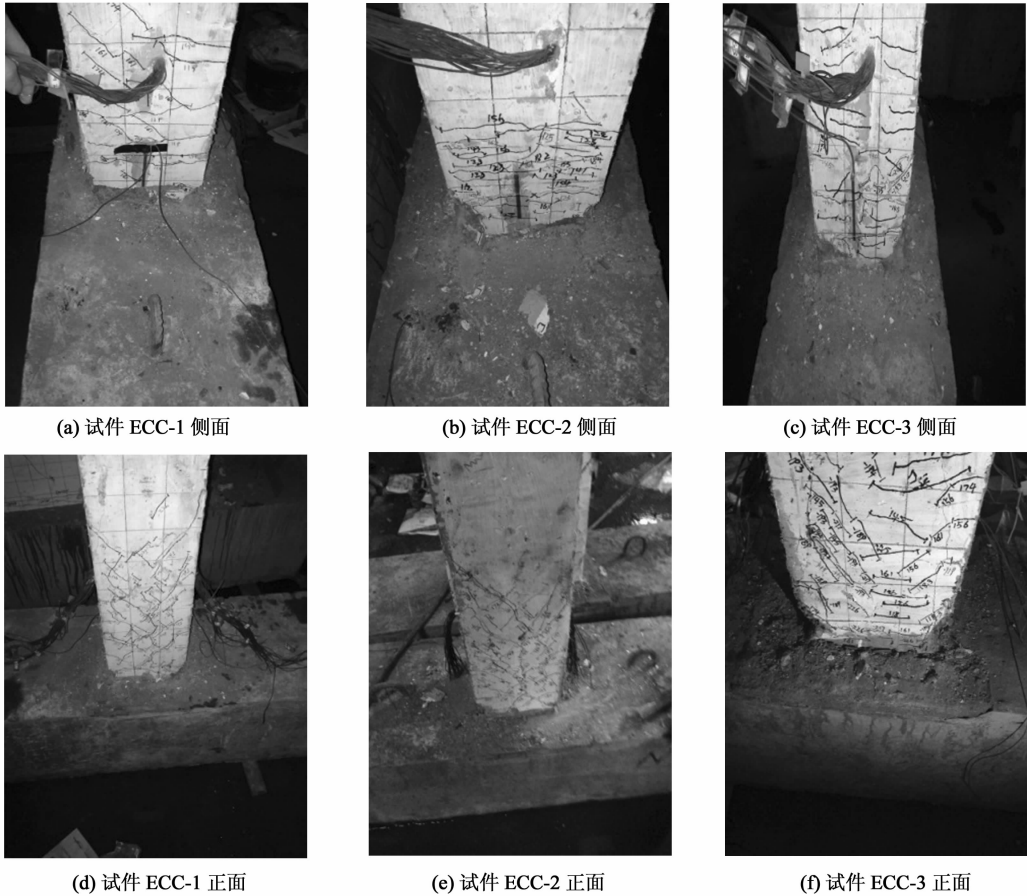
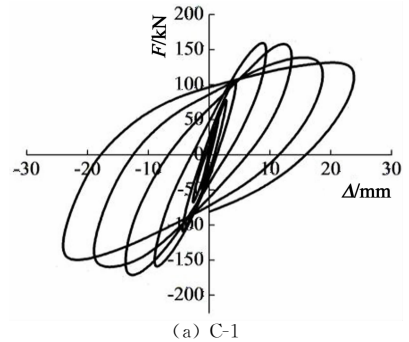


图 5 试件破坏形态

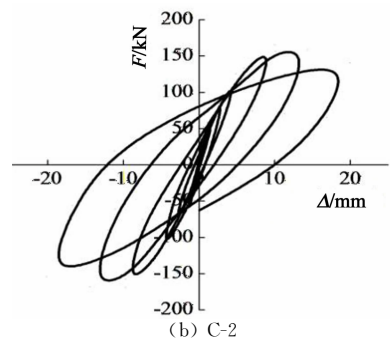
Fig. 5 Failure diagrams of specimens

3)普通钢筋混凝土柱 C-2, C-3, 由于普通混凝土本身抗拉和抗剪能力弱, 变形能力不强, 箍筋约束不够, 导致在高轴压比作用下试件达到峰值承载力后, 随着水平位移增大承载力下降较快, 延性较差. 超高韧性水泥基复合材料由于纤维本身抗拉能力强以及纤维的桥联作用, 使得 PVA-ECC 柱变形能力强, 达到峰值承载力后, 随着水平位移增大承载力下降平缓, 表现出较好的延性.

4)ECC-1 与 ECC-2 对比滞回环包围的面积相差不大, 水平承载力降到峰值承载力 85% 时的极限水平位移在 30 mm 左右, 都表现出较好的滞回性能和耗能性能. ECC-3 与 ECC-1 和 ECC-2 对比滞回环包围的面积略小, 极限水平位移也略小. 但是与 C-3 对比 ECC-3 还是表现出较好的滞回性能和耗能性能. 由此可见, 在箍筋间距为 70 mm 的基础上再加密箍筋对 PVA-ECC 柱的耗能能力提高不明显, 箍筋间距为 90 mm 的 PVA-ECC 柱也可以表现出较好的耗能性能.



(a) C-1



(b) C-2

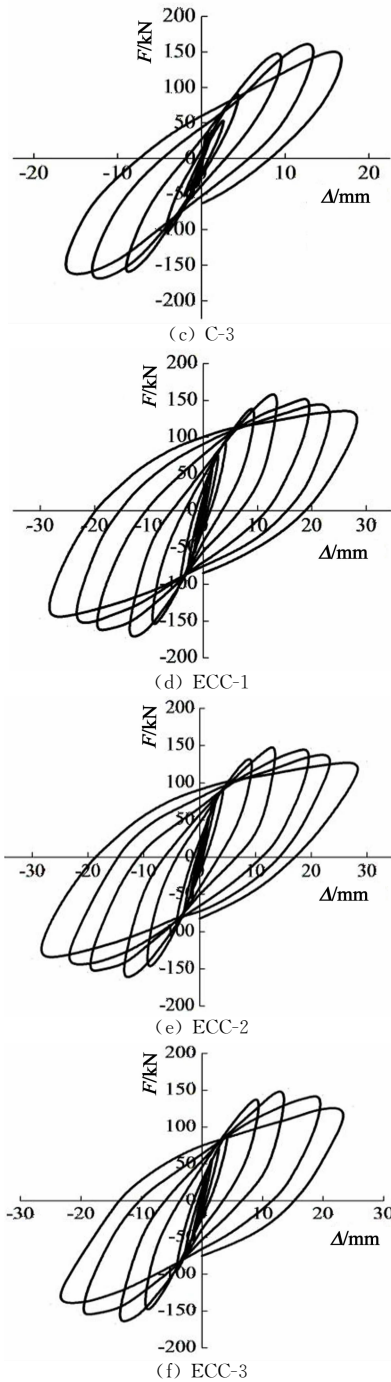


图6 试件滞回曲线
Fig. 6 Hysteretic loops of specimens

2.3 骨架曲线分析

试件的骨架曲线就是把水平荷载-位移滞回曲线中每一级加载的峰值点连接起来形成的包络线. 它能很好地反映试件在低周反复荷载作用下的承载力变化和延性性能. 试件的骨架曲线如图7所示.

从图7所示试件骨架曲线中可得出以下结论:

1) 试件 ECC-3 与 ECC-1 及 ECC-2 相比在达到峰值承载力后承载力下降较快, 极限位移也较小. ECC-1 与 ECC-2 达到峰值承载力后水平力下降走势相差不

大, 只是 ECC-1 承载力比 ECC-2 和 ECC-3 高.

2) 相同箍筋间距时 ECC-1, ECC-2 和 ECC-3 分别与 C-1, C-2 和 C-3 相比, 由于 PVA-ECC 材料中没

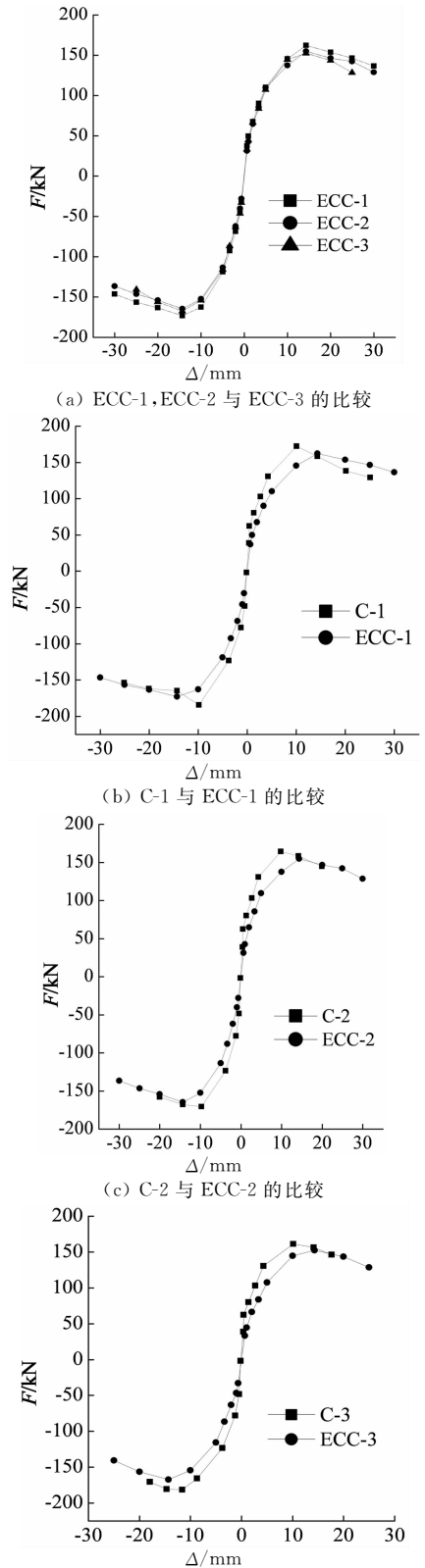


图7 试件骨架曲线
Fig. 7 Skeleton curves of specimens

有粗骨料,PVA-ECC 柱弹性模量比普通钢筋混凝土柱小,所以骨架曲线在位移较小时其斜率比普通钢筋混凝土柱小.与钢筋混凝土柱相比达到峰值承载力时,PVA-ECC 柱对应的水平位移较大.达到峰值承载力后,PVA-ECC 柱的水平力下降较平缓,极限位移也较大.总体来说 ECC-1,ECC-2 和 ECC-3 的极限位移角都超过 1/25,水平力下降趋势平缓.表明使用超高韧性水泥基复合材料可以有效提高试件的延性.

2.4 延性性能

延性是指构件破坏之前,在其承载力无显著降

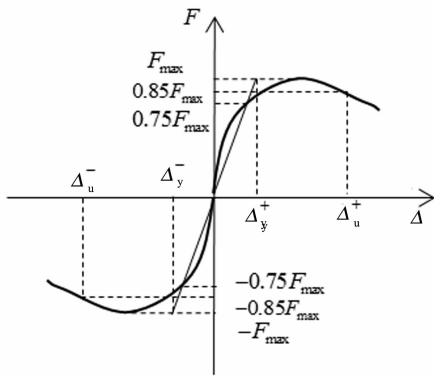


图 8 柱延性指标定义

Fig. 8 The definition of column ductility index

低的条件下经受非弹性变形的能力.延性性能可较好地反映结构或构件在地震作用下承受变形和消耗地震能量的能力.本文采用与文献[8]相同的延性系数计算方法, Δ_y 为屈服位移, Δ_u 为极限位移,延性系数 $u_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$,并计算各试件的极限位移角 θ_u 和文献[8]中的试件进行对比. $\theta_u = \Delta_u / H$, H 为水平加载点到柱根部的距离,试件试验数据特征值及延性系数见表 5;各项指标定义如图 8 所示;延性系数与体积配箍率的曲线如图 9 所示.

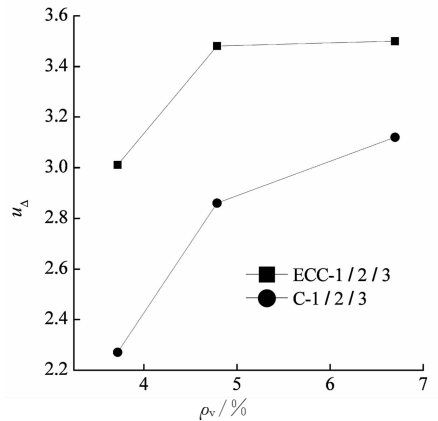


图 9 u_Δ 与 ρ_v 曲线

Fig. 9 Relation curves of u_Δ vs ρ_v

表 5 试验特征值和位移延性系数

Fig. 5 Characteristic values and displacement ductility coefficients of specimens

试件编号	屈服位移/mm			峰值荷载/kN			极限位移/mm			极限位移角 θ_u	延性系数 u_Δ
	正向	反向	均值	正向	反向	均值	正向	反向	均值		
ECC-1	8.2	8.6	8.40	162.32	173.15	168.14	29.3	29.5	29.4	1/17.0	3.50
ECC-2	8.1	8.3	8.20	154.73	164.74	160.13	28.7	28.3	28.5	1/17.5	3.48
ECC-3	7.9	8.3	8.10	152.43	167.42	160.08	24.2	24.6	24.4	1/20.5	3.01
C-1	6.6	7.1	6.85	170.12	185.90	178.01	18.0	24.8	21.4	1/23.4	3.12
C-2	6.6	7.4	7.00	164.50	174.88	169.69	20.1	20.0	20.1	1/24.9	2.86
C-3	7.9	7.6	7.75	165.21	181.80	173.51	17.5	17.7	17.6	1/28.4	2.27

由表 5 和图 9 可以得到如下结论:

本次试验的 3 个试件的延性系数都大于 3,极限位移角在 1/20.5~1/17 之间,远大于我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1] 框架结构弹塑性层间位移角 1/50 的要求,其中 ECC-1 试件的延性系数和极限位移角最大;ECC-1,ECC-2 和 ECC-3 与 C-1,C-2 和 C-3 相比,位移延性分别提高了 12.2%,21.7%和 32.6%,箍筋间距越大,延性提高的幅度越大,越能充分发挥 PVA-ECC 材料的优越性;ECC-1,ECC-2 与 ECC-3 相比位移延性分别提高了 16.3%和 15.6%,极限弹塑性位移角分别提高

了 20.6%和 17.1%;箍筋间距 90 mm 的 ECC-3 与箍筋间距 50 mm 的 C-1 相比,延性系数相差不大,但极限位移增大了 14%;ECC-2 与 ECC-3 相比延性系数提高了 15.6%,ECC-1 与 ECC-2 相比提高了 0.6%,C-2 与 C-3 相比提高了 26.0%,C-1 与 C-2 相比提高了 9.1%.表明使用掺入 PVA 纤维的超高韧性水泥基复合材料可以有效地提高柱子的延性,增强柱子的抗震能力;材料本身抗剪能力较强,可以起到减少箍筋配置的作用;箍筋对其约束作用的提高没有对普通混凝土明显.

2.5 耗能性能

通常把结构耗能能力的大小作为评价结构抗震性能的一个重要指标. 采用等效黏滞阻尼系数 ξ_{eq} (见式(1)) 判别结构的耗能能力, 等效黏滞阻尼系数越大, 构件的耗能能力越强, 抗震性能越好.

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S(ABE + EDA)}{S(OBC + ODG)}. \quad (1)$$

等效黏滞阻尼系数计算示意图 10; 等效黏滞阻尼系数与水平位移的曲线见图 11. 由图 11 可以得到: 在水平位移较小时, 所有试件的能量耗散较小, 等效黏滞阻尼系数较小. 随着水平位移增大, 试件通过塑性变形耗散能量增大, 等效黏滞阻尼系数逐渐变大. 本次试验的 3 根试件的等效黏滞阻尼系数在 0.104~0.377 之间. ECC-1 黏滞阻尼系数最大, ECC-3 黏滞阻尼系数最小. ECC-1, ECC-2 与 ECC-3 相比最大水平位移对应的等效黏滞阻尼系数分别提高了 17.8% 和 15.6%. 总体来说 PVA-ECC 柱的等效黏滞阻尼系数比普通钢筋混凝土柱大, 说明使用掺入 PVA 纤维的超高韧性水泥基复合材料可以有效提高试件的耗能能力.

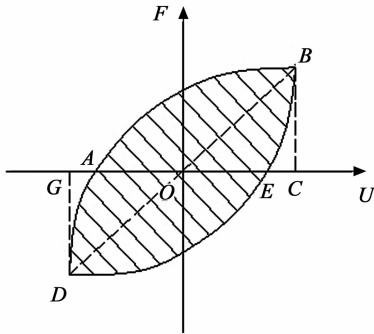


图 10 等效黏滞阻尼系数示意图

Fig. 10 Calculation diagram of viscous damping ratios

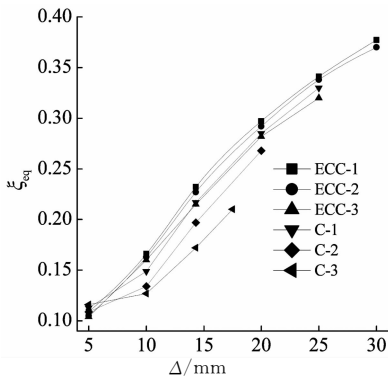


图 11 ξ_{eq} 与 Δ 曲线

Fig. 11 Relation curves of ξ_{eq} vs Δ

2.6 刚度退化

与文献[8]相同, 都用割线刚度来研究试件的刚

度退化, 用式(2)表示:

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|}. \quad (2)$$

K_i 指的是第 i 次荷载循环的正反 2 个方向的峰值荷载绝对值之和与对应的水平位移绝对值之和的比值, 各试件的刚度退化曲线见图 12.

由图 12 可以得到: 各试件的刚度退化开始较快, 后逐步减小, 没有出现刚度突变, 位移小于 10 mm 的时候, 钢筋混凝土柱的割线刚度比 PVA-ECC 柱的大, 随着位移逐渐增大两者的割线刚度相差不大. 3 根 PVA-ECC 柱试件在相同位移下的刚度相差不大, 说明配箍率对 PVA-ECC 柱的刚度影响不大.

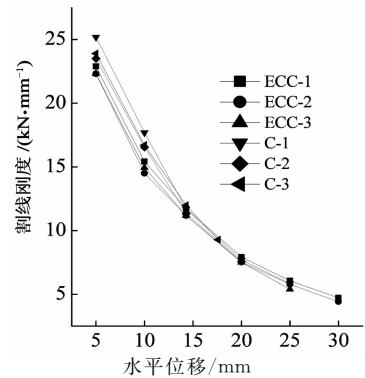


图 12 试件刚度退化曲线

Fig. 12 Stiffness degradation curves of specimens

3 结论

本文完成了 3 根高轴压比 PVA-ECC 柱的低周反复加载拟静力试验, 并与普通钢筋混凝土柱的试验结果对比分析, 得到如下结论:

1) 与普通钢筋混凝土柱相比, PVA-ECC 柱表现出更好的延性、耗能性能和抗震能力, 且在配箍率越小时 PVA-ECC 柱抗震能力提高越明显, 越能充分发挥 PVA-ECC 材料的优越性.

2) 在相同轴压比下, 箍筋间距为 90 mm 的 ECC-3 柱滞回性能和延性比间距为 70 mm 的稍差, 在 90 mm 间距基础上加密箍筋可以提高 PVA-ECC 柱的抗震性能, 但与普通钢筋混凝土柱 C-3 相比, ECC-3 还是表现出较好的抗震性能. 箍筋间距为 50 mm 的 PVA-ECC 柱与 70 mm 的相比, 滞回性能和延性提高不明显, 表明超高韧性水泥基复合材料本身的抗拉、抗剪和变形能力较强, 在 70 mm 基础上再加密箍筋意义不大.

3) 综合表 5, 并考虑一定的安全储备, 本文认为在本次试验特定条件 ($n_t = 0.701$, $\rho_t = 5.81\%$) 下, PVA-ECC 柱在箍筋间距 90 mm ($\rho_v = 3.72\%$)

时能满足延性系数 $\mu_{\Delta} \geq 3$ 和极限弹塑性位移角限值 $\theta_u \geq 1/67$ 的要求^[22]。这也是本次试验特定条件 PVA-ECC 柱满足抗震性能要求的最小配箍率。这说明用高轴压比条件下 PVA-ECC 柱代替高强混凝土柱可以起到减少箍筋配置的作用,但并非可以不配置箍筋。

参考文献

- [1] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国工业出版社, 2010:46—47,62.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010:46—47,62. (In Chinese)
- [2] THOMSON J H, WALLACE J W. Lateral load behavior of reinforced concrete columns constructed using high-strength materials[J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(5): 605—615.
- [3] PAULTRE P, LEGERON F, MONGEAU D. Influence of concrete strength and transverse reinforcement yield strength on behavior of high-strength concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(4): 490—501.
- [4] 张国军, 吕西林, 刘伯权. 轴压比超限框架柱的抗震性能研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(3): 48—55.
ZHANG Guojun, LÜ Xilin, LIU Boquan. Experimental study on seismic behavior of frame columns with transfinite values of axial load ratio[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(3): 48—55. (In Chinese)
- [5] 吕西林, 张国军, 陈绍林. 高轴压比高强混凝土足尺框架柱抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(3): 20—26.
LÜ Xilin, ZHANG Guojun, CHEN Shaolin. Research on seismic behavior of full scale high strength concrete frame columns with high axial compression ratios[J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(3): 20—26. (In Chinese)
- [6] 孙治国, 司炳君, 王东升. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(5): 128—136.
SUN Zhiguo, SI Bingjun, WANG Dongsheng. Research on the seismic performance of high-strength concrete columns with high-strength stirrups[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5): 128—136. (In Chinese)
- [7] 史庆轩, 杨坤, 白力更. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(12): 9—17.
SHI Qingxuan, YANG Kun, BAI Ligeng. Experiments on seismic behavior of high-strength concrete columns confined with high-strength stirrups[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(12): 9—17. (In Chinese)
- [8] 李远瑛, 张德生. 高轴压比高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(1): 172—179.
LI Yuanying, ZHANG Dsheng. Test study on seismic performance of high axial compression ratio and high-strength concrete columns[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(1): 172—179. (In Chinese)
- [9] 徐世浪, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6): 45—60.
XU Shilang, LI Hedong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(6): 45—60. (In Chinese)
- [10] 李庆华, 黄博滔, 周宝民, 等. 超高韧性水泥基复合材料单轴压缩疲劳性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(1): 135—142.
LI Qinghua, HUANG Botao, ZHOU Baomin, *et al.* Study on compression fatigue properties of ultra high toughness cementitious composites[J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(1): 135—142. (In Chinese)
- [11] FUKUYAMA H, MATSUZAKI Y, NAKANO K, *et al.* Structural performance of beam elements with PVA-ECC [C]//REINHARDT H W, NAAMAN A E. *Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Compositest (HP-FRCC 3)*. Colorado, USA: RILEM Publications SARL, 1999: 531—542.
- [12] PARRA-MONTESINOS G, CANBOLAT B A. Experimental study on the seismic behavior of high-performance fiber reinforced cement composite coupling beams[J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(1): 159—166.
- [13] 汪梦甫, 徐亚飞. PE-ECC 短梁抗剪性能研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(11): 10—16.
WANG Mengfu, XU Yafei. Research on shear behavior of PE-ECC short beam[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2015, 42(11): 10—16. (In Chinese)
- [14] 卜良桃, 万长胜, 尹鹏. PVA-ECC 加固 RC 足尺梁受弯性能试验研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2010, 37(1): 5—10.
BU Liangtao, WAN Changsheng, YIN Peng. Experimental study of full-scale RC beam reinforced by polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite mortar in flexure[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2010, 37(1): 5—10. (In Chinese)
- [15] PARRA-MONTESINOS G, WIGHT J K. Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(10): 1113—1121.
- [16] KESNER K E, BILLINGTON S L. Investigation of infill panels made from ECC for seismic strengthening and retrofit[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(11): 1712—1720.
- [17] FISCHER G, LI V C. Intrinsic response control of moment resisting frames utilizing advanced composite materials & structural elements [J]. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(2): 166—176.
- [18] FISCHER G, LI V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions[J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(6): 781—790.
- [19] FISCHER G, FUKUYAMA H, LI V C. Effect of matrix ductility on the performance of reinforced ECC column members under reversed cyclic loading conditions [C]//*Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites*. Takayama, Japan: Japan Concrete Institute, 2002: 269—278.
- [20] GENCTURK B, ELNASHAI A S, LEPECH M D, *et al.* Behavior of concrete and ECC structures under simulated earthquake motion[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(3): 389—399.
- [21] 汪梦甫, 王义俊, 徐亚飞. 超高韧性水泥基复合材料构件阻尼性能研究[J]. *建筑结构*, 2016, 46(15): 79—84.
WANG Mengfu, WANG Yijun, XU Yafei. Experimental study on damping property of the ultra high toughness engineered cementitious composites members[J]. *Building Structure*, 2016, 46(15): 79—84. (In Chinese)
- [22] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 304—305.
China Academy of Building Research. *Concrete structures design* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 304—305. (In Chinese)