

张童,雷真,朱争光,等.地震作用下纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能分析[J].地震工程学报,2020,42(1):57-62.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.57

ZHANG Tong, LEI Zhen, ZHU Zhengguang, et al. Seismic Behavior of the Textile Reinforced Concrete Columns under Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 57-62. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.57

地震作用下纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能分析

张童¹, 雷真², 朱争光¹, 吴亚玲¹

(1. 昆明工业职业技术学院, 云南 昆明 650300; 2. 云南大学, 云南 昆明 650000)

摘要: 为了解地震作用下纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能,采用钢筋、混凝土、纤维编织网浇筑纤维编织网增强钢筋混凝土柱,编织网主材为碳、玻璃纤维束;利用电液伺服加载系统为试件加载地震作用,监测相关数据,部分试件置入氯化钠溶液进行多次干湿循环。不同环境下的实验结果显示:纤维编织网层数越多,纤维编织网增强钢筋混凝土柱承载能力越强,抗震性能越好;配箍间距较大时,纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能仅在地震作用的后期呈现较差状态;干湿循环次数越多,纤维编织网增强钢筋混凝土柱承载力越弱,抗震性能越差。对于氯盐环境而言,可增加纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗腐蚀措施改善抗震性能。适当增加纤维编织网的数量、降低配箍间距有利于提升纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能。

关键词: 地震作用; 纤维编织网; 钢筋混凝土; 开裂荷载; 抗震性能

中图分类号: TU352.11; TU37

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0057-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.057

Seismic Behavior of the Textile Reinforced Concrete Columns under Earthquake

ZHANG Tong¹, LEI Zhen², ZHU Zhengguang¹, WU Yaling¹

(1. Kunming Vocational and Technical College of Industry, Kunming 650300, Yunnan, China;

2. Yunnan University, Kunming 650000, Yunnan, China)

Abstract: Reinforced concrete and textile are used to cast reinforced concrete columns using carbon and glass fiber bundles as the main materials to understand the seismic performance of the textile reinforced concrete columns under earthquake. An electro-hydraulic servo loading system is used to load the seismic monitoring data for the specimens. Some specimens are placed in the sodium chloride solution for multiple dry-wet cycles. The experimental results obtained under different environments denote that the bearing capacity of the reinforced concrete columns is strengthened and the seismic performance of the reinforced concrete columns is improved with increasing number of textile layers. The seismic performance of the textile reinforced concrete col-

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 云南省科技厅应用基础研究计划青年项目(2015FD005); 云南大学“东陆中青年骨干教师”培养计划项目(WX069051)

第一作者简介: 张童(1985-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 讲师, 研究方向: 结构工程。E-mail: zt342138178@163.com。

umns is only poor in the late stage of seismic action when the hoop spacing is large. The larger the number of dry and wet cycles, the weaker will be the bearing capacity of the textile reinforced concrete columns and the seismic performance of the reinforced concrete columns. In a chloride environment, the corrosion resistance of the textile reinforced concrete columns can be increased to improve the seismic performance. Appropriately increasing the number of textile layers and reducing the hoop spacing can improve the seismic performance of the textile reinforced concrete columns.

Keywords: seismic action; textile; reinforced concrete; cracking load; seismic performance

0 引言

加固钢筋混凝土有助于改善建筑老化状态、提高建筑使用寿命,有效提升建筑抗震性能^[1]。纤维编织网增强钢筋混凝土是一种使用频率较高的加固方式,建筑施工初期,采用纤维编织网与钢筋混凝土混合形成纤维编织网增强钢筋混凝土柱^[2],其优势是:第一,采用纤维编织网增强后的钢筋混凝土力学性能得到优化,开裂荷载有所提升,地震承载力和承载极限有所上升^[3];第二,采用锚固厚度替代传统混凝土保护层,令纤维编织网增强钢筋混凝土柱的大小不发生变化;第三,纤维编织网增强钢筋混凝土柱的黏结性较优,抗裂性与抗腐蚀性突出,可在腐蚀环境严重的氯盐环境中使用,增加建筑的抗震性能^[4]。

基于纤维编织网增强钢筋混凝土柱诸多优点,国外专家研究钢筋混凝土柱的抗震性能通过抗剪承载力体现,理论结合实际数据,得到钢筋混凝土柱抗剪承载力模型,以详细分析纤维编织网增强后钢筋混凝土柱的抗震性能。国内专家研究了剪跨比、轴压比对钢筋混凝土柱抗震性能的影响,分析截面形式差异对抗震性的影响。有关地震作用下钢筋混凝土柱的抗震性能,MELE^[5]提出屋盖柔性成型钢筋混凝土网壳结构设计,介绍了作为 Nest Hilo 项目的一部分,于 2016 年在瑞士 D_Bendorf 建造的柔性成型网状强化夹芯壳体屋顶的几何结构参数与设计。设计过程包括一个用于壳体多目标进化形状优化的综合参数模型,以及对其非线性行为的分析。XING 等^[6]基于恒幅试验数据,提出了一种循环和拟动力试验评估钢筋混凝土柱的累积地震疲劳的损伤模型,对钢筋混凝土柱的累积地震损伤进行系统的试验研究,制作了 14 根相同的大型混凝土柱,进行了破坏试验。试验分两个阶段进行:第一阶段试验包括表征单调力变形行为的基准试验和确定典型受弯柱低周疲劳特性的等幅试验;第二阶段涉及在一系列不同持续时间和震级的地震下对混凝土柱进

行测试。纵向钢筋的低周疲劳和约束环断裂导致的约束失效是第一阶段的主要失效模式。

结合前人研究经验,本文为突出纤维编织网增强钢筋混凝土柱抗腐蚀性能,从正常环境与氯盐干湿循环两个方面对比研究,为改善建筑结构抗老化性能、提升建筑抗震性能提供科学分析依据。

1 纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能分析

为分析纤维编织网增强钢筋混凝土柱抗震性能,进行了地震作用实验模拟。从正常环境与氯盐干湿环境两个角度分析纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能^[7],构建了两种实验环境。正常环境与氯盐干湿环境分别使用 8 根和 4 根纤维编织网增强钢筋混凝土柱。310 mm×310 mm 是柱身截面大小,1 850 mm、3.8 分别为纤维编织网增强钢筋混凝土柱的高度和剪跨比。实验采用的试件均符合《建筑抗震设计规范》,设计的纤维编织网增强钢筋混凝土柱尺寸如图 1 所示。

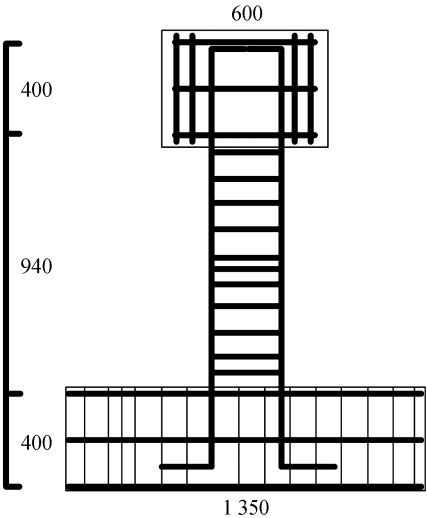


图 1 纤维编织网增强钢筋混凝土柱尺寸(单位:mm)

Fig.1 Size of the textile reinforced concrete column (Unit: mm)

1.1 试件材料简介

1.1.1 混凝土配比

徐州某混凝土公司提供实验所需的混凝土材料,混凝土属于 C42 等级,表 1 描述了 C42 混凝土配比情况。

表 1 C42 混凝土配比

Table 1 Proportion of concrete C42	
材料名称	配比值/(kg·m ⁻³)
水泥	318
水	168
天然砂	654
碎石	1075
粉煤灰	48
矿粉	98
外加剂	8.5

根据以上混凝土配比情况制作 8 个纤维编织网增强钢筋混凝土柱用于正常测试环境,制作 4 个纤维编织网增强钢筋混凝土柱用于氯盐干湿环境测试。

1.1.2 钢筋力学指标

纤维编织网增强钢筋混凝土柱柱身、柱底座、柱头分别采用 8Φ14、8Φ16、8Φ8 的钢筋,将 8Φ8 作为箍筋。通过拉力测试机测得钢筋拉伸力学指标如表 2 所示。

表 2 钢筋力学指标结果

Table 2 Mechanical indexes of reinforcing bar			
钢筋种类	8Φ14	8Φ18	8Φ8
屈服应力/MPa	452	376	314
抗拉强度/MPa	586	560	485
延伸率/%	27.00	27.72	26.16
使用方式	纵筋	纵筋	箍筋

1.1.3 碳纤维束横向力学指标

碳纤维束和玻璃纤维束为纤维编织网增强钢筋混凝土柱试件柱的主材,两种纤维编制混合形成编织网,受力方向施加给碳纤维束,玻璃纤维束负责固定,编制纤维网的纤维束间距为 11 mm×11 mm。为保障纤维编织网增强钢筋混凝土柱具备良好的力学性能,延长其使用寿命^[8-9],在编织网投入使用之前以胶为中介黏泥沙。表 3 为碳纤维束横向力学指标。

表 3 碳纤维束横向力学指标

Table 3 Transverse mechanical indices of carbon fiber bundles	
纤维种类	T700S
单束纤维丝数量	13 000/根
抗拉强度	4 100/MPa
弹性模量	181/GPa
应变最大值	2.2/%
理论面积	0.46/mm ²
单位长度质量	812/(g·km ⁻¹)
密度	1.67/(g·cm ⁻³)

根据以上材料浇筑纤维编织网增强钢筋混凝土柱,在此期间,不对 A1 试件进行纤维编织网加固,A2 施加 1 层纤维编织网加固,A3 施加 2 层纤维编织网加固,A4 施加 3 层纤维编织网加固。

1.2 地震作用加载

1.2.1 加载监测

采用压力传感器、应变片、位移计测得纤维编织网增强钢筋混凝土柱在地震加载作用下纤维编织网增强钢筋混凝土柱的压力和变形情况,数据采集由 GBD3816 静态采集仪完成^[10]。为纤维编织网增强钢筋混凝土柱 4 个立面分别布置 4 个混凝土应变片,横向与纵向应变分别由左右、前后应变片测得;轴向与横向位移由位移计测量得到。地震作用加载通过电液伺服加载系统完成,50 t、100 t 分别是水平与垂直方向施加力的大小,分别采用水平作动器、横梁配合液压千斤顶完成地震作用施加。垂直力施加过程中,横梁与地面地梁的连接中介为 2 根螺杆,确保轴向力不发生改变。同时,以 U 形方式固定纤维编织网增强钢筋混凝土柱的上端与横梁,使纤维编织网增强钢筋混凝土柱发生改变时横梁保持不动^[11-12]。

1.2.2 地震作用加载制度

采用预设值作为轴向力进行施加,并维持该值不变,此为施加低周往复荷载的前提条件^[13]。力-位移混合的控制模式是地震作用力加载的主要模式,钢筋屈服前后的控制因素分别为力和位移,荷载力增加幅度为 4 kN 每级,循环 1 次。通过滞回曲线与钢筋应变判断钢筋是否处于屈服状态,屈服表现为荷载-位移关系由线性向曲线的转变,且柱底部钢筋应变屈服^[14]。循环 3 次条件的每级位移增加 1 倍屈服位移,纤维编织网增强钢筋混凝土柱荷载减少至荷载最大值的 84.5%时判断试件损坏,可停止加载,总结地震作用加载制度如图 2 所示。

1.3 氯盐干湿环境设置

配备质量分数为 5.2%的氯化钠溶液,将纤维编织网增强钢筋混凝土柱试件浸泡在溶液中,时长为 10 小时,取出后晒干。采用风扇加速试件晒干效率,由此完成一个过程循环。依据实验需要完成多个循环后,进行地震作用加载,以研究氯盐干湿环境中纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能。

2 实验分析

氯盐干湿循环下纤维编织网增强钢筋混凝土柱试件参数分别列于表 4。

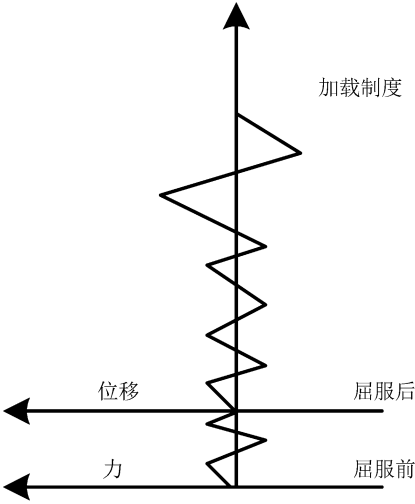


图 2 地震作用加载制度
Fig.2 Seismic loading regime

表 4 氯盐干湿循环下试件参数

Table 4 Specimen parameters under wet-dry cycling of chloride salts

混凝土柱 编号	混凝土柱 主材	持续荷载 应力比	氯盐干湿 循环次数
B1	高品质混凝土	0	0
B2	高品质混凝土	0	65
B3	高品质混凝土	0	95
B4	高品质混凝土	0	125

2.1 纤维编织网层数对纤维编织网增强钢筋混凝土柱加固效果影响

地震作用下形成低周往复荷载状态,不间断、按顺序连接相同方向中每次反复加载的荷载最大值点,得到骨架曲线,试件的承载力、刚度、强度、延性变化均可从中体现^[15]。采用图3所示的条形图描

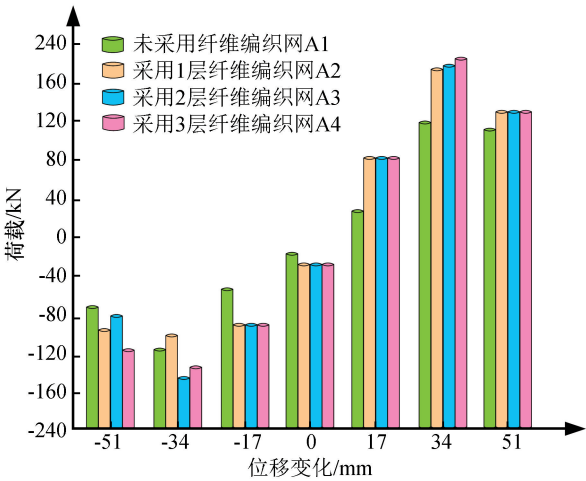


图 3 不同加固层数试件骨架线趋势描述

Fig.3 Trend description of skeleton line of specimens with different reinforcement layers

述实验中骨架线趋势,地震作用下正常环境中不同试件测试结果列于表 5、表 6。图表中“+”、“-”分别表示推力和拉力,表中试件截面屈服时对应的荷载、试件所能承受的最大水平荷载、0.845 倍峰值荷载分别用屈服荷载、峰值荷载、破坏荷载表示。

表 4 地震作用下正常环境中不同试件测试结果 1

Table 4 Test results of different specimens in normal environment under earthquake action (1)

试件名称		A1		A2	
屈服位置	屈服荷载/kN	122.97	-92.22	119.57	-84.11
	位移变化/mm	19.92	-17.86	12.67	-10.03
峰值位置	峰值荷载/kN	129.99	-108.78	143.12	-100.07
	位移变化/mm	27.34	-27.7	23.15	-21.5
破坏位置	破坏荷载/kN	109.84	-91.91	120.94	-84.56
	位移变化/mm	23.10	-23.41	19.56	-18.17
延性系数	均值	3.28		4.88	
	增加量/%	0		51.58	
耗能累加量/(kN·mm ⁻¹)		37 778.79		49 674.63	

表 5 地震作用下正常环境中不同试件测试结果 2

Table 5 Test results of different specimens in normal environment under earthquake action (2)

试件名称		A3		A4	
屈服位置	屈服荷载/kN	117.98	-98.53	124.19	-93
	位移变化/mm	13.99	-9.62	13.64	-12
峰值位置	峰值荷载/kN	146.93	-114.66	152.78	-115.01
	位移变化/mm	35.28	-30.02	31.19	-35.88
破坏位置	破坏荷载/kN	124.16	-96.89	129.10	-97.18
	位移变化/mm	29.81	-25.37	26.36	-30.32
延性系数	均值	3.79		4.37	
	增加量/%	17.19		35.49	
耗能累加量/(kN·mm ⁻¹)		28 196.3		72 979.5	

分析图 3、表 4、表 5 可看出,采用纤维编织网加固的混凝土柱与未采用纤维编织网加固的混凝土柱相比,在地震作用下,两者屈服荷载不存在显著差异,而采用纤维编织网加固的钢筋混凝土柱开裂荷载显著提升。数据显示,纤维编织网层数对开裂荷载的作用不显著,处于较小状态;随纤维编织网层数的增加,纤维编织网增强钢筋混凝土柱荷载最大值逐步增加,与未采用纤维编制网加固的混凝土柱相比,A2、A3、A4 的荷载最大值分别增加 10.10%、13.03%、17.53%,值得注意的是提升的幅度不大。另外,荷载最大值达到一定高度时,不会继续增加。由此可知,纤维编织网有效遏制地震作用下混凝土柱裂缝状况,具有一定的抗震效果;但是纤维编织网缓解荷载最大值的能力有限,纵筋是承受荷载力的主体。

图中不同纤维编织网增强钢筋混凝土柱试件在地震作用下呈现差异性斜率,由荷载最大值前的斜

率发展情况可知,未采用纤维编织网的增强钢筋混凝土柱刚度原始值在 A2、A3、A4 试件之下,这是因为采用纤维编织网后纤维编织网增强钢筋混凝土柱存在一定的刚度,且纤维编织网增强钢筋混凝土柱的刚度原始值不受纤维编织网层数的影响。

2.2 配箍间距对纤维编织网增强钢筋混凝土柱加固效果影响

地震作用下,不同配箍间距纤维编织网增强钢筋混凝土柱的骨架线趋势描述见图 4。

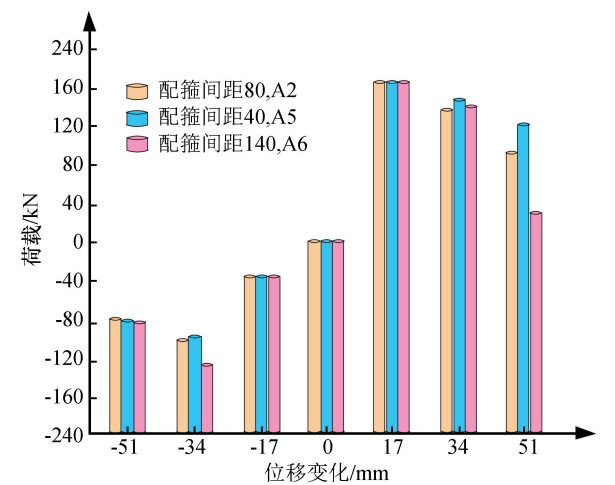


图 4 不同配箍间距试件骨架线趋势描述
Fig.4 Trend description of skeleton line of specimens with different stirrup spacing

表 6 地震作用下正常环境中不同试件测试结果 3

Table 6 Test results of different specimens in normal environment under earthquake action (3)

试件名称		A5		A6	
屈服位置	屈服荷载/kN	122.79	-98.26	119.14	-98.88
	位移变化/mm	11.33	-9.12	12.79	-10.76
峰值位置	峰值荷载/kN	148.11	-112.63	141.96	-120.42
	位移变化/mm	36.26	-34.2	30.79	-28.52
破坏位置	破坏荷载/kN	125.15	-95.17	119.96	-101.75
	位移变化/mm	30.64	-28.90	26.016	-24.10
延性系数	均值	4.97		3.89	
	增加量/%	33.17		2.99	
耗能累加量/(kN·mm ⁻¹)		53 861.38		39 866.45	

结合表 4、表 6 与图 4 能够看出,纤维编织网增强钢筋混凝土柱试件 A2、A5、A6 三者开裂荷载基本一致,所以试件的开裂荷载不受配箍间距的影响。A2、A5、A6 峰值荷载、屈服荷载大致吻合,所以试件的屈服荷载、峰值荷载不受配箍间距的影响。骨架线趋势显示,经过峰值荷载后,A5 试件的承载力呈现逐渐降低趋势,同时 A6 试件承载力下降趋势较陡,可证明在地震作用下,位移加载后期阶段,配箍间距对试件抗震性能影响比较显著;另外,配箍间距与承载力、延性成正比,当配箍间距较小时,试件

的延性与承载力较差,承载力下降趋势显著。

2.3 氯盐干湿循环对纤维编织网增强钢筋混凝土柱加固混凝土柱效果影响

氯盐干湿循环地震环境中,不同循环次数纤维编织网增强钢筋混凝土柱的荷载-应变状态如图 5 所示。

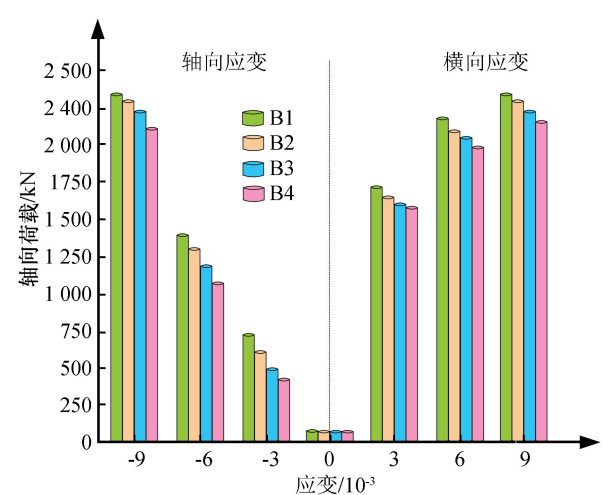


图 5 荷载-应变状态
Fig.5 Load-strain state

分析图 5 能够看出,在氯盐干湿循环环境中,地震作用下,干湿循环次数增加,试件横向应变最大值与轴向应变最大值呈显著降低趋势,主要表现为:正常环境下的纤维编织网增强钢筋混凝土柱比干湿循环次数为 95 的横向应变最大值高 11.13%;进行 65、95、125 次干湿循环的纤维编织网增强钢筋混凝土柱的承载力相比正常环境有所减少,减少幅度为上升趋势。分析原因可知,氯盐干湿循环环境中,氯离子沿着混凝土的缝隙传输,深入到纤维编织网增强钢筋混凝土柱内部以及各个部位,经过干湿交替操作后形成对流效应,对流作用主要区域和纤维编织网加固位置相似,在混凝土浅层 4.5~14.5 mm 左右,由于混凝土中含有碳酸氢钙和水化碳酸等物质,和氯离子相互作用产生固相化合物水合氯铝酸钙,混凝土中的 C—S—H 凝胶结构遭该物质结晶破坏形成内部微小裂缝,因此纤维编织网加固层受到破坏;干湿循环次数不断增加后,混凝土中的氯离子数量增多、混凝土内部裂缝剧增,导致纤维编织网增强钢筋混凝土柱承载力降低,相对而言,干湿循环 60 次次数较少,对混凝土内部的损伤较小,纤维编织网增强钢筋混凝土柱的荷载最大值减少趋势较慢。

3 结论

加固钢筋混凝土有助于提升建筑抗震性能,为了解地震作用下纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能,采用浇筑纤维编织网增强钢筋混凝土柱,并进行低周反复荷载试验,测试加固后混凝土柱的抗震性能,得到以下结论:

(1) 通过研究纤维编织网层数对纤维编织网增强钢筋混凝土柱加固效果影响可知,采用纤维编织网加固的试件屈服荷载无显著变化,而开裂荷载显著增加,因此纤维编织网可增强钢筋混凝土柱的抗震性能。纤维编织网层数对开裂荷载的作用不显著,对荷载峰值影响显著,随纤维编织网层数的增加,峰值荷载呈显著上升趋势。由此可知,纤维编织网层数越多,纤维编织网增强钢筋混凝土柱承载能力越强,抗震性能越好。

(2) 研究配箍间距差异对纤维编织网增强钢筋混凝土柱加固效果影响可知,试件的开裂荷载、峰值荷载、屈服荷载基本不受配箍间距的影响,地震作用的后期,试件承载力下降趋势较陡,配箍间距对试件抗震性能影响逐渐显露。因此,配箍间距较大时,纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能只有在地震作用的后期呈现较差状态。

(3) 研究氯盐干湿循环对纤维编织网增强钢筋混凝土柱加固混凝土柱效果影响能够看出,干湿循环次数越多、纤维编织网增强钢筋混凝土柱承载力越弱,抗震性能越差。

综上所述,采用纤维编制网增强钢筋混凝土柱过程中,在合理范围内适当增加纤维编织网的数量、降低配箍间距有利于提升纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗震性能。对于氯盐环境而言,可增加纤维编织网增强钢筋混凝土柱的抗腐蚀措施改善抗震性能。

参考文献(References)

[1] 赵桂峰,马玉宏,崔秀丽.钢筋混凝土框架填充墙隔震建筑抗震性能影响因素分析[J].地震工程与工程振动,2017,1(1):93-102.
ZHAO Guifeng, MA Yuhong, CUI Xiuli. Influence Factors Analysis of Seismic Property for RC Frame Isolated Buildings with Infill Walls[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 1(1): 93-102.

[2] 曹亮,张海燕,吴波.纤维编织网增强地聚物砂浆加固钢筋混凝土梁受剪性能研究[J].工程力学,2019,36(1):210-218.
CAO Liang, ZHANG Hai-yan, WU Bo. Shear Behavior of RC

Beams Strengthened with Textile Reinforced Geopolymer Mortar[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 210-218.

[3] 张勤,邴鹏,韦宗延,等.考虑变形影响的钢筋混凝土圆柱受剪承载力计算模型[J].重庆大学学报:自然科学版,2017,40(11):72-82.
ZHANG Qin, BING Peng, WEI Zongyan, et al. Shear Strength Model Including the Effects of Deformation for the Circular Reinforced Concrete Columns[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2017, 40(11): 72-82.

[4] 李振宝,崔燕伟,宋坤,等.双向受压下钢筋混凝土框架节点抗剪承载力计算方法[J].工程力学,2019,36(1):178-185.
LI Zhengbao, CUI Yanwei, SONG Kun, et al. Shear Capacity Calculation Method of Panel Zone in Reinforced Concrete Frame under Bidirectional Loading[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 178-185.

[5] MELE T V. Structural Design of the Flexibly Formed, Mesh-reinforced Concrete Sandwich Shell Roof of NEST Hilo[J]. Journal of the International Association for Shell & Spatial Structures, 2017, 58(1): 23-38.

[6] XING G, OZBULUT O E, LEI T, et al. Cumulative Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Columns Through Cyclic and Pseudo-dynamic Tests[J]. Structural Design of Tall & Special Buildings, 2017, 5(26): 124-129.

[7] 成宏,唐寿高.钢筋混凝土结构非线性的可靠性评估[J].太原理工大学学报,2017,48(4):657-662.
CHENG Hong, TANG Shougao. Reliability Evaluation of Non-linearity for Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(4): 657-662.

[8] 孙传智,乔燕,王振波,等.HDPF加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木建筑与环境工程,2017,39(3):83-91.
SUN Chuanzhi, QIAO Yan, WANG Zhenbo, et al. Seismic Behavior of Reinforced Concrete Column Strengthened with HD-PF[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2017, 39(3): 83-91.

[9] 党争,梁兴文,党王桢,等.纤维增强混凝土框架-剪力墙结构地震反应及易损性分析[J].建筑结构学报,2016,37(10):54-64.
DANG Zheng, LIANG Xingwen, DANG Wangzhen, et al. Seismic Response and Fragility Analysis of Fiber-reinforced Concrete Frame-shear Wall Structure[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 54-64.

[10] 皮景坤,朱君卿.轨道交通简支梁钢筋混凝土圆墩地震反应分析[J].都市轨道交通,2016,29(3):75-80.
PI Jingkun, ZHU Junqing. Seismic Responses of Reinforced Concrete Circular Pier for Rail Transit Simply Supported Beam[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(3): 75-80.

[11] 蒋友宝,吴林华,陈治茂.配有RPC预制管混凝土组合柱的RC框架抗震性能分析[J].材料导报,2017,31(23):90-95.
JIANG Youbao, WU Linhua, CHEN Zhimao. Seismic Performance Analysis for RC Frames with Concrete-filled Pre-cast RPC Tubular Columns [J]. Materials Review, 2017, 31(23): 90-95.

建筑结构,2017,47(S1):578-582.

YAO Xinqiang, SUN Baitao, CHEN Yukun, et al. Study on Distribution of Seismic Capacity of Tianjin Rural Residence [J]. Building Structure, 2017, 47(S1): 578-582.

[13] 丁声荣,霍艳华.混凝土结构建筑物抗震加固强度测试仿真[J].计算机仿真,2017,34(8):429-432.

DING Sheng rong, HUO Yan hua. Strength Test and Simulation of Seismic Strengthening of Concrete Structures[J]. Computer Simulation, 2017, 34(8): 429-432.

[14] 吴帮,申波,马克俭,等.U形钢板-混凝土组合空腹夹层板在多遇地震作用下的抗震性能分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(2):117-122.

WU Bang, SHEN Bo, MAKEjian, et al. Analysis on Seismic Behavior of U-shaped Steel Plate-Concrete Composite Open-web Sandwich Slab Structure under the Frequent Seismic Action[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2016, 33(2): 117-122.

[15] 张树生,尹鹏,罗云龙.上部钢结构、下部混凝土结构组成的竖向混合结构体系的抗震设计[J].工程建设,2016,48(4):32-39,55.

ZHANG Shusheng, YIN Peng, LUO Yunlong. Seismic Design of Vertical Composite Structure System with the Upper Steel Structure and Lower Concrete Structure[J]. Engineering Construction, 2016, 48(4): 32-39, 55.

(上接第 62 页)

[12] 陈雷,卢小雨.碳纤维编织网增强混凝土梁正截面承载力计算[J].结构工程师,2015,31(1):182-185.

CHEN Lei, LU Xiaoyu. Calculation of the Ultimate Bearing Moment of Textile Reinforced Concrete Beam with Carbon Fiber[J]. Structural Engineers, 2015, 31(1): 182-185.

[13] 郝翔,刘英达.疲劳载荷下钢管混凝土强度预测模型仿真分析[J].计算机仿真,2017,34(3):361-364.

HAO Xiang, LIU Ying-da. Strength of Concrete Filled Steel Tube under Fatigue Load Prediction Model Simulation Analysis[J]. Computer Simulation, 2017, 34(3): 361-364.

[14] 徐超,温增平.基于地震动参数的 RC 框架结构易损性分析[J].地震工程学报,2016(2):201-211.

XU Chao, WEN Zeng-ping. Seismic Vulnerability Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures Based on Ground Motion Parameters[J]. 地震工程学报, 2016(2): 201-211.

[15] 张鹏,王艺环,秦国晋.非随机过程的地震激励下埋地压力管道的非概率可靠性分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):134-141.

ZHANG Peng, WANG Yihuan, QIN Guojin. Non-probabilistic Reliability Analysis of Buried Pressure Pipeline Under Non-random Process Earthquake Excitation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6): 134-141.