

引用本文:赵 军,王培培,冯益博,等. 配置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):23-31.
ZHAO Jun,WANG Pei-pei,FENG Yi-bo,et al. Experiment on Seismic Performance of CFRP Reinforced Concrete Column with MRD[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering,2020,37(4):23-31.

DOI:10.19815/j.jace.2019.10019

配置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱抗震性能试验

赵 军¹,王培培¹,冯益博¹,张香成²,阮晓辉²

(1. 郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 力学与安全工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:为探讨磁流变阻尼器(MRD)对碳纤维增强复合材料(CFRP)筋混凝土柱抗震性能的影响,完成了 1 个普通钢筋混凝土柱和 2 个外置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱的水平低周反复荷载试验,其中 MRD 的电流分别为 150 mA 和 80 mA,研究了不同电流的 MRD 对 CFRP 筋混凝土柱的破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、耗能能力、残余变形等的影响以及其与普通钢筋混凝土柱的性能区别。结果表明:与钢筋混凝土柱相比,设置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱裂缝较为分散且发展高度较高,极限变形增大,滞回曲线更加饱满,承载力更高,耗能能力明显提升,能量耗散系数可提高 104.9%,而且在合理的使用方式下残余位移大幅度减小,最多可减小 76.66%,拥有较好的自复位能力;同时 MRD 的电流大小对 CFRP 筋混凝土柱抗震性能影响较大;相较于配置 80 mA 的 MRD 混凝土柱,配置 150 mA 的 MRD 混凝土柱的承载能力和耗能能力更高,能量耗散系数可以提高 28.61%,且在加载过程刚度始终较大;不同电流下的 MRD 混凝土柱破坏模式相同,且在该使用方式下的 MRD 对残余变形的影响也较小。

关键词:CFRP 筋;混凝土柱;磁流变阻尼器;电流;抗震性能;自复位

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)04-0023-09

Experiment on Seismic Performance of CFRP Reinforced Concrete Column with MRD

ZHAO Jun¹, WANG Pei-pei¹, FENG Yi-bo¹, ZHANG Xiang-cheng², RUAN Xiao-hui²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: In order to study the effect of magnetorheological damper (MRD) on seismic performance of concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced plastics(CFRP), a low-cycle and reverse horizontal loading test was completed for one ordinary reinforced concrete column and two CFRP reinforced concrete columns with MRD, the currents of MRD were 150 mA and 80 mA, respectively. The influence of MRD with different currents for the CFRP reinforced concrete columns on the failure modes, hysteretic curves, skeleton curves, stiffness degradation, energy dissipation capacity, residual deformation and the performance differences between reinforced concrete column and CFRP reinforced concrete column with MRD were

收稿日期:2019-10-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFE0125600);教育部创新团队发展计划项目(IRT_16R67)

作者简介:赵 军(1971-),男,河南漯河人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhaoj@zzu.edu.cn.

通信作者:王培培(1994-),女,河南安阳人,工学硕士研究生,E-mail:2457994707@qq.com.

studied. The results show that compared with reinforced concrete column, CFRP reinforced concrete columns with MRD have relatively dispersed cracks and a higher development height, the ultimate deformation increases, the hysteretic curve is fuller, the bearing capacity is higher and the energy dissipation capacity is significantly improved, the energy dissipation coefficient is increased by 104.9%, moreover the residual displacement is greatly reduced in the reasonable way, up to 76.66% reduction, satisfactory self-centering capacity is shown. Simultaneously, the current of MRD has a great influence on the performance of CFRP reinforced concrete columns. Compared with the concrete column equipped with the MRD of 80 mA, the 150 mA MRD concrete column has higher bearing capacity and energy dissipation capacity, the energy dissipation coefficient is increased by 28.61% and its stiffness is always greater during loading, the initial stiffness is greater. The failure mode of concrete columns with MRD under different currents is the same, and the influence of MRD on the residual deformation is less in this way.

Key words: CFRP bar; concrete column; MRD; current; seismic performance; self-centering

0 引言

长期以来,中国工程设计遵循三水准抗震设防目标和两阶段的设计方法^[1]。由于地震作用的不确定性,会使结构构件严重受损,有些即使没有倒塌也难以修复,只能推倒重建,造成了巨大的经济浪费^[2]。2009年1月“可恢复功能城市”作为地震合作工程的大方向首次被提出^[3],至现在为止,可恢复功能结构已经成为地震工程中的热点研究方向。

碳纤维增强复合材料(CFRP)筋具有较高的抗拉强度和弹性模量,且具有轻质、耐腐蚀、应力-应变曲线呈线弹性等特点^[4],因此 CFRP 筋材可用于混凝土结构中以实现结构的可恢复功能。Sharbatdar 等^[5-6]进行了 CFRP 筋混凝土柱的低周反复试验,研究结果发现轴压比和体积配箍率对试件变形能力有很大影响,减小箍筋间距有利于减小结构的残余位移。赵军等^[7]将 CFRP 筋材用于剪力墙结构中,发现 CFRP 筋混凝土剪力墙裂缝发展范围更大,自复位效果更好,但是滞回曲线饱满程度有所降低。江世永等^[8]制作了 6 个不同轴压比和剪跨比的 CFRP 筋混凝土柱,试验结果表明 CFRP 筋混凝土柱承载能力较强,但是耗能能力较弱,滞回曲线不饱满。龚永智等^[9]设计制作了 4 个 CFRP 筋混凝土柱,试验结果显示轴压比和体积配箍率是影响其抗震性能的重要因素,CFRP 筋柱残余变形较小,但滞回曲线呈捏缩现象。王旭阳^[10]制作了 2 个 RC 柱和 5 个 CFRP/钢筋混合配筋柱,研究表明混合配筋柱会减少残余位移,但其中较少的 CFRP 筋会导致柱的过早破坏,影响整体耗能能力。

磁流变阻尼器(MRD)的能耗低,出力大,响应

速度快,可调节范围广,是一种优秀的半主动控制器^[11]。Yang^[12]在徐赵东的 Sigmoid 模型^[13]和 Spencer 的微分方程模型^[14]等众多模型基础上进行了详细性能试验和力学模型分析。沙凌锋等^[15]研究磁流变液的本构关系和磁流变阻尼器的阻尼力模型,论述了磁流变阻尼器的构造与磁路的设计方法。张香成等^[16]通过数值模拟发现了对阻尼力影响最大的参数依次为:活塞杆半径、挤压轴轴凸长度、阻尼间隙和活塞有效长度。马然等^[17]通过对阻尼通道内的磁流变液进行流体力学分析,并通过有限元模拟完善了磁流变阻尼器的力学模型。

本文将 MRD 附加在 CFRP 筋混凝土柱上,在 CFRP 筋混凝土柱较高的承载能力和较好的自复位能力的基础上,利用 MRD 的性能来增加其耗能能力,最终实现混凝土柱低残余变形和高耗能能力的目标,将此柱体结构用于结构中可吸收地震能量,减小残余位移。本文主要研究 MRD 电流大小对 CFRP 筋混凝土柱耗能性能和自复位性能的影响并分析其与传统钢筋混凝土柱的区别。

1 试验概况

1.1 试验设计

本文共设计制作了 3 个混凝土方柱,每根方柱由 3 个部分组成,柱顶部是尺寸为 500 mm×400 mm×400 mm 的加载梁,柱身截面尺寸为 300 mm×300 mm,高度为 1 100 mm,柱底为 1 200 mm×400 mm×550 mm 的刚性支座。3 个柱子的编号分别为 RCC,CFRP80 和 CFRP150,其中 RCC 为钢筋混凝土柱,纵筋为 HRB400,作为基准试件。CFRP150 代表纵筋全为 CFRP 筋,磁流变阻尼器电流为 150

mA。CFRP80 代表纵筋全为 CFRP 筋,磁流变阻尼器电流为 80 mA。3 个柱子纵筋直径均为 12 mm。箍筋全部为 HRB400 级,直径 8 mm,间距 50 mm。混凝土保护层厚 25 mm。纵筋配筋率为 1%,体积配箍率为 1.6%,剪跨比为 4。为了保证 CFRP 筋材紧密锚固在混凝土中,将 CFRP 筋端部插入钢管内,在钢管内浇筑高强、无收缩灌浆料,并将钢管焊接在试件两端钢板上。图 1 为试件几何尺寸,图 2 为试件配筋。

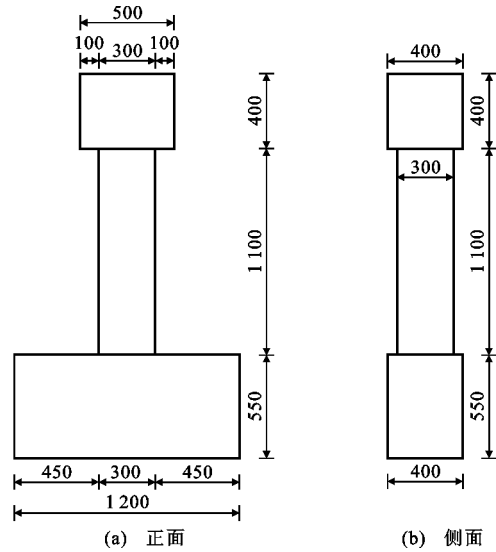


图 1 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of Specimen (Unit:mm)

除了设计制作混凝土柱外,本试验还组装了课题组自主研发的四线圈剪切阀式阻尼器,其阻尼力主要是磁流变液间剪切力。MRD 主要由活塞、钢套筒、间隙及连接件组成,量程为±80 mm,活塞总长 760 mm,活塞挖槽处有序缠绕线圈,钢套筒总长 596.6 mm,外径 150 mm,活塞与钢套筒之间缝隙宽 1 mm,缝隙内灌满磁流变液。图 3 为 MRD 实物图。

1.2 材料性能

根据相关标准^[18-19],实测混凝土及各类筋材的力学性能指标见表 1,2。

采用三角波的形式通过位移控制对 MRD 进行加载,加载速度与混凝土柱的加载速度一致。最终测得 MRD 在电流 I 为 150,80,0 mA 时对应的阻尼力-位移曲线如图 4~6 所示。由图 4~6 可知,MRD 电流为 150 mA 时,其阻尼力基本维持在 60 kN,电流为 80 mA 时,阻尼力基本维持在 30 kN,电流为 0 mA 时,阻尼力最大维持在 6 kN。

1.3 加载方案

本次试验为水平低周反复荷载试验。阻尼器与

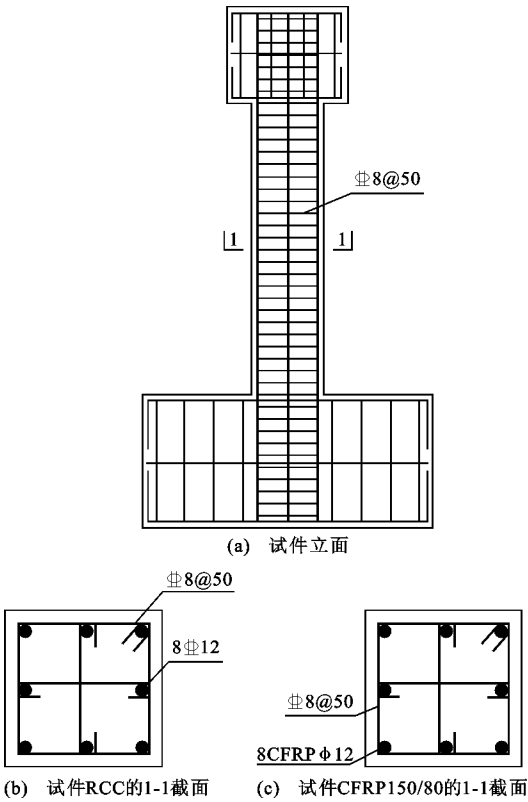


图 2 柱体截面配筋

Fig. 2 Reinforcement of Column Section

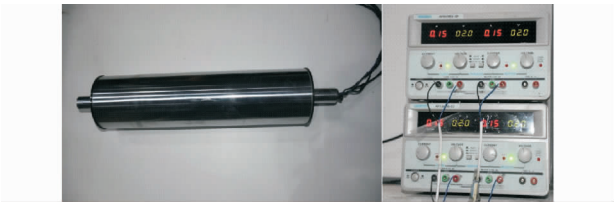


图 3 磁流变阻尼器

Fig. 3 MRD

表 1 混凝土力学性能

Tab. 1 Mechanical Properties of Concrete

f_{cu}/MPa	f_c/MPa	$E_c/10^4 \text{ MPa}$
49.8	37.85	3.45

注: f_{cu} 为混凝土的立方体抗压强度; f_c 为混凝土的轴心抗压强度; E_c 为混凝土的弹性模量。

表 2 筋材性能

Tab. 2 Properties of Bars

筋材类别	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%
HRB400	8	452	640.0	27.3
HRB400	12	433	615.0	27.0
CFRP	12		2 310.3	

柱体的连接方式如下:阻尼器安装在距离柱子基座 860 mm 的高度处。右端的球头底座与 MRD 刚性支架相连,刚性支架与反力架通过高强螺栓相连,保

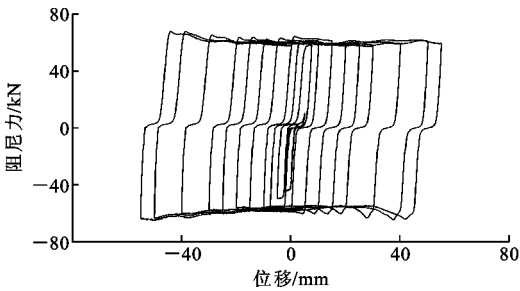


图 4 电流为 150 mA 时的阻尼力-位移曲线
Fig. 4 Damping Force-displacement Curve when Current Is 150 mA

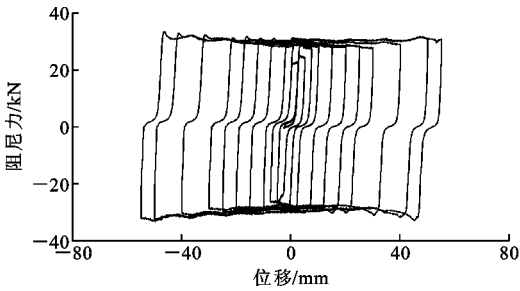


图 5 电流为 80 mA 时的阻尼力-位移曲线
Fig. 5 Damping Force-displacement Curve when Current Is 80 mA

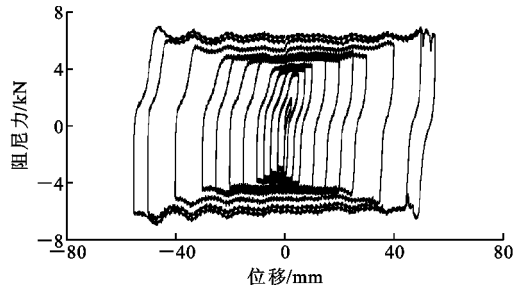


图 6 电流为 0 mA 时的阻尼力-位移曲线
Fig. 6 Damping Force-displacement Curve when Current Is 0 mA

证右端固定。左端的球头底座与钢板相连,2 块钢板通过高强螺杆夹在柱身两边,通过球头调节保证阻尼器处于水平位置且阻尼器的中线与柱身侧面中线相交于一点。阻尼器的耗能原理是:柱体产生层间位移角时带动阻尼器的活塞杆来回运动进而产生阻尼力,增加耗能。加载装置和阻尼器连接见图 7, 8。竖向荷载由竖向液压千斤顶提供,试验时根据轴压比为 0.15 确定并维持竖向荷载 511 kN 不变。千斤顶上端装设有滑道,可使千斤顶随着柱子的变形而移动,从而保证加载位置不变。水平荷载由 500 kN 的液压伺服作动器提供。采用位移控制的加载方式,加载制度见图 9。为了便于区分,定义加载方向以推为正,拉为负。同时阻尼器的使用方法如下:

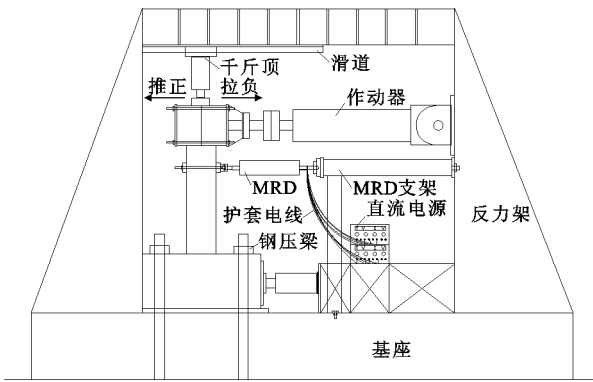


图 7 加载装置
Fig. 7 Loading Setup



图 8 阻尼器与柱体连接图
Fig. 8 Photo of Connection Between MRD and Column

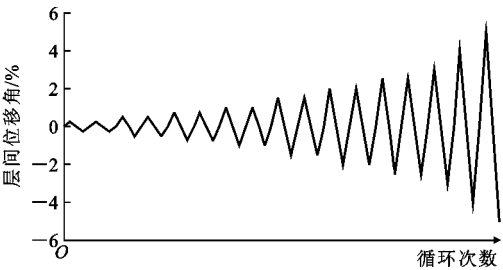


图 9 加载制度
Fig. 9 Loading System

当加载等级有 2 个循环时,第 1 个循环保持电源始终开启,只在第 2 个循环卸载为 0 时关闭电源,待柱顶水平位移计的示数稳定后打开电源再继续加载;当加载等级只有 1 个循环时,与之前第 2 个循环操作一致。

1.4 测量方案

为测得筋材在试验过程中的应变变化,浇筑前在受拉侧和受压侧纵筋及箍筋上均粘贴电阻式应变片。纵筋上应变片的位置分别在距离基座表面 50, 150, 250, 350 mm (550, 750 mm) 高度处,箍筋应变片位置在距离基座表面 100, 200 mm 高度处。为测得各位置处的水平和竖直位移,柱身受拉和受压侧

在距离基座 50,350,650,950 mm 高度处放置竖向位移计 8 个和水平位移计 8 个,同时在柱顶也设置水平位移计 DH0 以便测量柱体的真实位移,且在阻尼器上设置水平位移计 DH10,监测阻尼器的位移变化。应变片和位移计的布置见图 10。

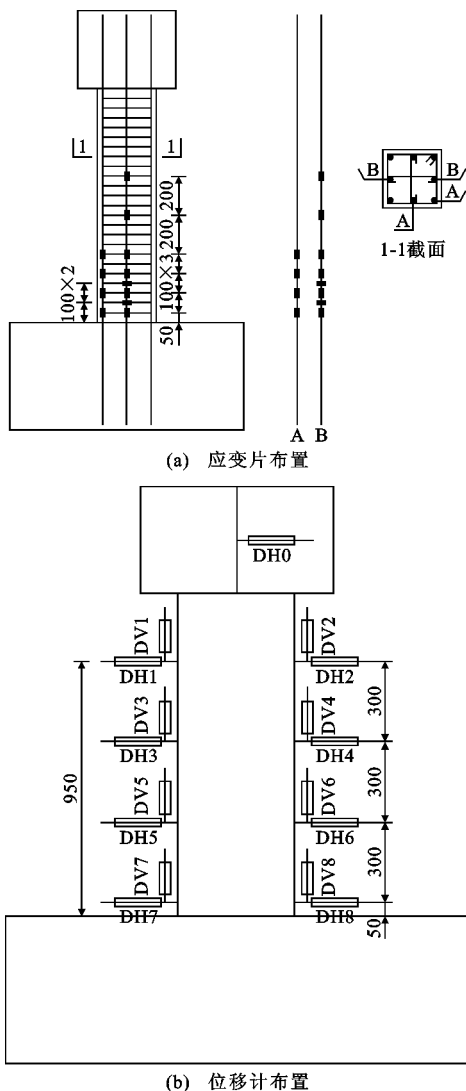


图 10 应变片和位移计布置(单位:mm)

Fig. 10 Arrangements of Strain Gages and Displacement Transducers (Unit:mm)

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

RCC 柱呈现明显的弯曲破坏形态。加载前期柱子受拉侧首先出现水平裂缝,随着加载等级的提高,水平裂缝沿水平方向不断延伸,然后斜向发展,当层间位移角为 1.0% 时,主裂缝贯通,随后柱身左下角出现竖直裂缝,混凝土柱达到峰值荷载,裂缝的长度与宽度持续增加,最终受压区混凝土被压坏,承载力下降,试件破坏。

CFRP150 柱和 CFRP80 柱的破坏模式相似。相较于 RCC 试件,这两者的裂缝发展高度较高,裂缝数量较少,同时裂缝呈现较为分散的现象,最终均表现为与水平方向呈 45° 斜向下发展。在加载前期,试件首先出现水平裂缝。裂缝宽度极小,随着加载进行,从下向上依次出现裂缝。当加载到层间位移角为 2.5% 时,CFRP150 柱出现竖向裂缝,而 CFRP80 柱加载至层间位移角为 2.0% 时,柱底左右侧均出现竖直裂缝。之后混凝土保护层剥落,在加载到层间位移角为 4.0% 时,2 根 CFRP 钢筋混凝土柱均达到峰值荷载,当加载至层间位移角为 5.0% 时,承载力均下降到各自峰值荷载的 85% 左右,试验结束。试验后拨开 2 根柱柱底的混凝土层,露出 CFRP 筋,发现两者均是受压侧 CFRP 筋在距离基座 100~200 mm 位置处发生断裂。试件破坏形态图如图 11 所示。

2.2 滞回曲线

3 个试件的荷载-位移($F-\Delta$)滞回曲线如图 12 所示。整体来看,3 个试件的滞回曲线表现出不同的受力特征。RCC 在层间位移角为 1.5% (水平位移 18.75 mm) 时承载力达到峰值,之后承载力缓慢下降,当加载到层间位移角为 4.0% 时承载力下降到峰值的 85% 左右。与试件 RCC 相比,试件 CFRP150 和 CFRP80 都是在层间位移角为 4.0% 时达到峰值荷载,层间位移角为 5.0% 时承载力下降到峰值的 85% 左右,滞回曲线类似于旗帜形,较为饱满。外设阻尼器的柱子比未设阻尼器的柱子极限变形增大,承载力明显增加,滞回曲线更加饱满,同时由于 MRD 关闭电源,随着阻尼力的消退,使得其残余变形迅速减小。阻尼器的电流大小对柱子的影响比较明显。随着电流的增大,柱的峰值荷载增大,滞回曲线更加饱满,而关闭 MRD 电源之后,CFRP150 和 CFRP80 残余位移相差不大。相比来看,由于 CFRP150 柱安装了 MRD,且 MRD 电流较大,使其拥有较高的承载力、饱满的滞回曲线、较小的残余位移,达到了低残余变形和高耗能能力的目标。

2.3 骨架曲线

骨架曲线是每级加载第 1 次循环的峰值点连成的包络线^[20],见图 13。从图 13 可以看出,在加载初期,3 条骨架曲线基本重合。这是因为此时 3 个试件都处于弹性阶段。随着加载的进行,骨架曲线出现明显的差异,由于阻尼器的加入和电流较大,使得 CFRP150 刚度最大,CFRP80 次之,RCC 刚度最小。

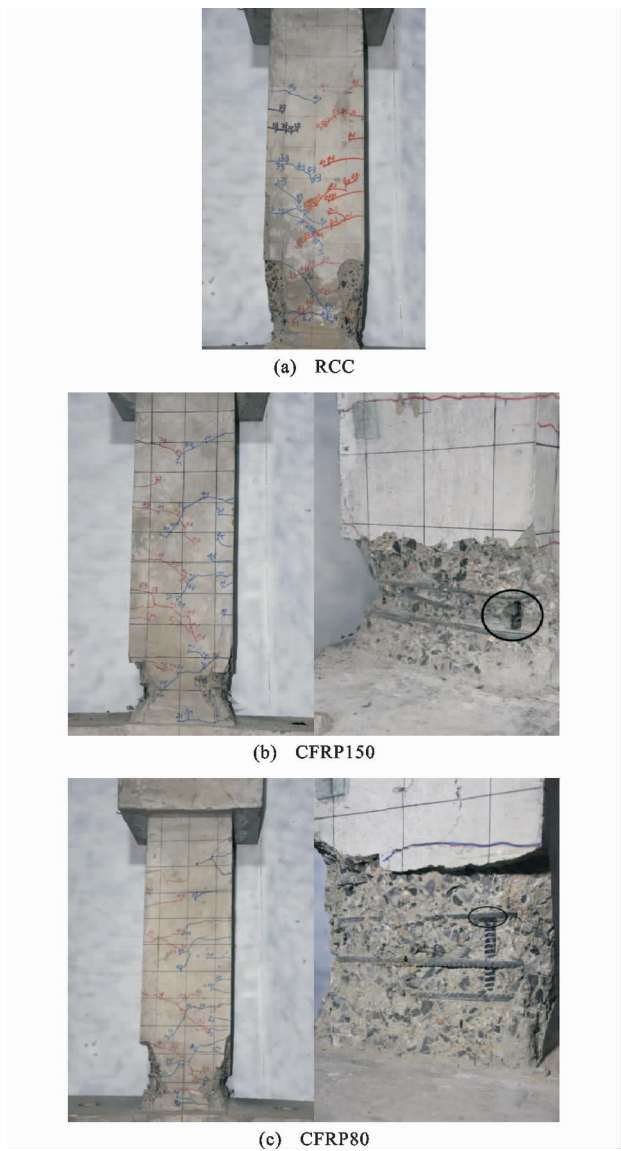


图 11 试件破坏形态

Fig. 11 Failure Modes of Specimens

随着层间位移角的增大,试件 RCC 屈服,骨架曲线达到峰值点,之后开始下降,而试件 CFRP150 和 CFRP80 在经历上升阶段之后出现了近似水平段,骨架曲线呈上升、水平、下降 3 个阶段。对比试件 RCC 和试件 CFRP150,CFRP80 可以看出,钢筋混凝土柱最早达到峰值荷载,随后缓慢下降,待其破坏时,试件 CFRP150 和 CFRP80 仍未达到峰值荷载,这是由于 CFRP 筋的线弹性特点使得承载力呈非线性向上发展,同时由于阻尼器的加入使得承载力得到较大程度的提高。CFRP150 和 CFRP80 的骨架曲线发展趋势是相同的,但 CFRP150 相比于 CFRP80 和 RCC 峰值荷载分别提高了 8.85% 和 53.85%,说明阻尼器电流的大小对承载力有较大影响。

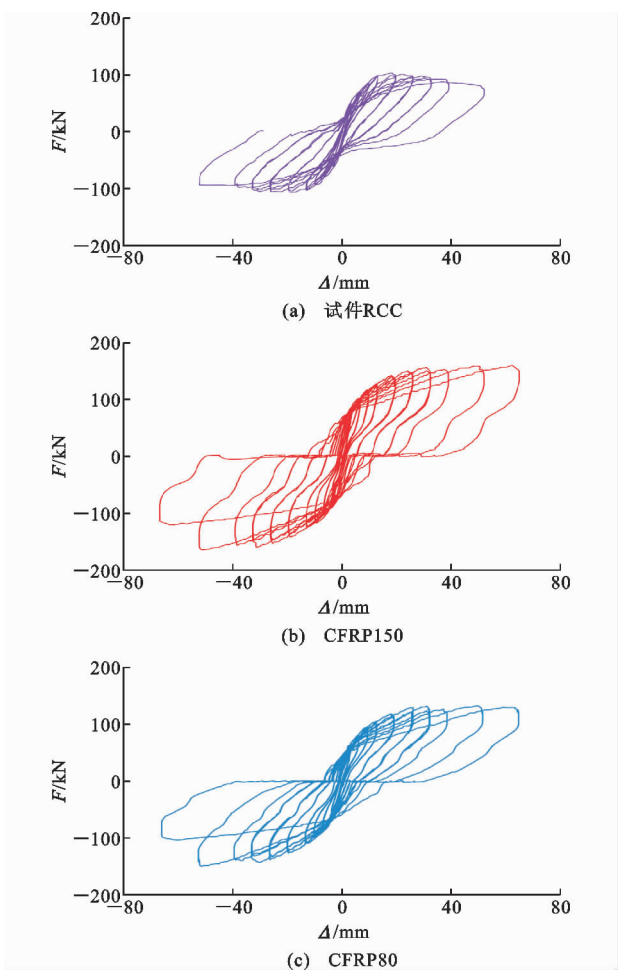


图 12 滞回曲线

Fig. 12 Hysteretic Curves

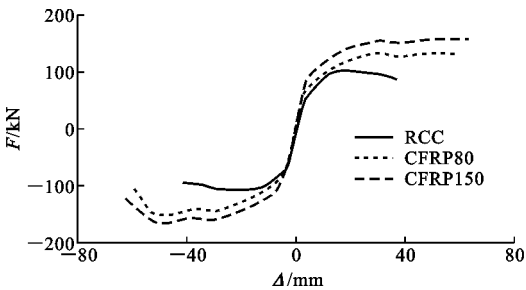


图 13 骨架曲线

Fig. 13 Skeleton Curves

2.4 刚度退化

在水平反复荷载作用下,试件刚度会逐渐减小。试件刚度可用割线刚度 K 表示^[21],采用式(1)计算

$$K = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (1)$$

式中: $+F_i$, $-F_i$ 分别为第 i 次正、反向峰值点的荷载值; $+X_i$, $-X_i$ 分别为第 i 次正、反向峰值点的位移值。

将式(1)计算出的刚度连成曲线即得刚度 K 的

退化曲线,如图 14 所示。3 个试件的刚度退化趋势相似。在加载到层间位移角为 2.0%之前,3 个试件刚度退化明显,随着加载进行,刚度退化速率越来越慢,最终平稳发展。在柱子上增加 MRD,使得 CFRP150,CFRP80 的初始刚度分别比 RCC 大 23.73%,10.27%。说明外设 MRD 对 CFRP 筋混凝土柱的刚度有明显的增强作用。MRD 的电流大小对柱的刚度也有较大影响。由于 CFRP150 的电流较大,CFRP150 的初始刚度比 CFRP80 大 12.21%,且在加载过程中,CFRP150 的刚度始终最大,CFRP80 的刚度次之,RCC 刚度最小。3 个试件残余刚度都比较小,相比各自初始刚度分别降低了 90.01%,90.04%,87.05%。整体来看,附加 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱的刚度退化速率要略大于普通钢筋混凝土柱。

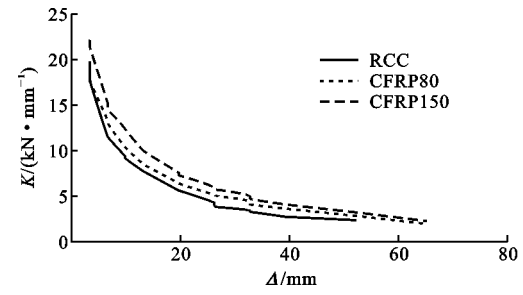


图 14 刚度退化曲线
Fig. 14 Stiffness Degradation Curves

2.5 耗能能力

以试件滞回曲线中滞回环的面积表示耗能能力的大小。图 15 为根据试验数据计算得出的累积耗能曲线。从图 15 可知,在加载到层间位移角为 1.0%之前,3 个试件的累积耗能相差不多,这是因为 3 个试件都处于弹性阶段,阻尼器移动小位移时对耗能的影响不大。随着加载进行,3 个试件累积耗能差距越来越大。附加 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱的耗能增长速率明显高于普通钢筋混凝土柱,这说明 MRD 在大位移下对试件耗能能力的贡献更大。当加载到层间位移角为 4.0%时,试件 RCC 破坏,同等级下 CFRP150 的累积耗能分别比 CFRP80,RCC 的累积耗能增加 28.61%和 61.24%。当加载到层间位移角为 5.0%时,3 个试件全部破坏,CFRP150 的累积耗能分别比 CFRP80,RCC 提高了 27.63%和 104.9%,且在加载过程中 CFRP150 的累积耗能始终最高,CFRP80 次之,RCC 最小。相较于 RCC,外置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱的耗能

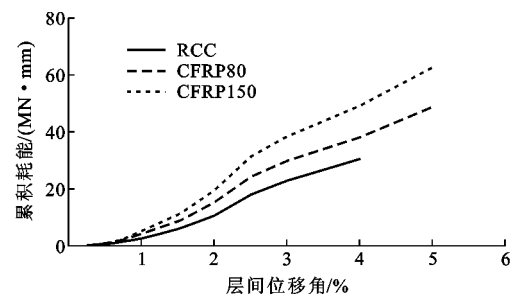


图 15 累积耗能曲线

Fig. 15 Cumulative Energy Dissipation Curves
能力明显提升,且 MRD 电流越大,提高越多。

2.6 残余变形

将 3 个试件每级循环加载后的残余变形绘成曲线,如图 16 所示。通过对比发现在柱体位移较小时 3 个试件尚未屈服,残余变形均较小。随着加载的进行,试件 RCC 逐渐进入塑性阶段,产生了不可恢复的变形,残余变形逐渐增大。在相同加载位移下,与试件 RCC 相比,CFRP150 和 CFRP80 的残余变形较小,这是由于当 MRD 电源关闭,阻尼力大大减小,CFRP 筋的线弹性使得 CFRP 筋混凝土柱的残余变形减小。同时,试件 CFRP150 和 CFRP80 的残余变形相差不大,表明当 MRD 电源关闭时,阻尼器对试件的残余变形几乎没有影响。当加载到层间位移角为 4.0%时,RCC 试件破坏,同等级下 CFRP80,CFRP150 的残余变形分别比 RCC 减小了 75.05%和 76.66%;加载到层间位移角为 5.0%时,3 个试件全部破坏,此时 CFRP80,CFRP150 的残余变形分别比 RCC 减小了 63.12%和 67.14%,且 RCC 的残余变形增长速率远超过设置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱。图 16 直观反映了设置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱的残余变形远远小于普通钢筋混凝土柱,说明阻尼器的合理使用对减小残余变形起到至关重要的作用。这将有助于减小地震作用后结构的震损程度,增加结构的可恢复性。

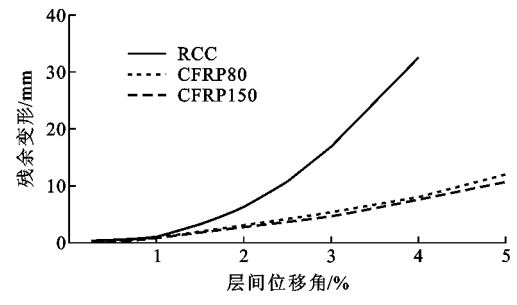


图 16 残余变形曲线

Fig. 16 Curves of Residual Deformation

3 结 语

(1)与普通钢筋混凝土柱相比,外置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱承载力明显提高,且阻尼器电流越大,承载力提高越多。

(2)设置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱相较于普通钢筋混凝土的耗能能力得到明显提高,最高可提高 104.9%。对于 CFRP 筋混凝土柱,MRD 电流越大,耗能能力增幅越大。

(3)在力卸载为 0 时关闭 MRD 电源,CFRP 筋混凝土柱的残余变形得到有效的控制,在试件全部破坏时,相比于普通钢筋混凝土柱,残余变形最高减小 67.14%,说明安装 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱拥有良好的自复位能力。

(4)在相同位移时,普通钢筋混凝土柱的刚度比 CFRP 筋混凝土柱小,而且随着 MRD 电流的增大,CFRP 筋混凝土柱的初始刚度和加载过程中的刚度都有所增大。

(5)在 CFRP 筋混凝土柱上设置 MRD 能够实现抗震结构高耗能能力和低残余变形的要求。

参考文献:

References:

- [1] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010,Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [2] 吕西林,陈云,毛苑君.结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(7):941-948.
LU Xi-lin,CHEN Yun,MAO Yuan-jun. New Concept of Structural Seismic Design: Earthquake Resilient Structures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2011,39(7):941-948.
- [3] PEER. Report of the Seventh Joint Planning Meeting of NEES/E-defense Collaborative Research on Earthquake Engineering[R]. Berkeley:UC Berkeley,2010.
- [4] XUE W C,WANG X H,ZHANG S L. Bond Properties of High-strength Carbon Fiber-reinforced Polymer Strands[J]. ACI Materials Journal,2008,105(1): 11-19.
- [5] SHARBATDAR M K. Concrete Columns and Beams Reinforced with FRP Bars and Grids Under Monotonic and Reversed Cyclic Loading[D]. Ottawa:University of Ottawa,2003.
- [6] SAATCIOGLU M,GRITA M. Seismic Performance and Design of Concrete Columns Confined with CFRP Grids[C]//TENG J G. Proceedings of International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong:Elsevier,2001:1227-1234.
- [7] 赵军,曾令昕,孙玉平,等.高强筋材混凝土剪力墙抗震及自复位性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(3):172-179.
ZHAO Jun,ZENG Ling-xin,SUN Yu-ping,et al. Seismic and Self-centering Behavior of Shear-walls Reinforced with High Strength Bars[J]. Journal of Building Structures,2019,40(3):172-179.
- [8] 江世永,余哈健,姚未来,等.全 CFRP 筋混凝土柱低周反复荷载试验研究[J].四川建筑科学研究,2017,43(3):99-104.
JIANG Shi-yong,YU Han-jian,YAO Wei-lai,et al. Experimental Study on Concrete Columns Reinforced with CFRP Bars Under Low Cyclical Loading[J]. Sichuan Building Science,2017,43(3):99-104.
- [9] 龚永智,张继文,蒋丽忠,等.高性能 CFRP 筋混凝土柱的抗震性能[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(4):1506-1513.
GONG Yong-zhi,ZHANG Ji-wen,JIANG Li-zhong,et al. Aseismic Behavior of Concrete Columns Reinforced with CFRP[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2010,41(4):1506-1513.
- [10] 王旭阳.CFRP 复材筋与钢筋混合配筋混凝土柱抗震性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
WANG Xu-yang. Study on Seismic Performance of Concrete Columns Reinforced by Hybrid Steel and CFRP Rebars[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2016.
- [11] 刘猛,霍林生,李宏男.基于 H_{∞} 理论的磁流变阻尼器半主动容错控制[J].防灾减灾工程学报,2012,32(3):287-293.
LIU Meng,HUO Lin-sheng,LI Hong-nan. H_{∞} Based Semi-active Fault Tolerance Control of Structures Using MR Dampers[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2012,32(3):287-293.
- [12] YANG G. Large-scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modeling Testing and Control[D]. Notre Dame:University of Notre Dame,2001.
- [13] KWOK N M,HA Q P,NGUYEN T H,et al. A Novel Hysteretic Model for Magnetorheological Fluid Dampers and Parameter Identification Using Particle Swarm Optimization[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2006,132(2):441-451.

- [14] SPENCER B F, DYKE S J, SAIN M K, et al. Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(3): 230-238.
- [15] 沙凌锋, 徐赵东, 李爱群, 等. 磁流变阻尼器的设计与分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(3): 59-63.
SHA Ling-feng, XU Zhao-dong, LI Ai-qun, et al. Design and Research of Magnetorheological Dampers [J]. Industrial Construction, 2008, 38(3): 59-63.
- [16] 张香成, 吴 浩, 赵依潇, 等. 复合式磁流变阻尼器的多目标优化设计[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(3): 414-418, 441.
ZHANG Xiang-cheng, WU Hao, ZHAO Yi-xiao, et al. Multi-objective Optimization of Composite Magnetorheological Dampers [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(3): 414-418, 441.
- [17] 马 然, 朱思洪, 梁 林, 等. 磁流变减振器建模与试验[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 135-141.
MA Ran, ZHU Si-hong, LIANG Lin, et al. Modelling and Testing of Magnetorheological Damper [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 135-141.
- [18] GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [19] GB/T 228. 1—2010, 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法[S].
GB/T 228. 1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part 1: Method of Test at Room Temperature[S].
- [20] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].