

新型自复位混合摇摆柱可恢复功能性能分析

阎石,王涛,苏醒,孙祥磊

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 提出一种带有可更换软钢耗能器的新型自复位混合摇摆柱(RHD-RRC),以解决传统框架在震后易损坏且不易修复问题。**方法** 利用 ABAQUS 软件建立了 RHD-RRC 有限元模型,并进行低周循环往复加载试验。通过滞回曲线、骨架曲线等分析其自复位能力、刚度退化及耗能能力等,进而对比分析普通摇摆柱和 RHD-RRC 的地震可恢复功能性能的区别。**结果** 与普通摇摆柱相比,RHD-RRC 的滞回曲线饱满且平滑,具有良好的耗能能力和自复位能力,强度和刚度更高、且刚度退化和强度退化较为缓慢。**结论** RHD-RRC 良好的耗能能力和自复位能力可以实现框架结构的可恢复变形能力,以有效解决传统框架柱震后易损坏且不易修复的问题。

关键词 自复位摇摆柱;软钢耗能器;可恢复功能防震结构;可恢复功能性能;滞回曲线

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Earthquake Resilient Performance Analysis of a Novel Self-centering Hybrid Rocking Column

YAN Shi, WANG Tao, SU Xing, SUN Xianglei

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: A novel resilient rocking column with replaceable soft steel energy dissipator (RHD-RRC) is proposed to solve the issue of the traditional frame being vulnerable to damage and difficult to repair after earthquake. A finite element model of the RHD-RRC is established by using ABAQUS, and a simulation of low-cycle reciprocating loading test is performed. Through the analysis of hysteresis curves, skeleton curves and so on, the self-recentering ability, stiffness degradation and energy dissipation ability are investigated, and the difference between the earthquake resilient performances (ERPs) of the ordinary RHD and the proposed RHD-RRC is numerically compared. The results show that the hysteretic curves of RHD-RRC are fuller and smoother with better energy dissipation capacity and ERPs, higher strength and stiffness, and slower strength and stiffness degradation than that of the ordinary HRC. The high energy dissipation and self-recentering capacities of RHD-RRC can be used to realize the ERPs of frame

收稿日期:2021-07-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0705602)

作者简介:阎石(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事可恢复功能防震结构与构件等方面研究。

structures, effectively solving the problem for frame columns being damageable during earthquakes and difficultly repairing after earthquakes.

Key words: self-recentering rocking columns; soft steel energy dissipators; earthquake resilient structures(ERSs); earthquake resilient performances(ERPs); hysteretic curves

随着科技的发展,因地震导致房屋倒塌和人员伤亡的现象逐渐减弱,一定程度上保证了人们的生产和生活。然而,地震造成的破坏依然对国民经济和人民生活产生严重的影响。这是由于震后多数房屋自身的破坏,已经无法满足正常使用功能,且修复困难或修复经济和时间成本过高,从而导致受损房屋需要推倒重建。因此,如何解决房屋震后快速恢复功能问题意义重大。

可恢复功能结构(ERS)^[1]是指在多遇地震作用或罕遇地震作用下,结构不需修复或轻微修复,即可快速恢复其使用功能。目前,ERS形式上主要包括:摇摆结构^[2]、自复位结构^[3]、可更换构件结构^[4-5]、复合自复位结构^[6]等。G. W. Housner^[7]在1962年首次提出摇摆结构的概念及摇摆刚体经典模型,证明该结构具有优良的抗震性能。H. Roh^[8-9]在2007年提出摇摆柱,并利用试验证明减少摇摆柱的约束可以有效降低地震加速度响应。美、日地震工程第二阶段合作研究计划会议上提出地震工程合作方向-“可恢复功能城市”^[10]。美国太平洋地震工程研究中心年会^[11]、第16届世界地震大会^[12]等会议也都围绕“可恢复性”作为主题。由此可见,ERS已经成为地震工程研究的重点。

在摇摆-自复位结构混合体系中,毛晨曦等^[13-14]提出了较多构件连接形式。其中,耗能能力较高的连接方式存在自复位能力不足的问题;而自复位能力较好的连接方式,往往耗能能力偏弱。为解决该矛盾,笔者提出了一种带有可更换软钢耗能器的新型自复位混合摇摆柱(Resilient Rocking Column with Replaceable Hysteretic Dampers, RHD-RRC),以满足“耗能高、自复位能力强、抗侧刚度适

中”的目标要求。为了研究RHD-RRC的地震可恢复功能性能(Earthquake Resilient Performances, ERPs),笔者以一个高2.39 m的可恢复摇摆柱试验为例,验证了所建立的有限元模型的有效性;然后通过ABAQUS建立了RHD-RRC有限元模型,对其分别进行单调加载和低周循环往复加载,分析轴压比、耗能器厚度、预应力初始值等因素对RHD-RRC耗能能力和自复位能力的影响。通过RHD-RRC与普通摇摆柱有限元模拟结果对比分析可知,RHD-RRC的滞回曲线呈“旗帜形”,具有良好的可恢复功能能力。

1 RHD-RRC 连接构造与工作原理

RHD-RRC的节点示意图如图1所示。在预制钢筋混凝土柱和基础接触面处均设有保护钢板,防止RHD-RRC在“摇摆”过程中造成混凝土压碎等现象;预留预应力筋孔道并在截面上两两对角布置,采用后张法施加预应力;耗能器通过柱和基础的预埋螺栓连接,预埋螺栓端部进行局部处理,保证“摇摆”过程中螺栓不会破坏。根据摇摆机制及地震作用下保证结构无损伤的性能指标,允许RHD-RRC产生柱脚摆动或抬升现象,然后通过耗能器耗能和柱的“摇摆”以及预应力钢筋的弹性恢复力,使RHD-RRC在地震作用下满足可恢复的目标。

普通摇摆柱是通过混凝土开裂及钢筋与混凝土之间产生滑移进行耗能,耗能能力弱。RHD-RRC通过在发生大变形的柱脚部位设置耗能装置,将地震能量主要集中在耗能器上,主体结构则分担少量,以达到损伤集中、可控和保护主体结构的目的。在不影响主体

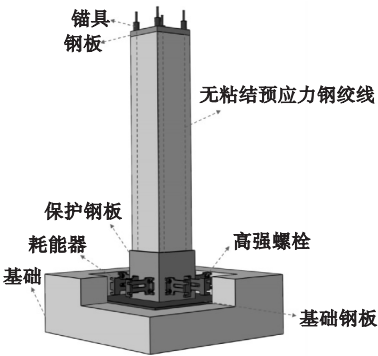


图1 RHD-RRC 节点示意图

Fig.1 The schematic in details of RHD-RRC joint
结构使用功能的前提下,耗能器实现“可拆卸、可更换、易安装、快速恢复使用”的目标。通过预应力筋提供弹性恢复力,最终实现结

构功能快速恢复。

RHD-RRC 摇摆过程示意图如图 2 所示。初始状态时,柱底面接触应力分布均匀。顶部施加水平荷载后,受拉侧接触面压应力开始减小并逐渐趋向于 0,受压侧压应力逐渐增大。随着水平荷载逐渐增大,柱底接触面开始减小,接触应力向受压侧集中,当全接触面达到屈服应力时,柱底最大弯矩为 M_{\max} ,RHD-RRC 达到摇摆临界状态。继续增大水平荷载,RHD-RRC 将会发生摇摆行为,此时摇摆柱仍然保持一定的抗倾覆能力。当重力作用线通过支撑点 O' 时,RHD-RRC 达到临界倾覆状态^[15],当变形超过这一状态,结构将发生倾覆破坏。

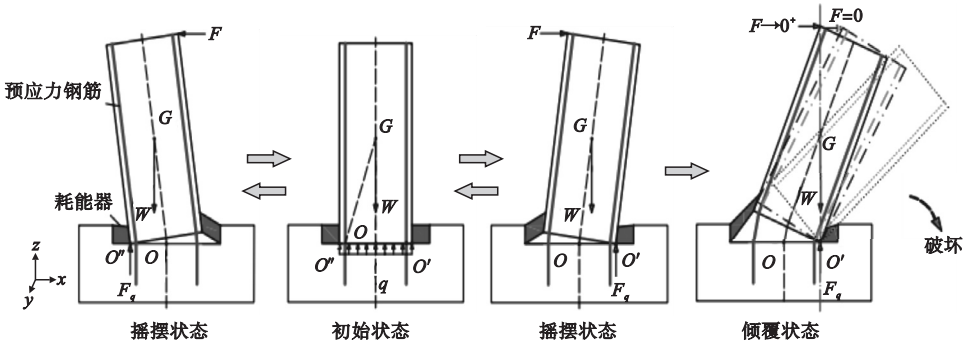


图2 RHD-RRC 摇摆过程示意图

Fig.2 The schematics of rocking process for an RHD-RRC

预应力钢筋为 RHD-RRC 提供弹性恢复力且保证其在摇摆过程中始终处于弹性状态。RHD-RRC 的耗能能力由耗能器决定。笔者利用 ABAQUS 软件,分析轴压比、预应力初始值大小、预应力钢筋截面面积及耗能器厚度等因素对 RHD-RRC 抗震性能的影响。

2 有限元分析

为了验证新型自复位混合摇摆柱的可恢复功能性能,利用已有的摇摆柱试验进行有限元模型验证。然后建立一个升级的 RHD-RRC 有限元模型,对其进行低周循环往复加载数值模拟,分析不同参数对其可恢复功能性能的影响。

2.1 模型验证

为了验证所建立的有限元模型准确性,选用 Y. Liu 等^[14]完成的新型可恢复摇摆柱的工况 S20-5.5-0.1-AR 试验结果进行对比。材料参数见表 1,模拟结果如图 3 和图 4 所示。图中, F 为构件的水平承载力; Δ 为柱顶位移; θ 为不同柱顶位移对应的转角。

表1 材料性能试验结果

Table 1 Test results of material properties			
钢材种类	弹性模量/	屈服强度/	极限强度/
	GPa	MPa	MPa
Q235 (16)	188.0	290.0	433.4
Q235 (20)	182.0	276.5	431.3
Q345	199.0	393.5	544.5

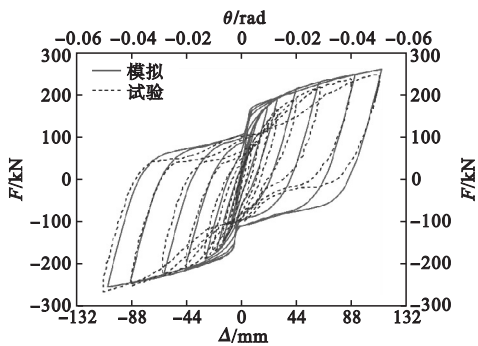


图3 试验-模拟滞回曲线对比

Fig. 3 Comparison of experimental and simulated hysteretic curves

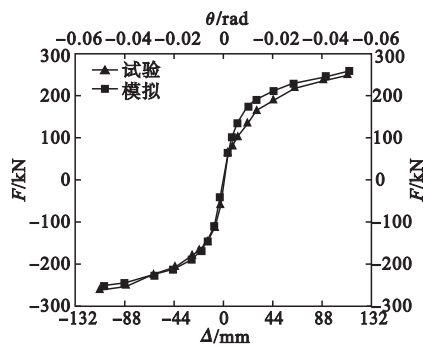


图4 试验-模拟骨架曲线对比

Fig. 4 Experimental-simulated skeleton curve comparison

从图3、图4可以看出,该摇摆柱具有足够的耗能能力,但自复位能力差,具有较大的

残余变形。由于构件的各个接触面在加载过程中均考虑了相对滑移,数值模拟结果与试验数据吻合良好,两者且均出现“捏缩”现象。由于数值模拟中的材料参数、加载方式、边界条件相对试验更加理想化,因此滞回曲线相对更加饱满。模拟结果和试验结果吻合度高,整体趋势基本相同,可以正确反映试验工况对应的水平承载力以及耗能能力等力学性能,验证了有限元模型的准确性。

2.2 RHD-RRC 有限元模型的建立

在ABAQUS中,对新型自复位混合摇摆柱进行拟静力加载下的滞回性能分析。摇摆柱长×宽×高为400 mm×400 mm×1 600 mm,基础长×宽×高为1 600 mm×1 600 mm×500 mm,混凝土强度等级为C30,混凝土采用文献[16]附录C中本构关系。预应力钢筋简化为理想的弹性材料。其他钢筋及钢材的本构关系均采用两折线随动强化模型。

2.3 加载模式

根据轴压比、预应力初始值大小、预应力钢筋截面面积及耗能器厚度的不同,共设计5种工况(见表2)。采用转角(位移)控制加载方案,加载制度见图5。

表2 数值模拟工况设计

Table 2 The design of numerical simulation cases

工况编号	轴压比	预应力初始值/ kN	预应力钢筋截面面积/ mm ²	耗能器厚度/ mm	加载制度
Z1	0.1	165	200	10	最大层间位移角 1/25, 1 圈/级
Z2	0.1	165	300	10	最大层间位移角 1/25, 1 圈/级
Z3	0.1	330	200	10	最大层间位移角 1/25, 1 圈/级
Z4	0.3	165	200	10	最大层间位移角 1/25, 1 圈/级
Z5	0.1	165	200	6	最大层间位移角 1/25, 1 圈/级

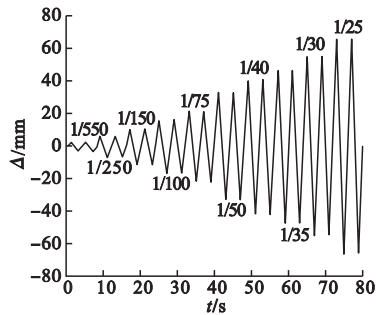


图5 水平往复荷载位移控制制度

Fig. 5 The displacement control scheme of horizontal reciprocating loading

3 模拟结果分析

3.1 三种摇摆柱模拟结果对比

自复位混合摇摆柱与普通摇摆柱相比,其工作过程存在四种机制:摇摆机制、自复位机制、集中耗能机制、可更换构件机制^[6]。而普通摇摆柱仅存在其中一种或多种机制。

对于摇摆机制,自复位混合摇摆柱与普通摇摆柱均改变了上部结构与基础之间的约束,并由弯剪变形模式改为整体抬升的摇摆

模式,从而避免了构件的损伤,使结构具有一定的可恢复能力。对于自复位机制,自复位混合摇摆柱具有良好的自复位能力,而文献[14]中设计的性能可恢复摇摆柱,具有良好耗能能力的同时,其自复位效果不理想,在地震作用下,无法满足结构自复位的目标。对于集中耗能机制,是可恢复功能结构的核心机制之一。自复位混合摇摆柱将地震能量集中于柱脚的耗能器中,因此,主体结构可以达到无损伤的设计目的。对于普通框架柱和普通摇摆柱,其耗能主要是混凝土开裂进行耗能,后期修复困难。对于可更换构件机制,是可恢复功能结构的另外一个核心机制。自复位混合摇摆柱通过更换柱脚处的耗能器,降低了影响结构正常使用功能时间,实现“可拆卸、可更换、易安装、快速恢复使用”的目标。

为进一步研究预应力钢筋与软钢耗能器对摇摆柱耗能与自复位性能的影响,采用三种类型的摇摆柱进行对比分析。第一种为普通摇摆柱(RRC),摇摆界面处仅设有预应力筋,其他参数均与 RHD-RRC 相同;第二种仅设有耗能器的摇摆柱(RHD),不设置预应力钢筋,其他参数均与 RHD-RRC 均相同;第三种为 RHD-RRC。通过各个滞回曲线面积下的累积耗能系数及等效黏滞阻尼系数 h_e ^[17]来表示其耗能能力。

三种摇摆柱的塑性变形主要发生在摇摆截面处,其他部位均处于弹性状态,摇摆柱本身未出现损伤情况。三种摇摆柱的滞回曲线、骨架曲线、等效黏滞阻尼系数 h_e 及累积滞回耗能系数 ξ 对比结果如图6~图9所示。

从图6~图9可以看出,对于耗能能力,RRC无残余变形,耗能主要依靠混凝土塑性变形。RHD-RRC和RHD滞回曲线表明,耗能软钢发挥了很好的耗能能力。随着荷载幅值的增加,RHD-RRC和RHD的滞回环面积不断增大,耗能能力进一步提高。当达到峰

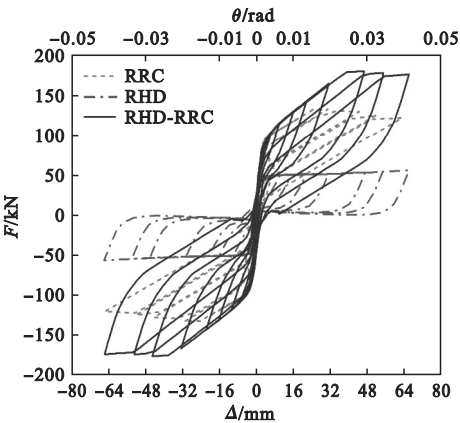


图6 滞回曲线对比

Fig. 6 Comparison of hysteretic curves

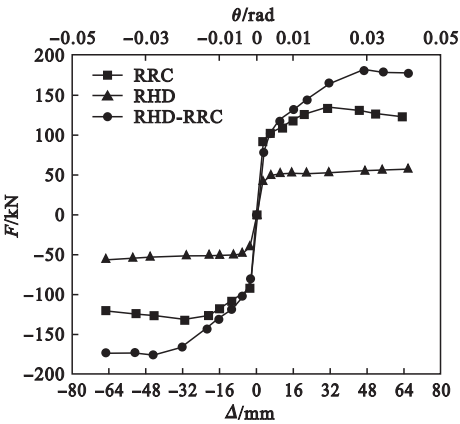


图7 骨架曲线对比

Fig. 7 Correlation of skeleton curve of RRC, RHD and RHD-RRC

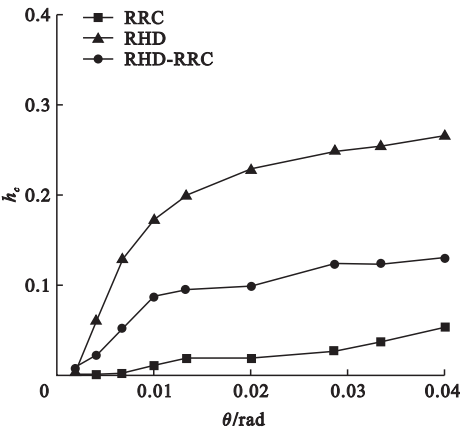


图8 等效黏滞阻尼系数 h_e 对比

Fig. 8 Equivalent viscous damping coefficients h_e of RRC, RHD and RHD-RRC

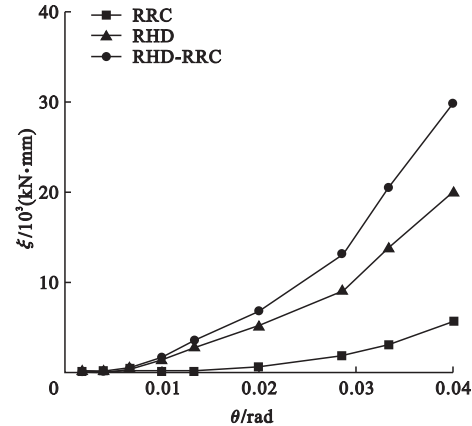


图9 累积耗能系数 ξ 对比

Fig. 9 Cumulative energy dissipation coefficient ξ of RRC, RHD and RHD-RRC

值荷载后,RRC 和 RHD-RRC 均出现了强度退化现象,RRC 退化速度更快,承载力较低。三种摇摆柱的 $h_c - \theta$ 曲线走势基本相同,呈现平稳上升的趋势,随着 θ 增大,摇摆柱塑性变形越大,耗散地震能量越多。当 $\theta < 0.005$ 时,三种摇摆柱的累积耗能曲线基本保持重合状态,随着 θ 增大,三条曲线开始分离,耗能器的有无对三种摇摆柱的累计耗能影响逐渐增大。

RHD-RRC 相比于 RRC 和 RHD 而言,具有良好的耗能能力及自复位能力,强度退化和刚度退化速度较慢,具有 RRC 和 RHD 的优点,性能指标最好。

3.2 不同参数对 RHD-RRC 抗震性能的影响

3.2.1 预应力筋截面面积

笔者以工况 1 和工况 2 为例,研究预应力筋截面面积对 RHD-RRC 的可恢复功能性影响。滞回曲线、骨架曲线、累积滞回耗能系数 ξ 曲线如图 10 ~ 图 12 所示。

从图 10 ~ 图 12 可以看出,在其他参数相同的前提下,增大预应力筋截面面积,两种工况下的滞回曲线都比较饱满,RHD-RRC 抵抗水平荷载的能力进一步提高,有刚度退化现象。

由于在初始预应力相同的条件下,不同截面面积的预应力筋提供的弹性恢复力随着 θ 的增大而增大,混凝土开裂产生的耗能降

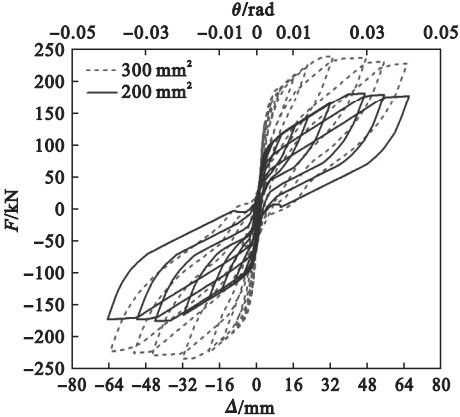


图10 预应力筋截面积对滞回曲线的影响

Fig. 10 Influence of prestressed rebar cross-sectional areas on hysteretic curves

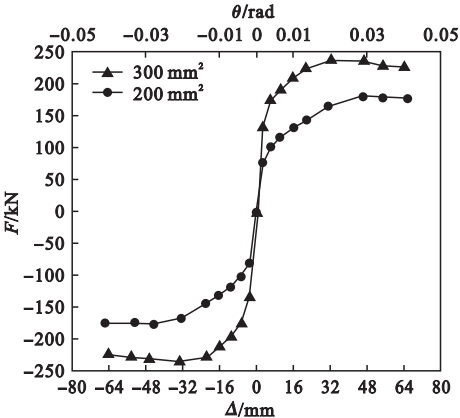


图11 预应力筋截面积对骨架曲线的影响

Fig. 11 Influence of prestressed rebar cross-sectional areas on skeleton curves

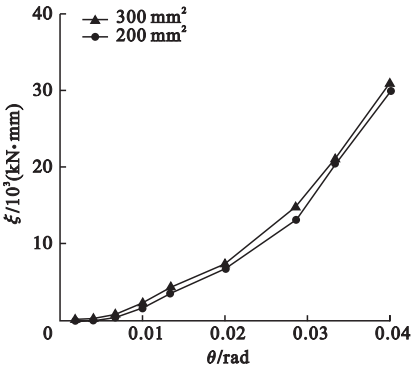


图12 预应力筋截面积对累积耗能系数的影响

Fig. 12 Influence of prestressed rebar cross-sectional areas on cumulative energy consumption coefficient

低。由于耗能器的参数均相同,因此两种工况的累积耗能基本相同。

3.2.2 预应力初始值

笔者以工况 1 和工况 3 为例,研究预应力初始值对 RHD-RRC 可恢复功能性能的影响。滞回曲线、骨架曲线、累积耗能系数 ξ 曲线如图13 ~ 图 15 所示。

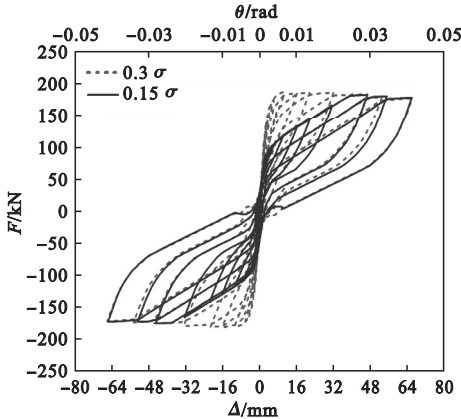


图 13 预应力初始值对滞回曲线的影响
Fig. 13 Influence of different initial prestress levels on hysteretic curves

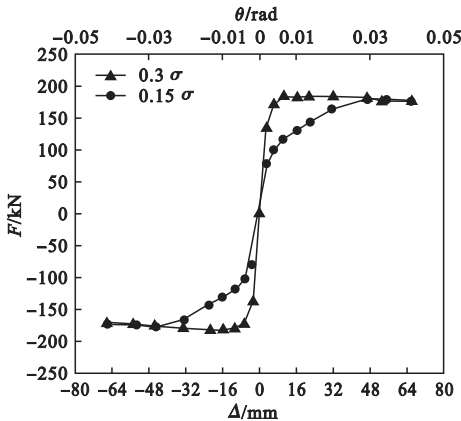


图 14 预应力初始值对骨架曲线的影响
Fig. 14 Influence of different initial prestress levels on skeleton curves

从图 13 ~ 图 15 可以看出,在其他参数均相同的前提下,提高预应力初始值,可以有效提高 RHD-RRC 的前期抗侧能力和一定的自复位能力,且滞回环比较饱满。随着 θ 的增大,两种工况的水平抗侧能力逐渐趋于一致,刚度退化几乎相同。当预应力钢筋在弹性段时,预应力初始值较小时的摇摆柱

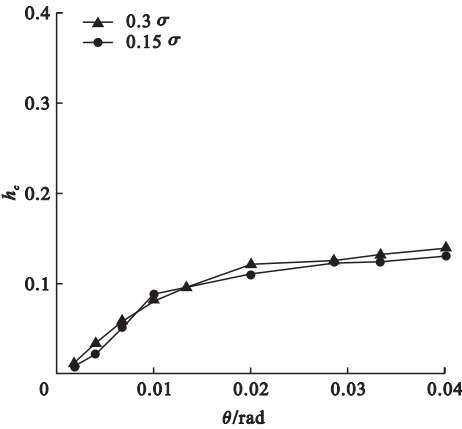


图 15 预应力初始值对累积耗能系数的影响
Fig. 15 Influence of different initial prestress levels on cumulative energy consumption coefficient
具有更好的耗能能力,分析原因是预应力初始值较大会限制混凝土的开裂的缘故。当钢筋到达塑性段时,两种工况下 RHD-RRC 的耗能能力趋向于相同。由于耗能器的参数均相同,因此两种工况的累积耗能能力基本相同。

3.2.3 轴压比和不同耗能器厚度

文献[14]中对性能可恢复摇摆柱的轴压比和不同耗能器厚度的影响进行了相关研究,笔者在此基础上,研究轴压比和不同耗能器厚度对 RHD-RRC 自复位能力和耗能能力的影响。滞回曲线和骨架曲线如图 16 ~ 图 19 所示。

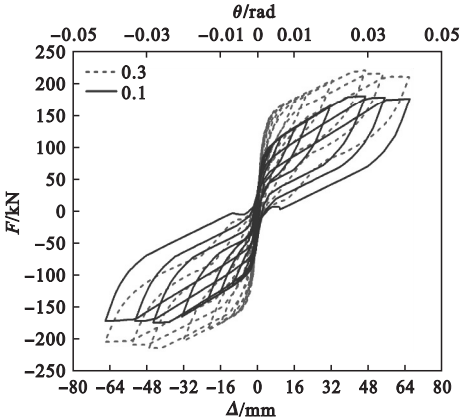


图 16 轴压比对滞回曲线的影响
Fig. 16 Influence of axial compression ratio on hysteretic curves

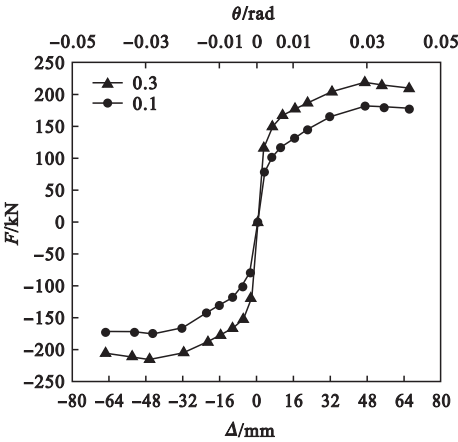


图 17 轴压比对骨架曲线的影响

Fig. 17 Influence of axial compression ratio on skeleton curves

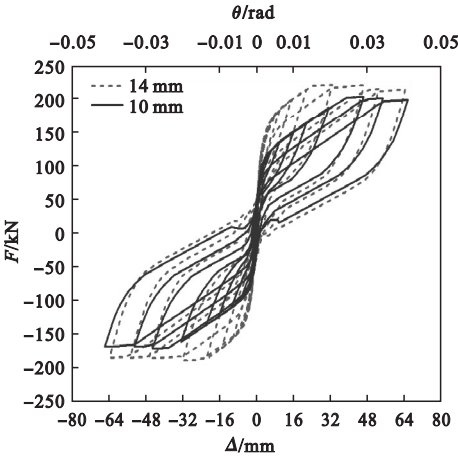


图 18 耗能器厚度对滞回曲线的影响

Fig. 18 Influence of energy dissipator thickness on hysteretic curves

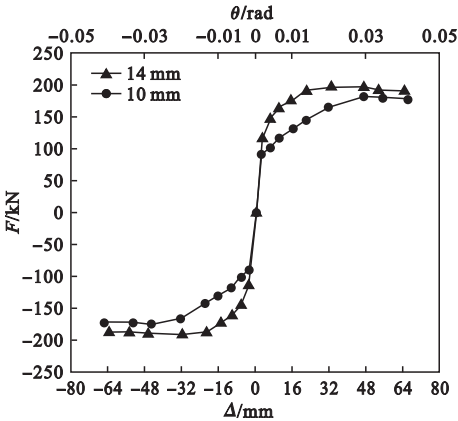


图 19 耗能器厚度对骨架曲线的影响

Fig. 19 Influence of energy dissipator thickness on skeleton curves

从图 16 和图 17 可以看出,两种轴压比下 RHD-RRC 的滞回曲线都很饱满,都具有较好的耗能能力。随着轴压比的增大,RHD-RRC 的水平抗侧能力提高,即轴压比和 RHD-RRC 的整体刚度呈正比关系,刚度退化能力降低。两种工况下骨架曲线走势基本相同,呈现平稳上升的趋势。增大轴压比,导致混凝土柱受压开裂,此时耗能能力由耗能器和混凝土开裂共同组成。两种工况下累积耗能差别不大,是因为耗能主要集中在耗能器中,与轴压比有一定的相关性。

从图 18 和图 19 可以看出,两种工况下 RHD-RRC 在双向加载过程中都有弹性阶段和塑性阶段。滞回曲线的走势具有一致性,且滞回环比较饱满,具有较好的耗能能力。随着耗能器厚度的增加及 θ 的增大,RHD-RRC 的水平抗侧能力增大,自复位能力降低,刚度退化速度降低,且耗能能力与耗能器厚度呈正比例关系。等效黏滞阻尼系数及累积耗能系数均与阻尼厚度呈正比例关系。

4 结 论

(1)RHD-RRC 连接构造设计简单且分工明确。预应力钢筋提供弹性恢复力,耗能器高效耗能,可以实现“可拆卸、可更换、易安装、快速恢复使用”的目标。

(2)RRC 无残余变形,耗能主要依靠混凝土塑性变形;RHD 的滞回曲线形状具有高度的一致性,饱满且平滑,耗能能力更高;HRD-RRC 同时具有良好的自复位能力和耗能能力,耗能主要集中在耗能器中,避免了混凝土构件的损伤。

(3)RHD-RRC 的自复位能力及耗能能力主要由预应力筋和耗能器决定,轴压比也有一定的影响。提高初始预应力或增大预应力筋截面面积,会提高 RHD-RRC 的自复位能力,不同耗能器厚度对 RHD-RRC 的耗能能力也呈正相关。在设计或使用时应考虑耗能器的厚度及预应力大小的匹配问题。

参考文献

- [1] 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.
(Lü Xilin, CHEN Yun, MAO Yuanjun. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures [J]. Journal of tongji university (natural science), 2011, 39(7): 941-948.)
- [2] 周颖,吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报,2011,32(9):1-10.
(ZHOU Ying, Lü Xilin. State-of-the-art on rocking and self-centering structures [J]. Journal of building structures,2011,32(9):1-10.)
- [3] CUI Y, Lü X. Experimental investigation of triaxial self-centering reinforced concrete frame structures through shaking table tests [J]. Engineering structures,2017,132:684-694.
- [4] 吕西林,陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(1):27-36.
(Lü Xilin, CHEN Cong. Research progress in structural systems with replaceable members [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics,2014,34(1):27-36.)
- [5] 阎石,潘秋宇,苏醒. 基于 SMA 特性的可更换 BRB 设计方法研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(3):402-410.
(YAN Shi, PAN Qiuyu, SU Xing. Design method of SMA property-based replaceable BRBs [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(3): 402-410.)
- [6] 吕西林,武大洋,周颖. 可恢复功能防震结构研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(2):1-15.
(Lü Xilin, WU Dayang, ZHOU Ying. State-of-the-art of earthquake resilient structures [J]. Journal of building structures, 2019, 40(2): 1-15.)
- [7] HOUSNER G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes [J]. Bulletin of the seismological society of America,1963,53(2):403-417.
- [8] ROH H. Seismic behavior of structures using rocking columns and viscous dampers [D]. Buffalo:The State University of New York,2007.
- [9] ROH H, REINHORN A M. Analytical modeling of rocking elements [J]. Engineering structures,2009,31(5):1179-1189.
- [10] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Report of the seventh joint planning meeting of NEES/E-defense collaborative research on earthquake engineering [R]. Berkeley:University of California,2010.
- [11] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). 2016 PEER Annual Meeting [EB/OL]. (2016-01-29) [2021-05-01]. <https://peer.berkeley.edu/2016-peer-annual-meeting-presentations-website>.
- [12] 吕西林,全柳萌,蒋欢军. 从16届世界地震工程大会看可恢复功能抗震结构研究趋势[J]. 地震工程与工程振动,2017,37(3):1-9.
(Lü Xilin, QUAN Liumeng, JIANG Huanjun. Research trend of earthquake resilient structures seen from 16WCEE [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2017, 37(3): 1-9.)
- [13] 毛晨曦,于樵,张昊宇,等. 预应力自复位钢筋混凝土柱及梁柱节点拟静力试验研究[J]. 自然灾害学报,2017,26(6):1-12.
(MAO Chenxi, YU Qiao, ZHANG Haoyu, et al. Pseudo-static tests of prestressed self-centering reinforced concrete column and beam-column joints [J]. Journal of natural disasters,2017,26(6):1-12.)
- [14] LIU Y, GUO Z, LIU X, et al. An innovative resilient rocking column with replaceable steel slit dampers: experimental program on seismic performance [J]. Engineering structures,2019,183:830-840.
- [15] 姜淳,高文俊,吕西林. 构件的摇摆过程与混凝土摇摆柱的 OpenSEES 模拟[EB/OL]. (2013-12-18) [2021-05-02]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201312-463>.
(JIANG Chun, GAO Wenjun, Lü Xilin. Rocking component and numerical modeling of rocking column based on OpenSEES [EB/OL]. (2013-12-18) [2021-05-02]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201312-463>.)
- [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:GB50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
(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 and Building Press,2011.)
- [17] 王全凤,郑济坤,周博,等. 基于滞回耗能的 HRBF500 RC 柱抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2013,46(11):22-28.
(WANG Quanfeng, ZHENG Jikun, ZHOU Bo, et al. Study on seismic behavior of HRBF500 RC column based on hysteretic energy [J]. China civil engineering journal,2013,46(11): 22-28.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:唐玉兰)