

自复位耗能摇摆柱在不同参数下的 滞回性能分析

何晴光^{1,2}, 王 鹤¹, 吴伟科¹

(1. 兰州理工大学土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘 要 目的 研究参数变化对自复位耗能摇摆柱滞回性能的影响规律, 为结构设计提供参考. 方法 利用 OpenSees 有限元软件对自复位耗能摇摆柱, 在 5% 和 15% 轴压比、不同自复位耗能支撑长度 L_s 、第一刚度 K_1 、第二刚度 K_2 、摩擦力 F 、预拉力 P_0 及其角度 γ 和摇摆柱截面尺寸 d 下的滞回性能进行研究. 结果 角度 γ 变化对自复位耗能摇摆柱滞回性能影响显著, 15% 轴压比、 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时可充分发挥其性能; 除 K_1 变化对其耗能无显著影响外, 其余参数增大均使耗能有所增加; 除 d 的增大使其自复位性能显著下降外, 其余参数变化对自复位性能均无显著影响. 结论 各参数变化对自复位耗能摇摆柱滞回性能影响迥异、具有显著规律性, 可为结构设计提供参考.

关键词 自复位耗能摇摆柱; 不同参数; 轴压比; 滞回性能

中图分类号 TU375.3; TU352

文献标志码 A

Hysteresis Behavior of Self-Centering Energy Dissipation Rocking Column with Different Parameters

HE Qingguang^{1,2}, WANG He¹, WU Weike¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China, 730050; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou, China, 730050)

Abstract: In order to investigate the effect of parameter variation on the hysteresis performance of self-centering energy dissipation rocking column (SCEDRC) and to provide reference for structural design. The finite element software OpenSees is used to study hysteric behavior of SCEDRC under 5% and 15% axial compression ratios with different SCEDB's length, first stiffness K_1 , second stiffness K_2 , friction F , pretension P_0 and its installation angles γ and rocking column cross section dimensions d . The results show that variation of installation angle has significant effect on the hysteric performance, its performance can be fully developed at 15% axial compression ratio and 20 degree to 40 degree. Except that the change of K_1 has no significant effect on energy con-

收稿日期: 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668043)

作者简介: 何晴光(1974—), 男, 副教授, 主要从事结构抗震和防灾减灾方面研究.

sumption, the increase of other parameters will increase the energy consumption. The self-centering performance decrease significantly with the increase of d and the change of other parameters has no significant effects on self-centering performance. The results show that the variation of each parameter has different effects on the hysteric performance of the SCEDRC and has remarkable regularity. The analysis result can provide the reference for structural design

Key words: self-centering energy dissipation rocking column; different parameters; axial compression ratio; hysteresis behavior

地震时,传统结构通过结构构件破坏来耗散地震能量,并利用高性能材料“强化”结构体系、增大强度与刚度,减小结构的塑性变形,但在罕遇地震后会有较大的残余变形,不利于修复及应急使用。为解决上述问题,“可恢复功能结构”^[1]这一新概念应运而生,摇摆及自复位结构是实现结构可恢复功能的两种方式。2007年,Hwasung^[2-4]通过放松框架柱与基础约束构成摇摆柱,并引入黏滞阻尼器实现对框架结构的振动控制,随后又给出了该柱的宏观分析模型,并验证了此类结构具有优良抗震性能。2008年,C. Christopoulos等^[5]设计出自复位耗能支撑(Self - Centering Energy Dissipation Brace, SCEDB),并将其应用于框架中^[6],结果表明该支撑可有效减小残余变形,提高结构抗震能力。2011年,吕西林等^[7]对 OpenSees 模拟摇摆柱的可行性进行了验证,随后对自复位混凝土框架结构进行了数值模拟和振动台试验^[8-9],并指出摇摆、自复位结构的联合应用是可恢复功能结构的发展方向之一^[10-11]。

目前研究的可恢复功能结构大多形式单一,对摇摆及自复位联合应用的结构研究欠缺。基于以上考虑,笔者通过将摇摆柱与 SCEDB 结合,设计了一种兼具耗能和自复位能力的自复位耗能摇摆柱(Self - Centering Energy Dissipation Rocking Column, SCEDRC)。地震时,利用 SCEDB 实现集中耗能和结构损伤控制,震后通过摇摆柱与 SCEDB 的共同作用实现结构自复位、减小残余变形。

采用 OpenSees 有限元软件对普通柱、摇摆柱及自复位耗能摇摆柱滞回性能进行对比,并在不同参数下对自复位耗能摇摆柱滞回性能进行参数分析,以研究各参数变化对其耗能及自复位性能的影响规律。

1 自复位耗能摇摆柱的设计

SCEDRC 是基于摇摆及自复位联合应用的思想设计出的平面布置自由、具有梁托式构架体系的特殊柱^[12](见图 1(a))。摇摆柱的标准截面尺寸为 200 mm × 200 mm,高为 1 500 mm,上下梁的截面尺寸为 200 mm × 300 mm,混凝土采用强度等级为 C35 的细石混凝土,纵筋和箍筋分别采用 HRB335 级和 HPB300 级钢筋。截面尺寸及配筋见图 1(b)。

采用的 SCEDB 是由加拿大学者 C. Christopoulos 等^[5]提出的兼具自复位和耗能能力的一种支撑,装置及理论滞回曲线见图 2。该支撑具有两阶段的刚度 K_1 和 K_2 , $P_0 + F$ 为支撑的启动荷载,是支撑中预应力筋预拉力 P_0 和耗能装置的最大静摩擦力 F 之和。当所受轴向力小于启动荷载时,支撑处于第一刚度 K_1 段,其在 SCEDRC 中通过弹性变形 δ_e 满足变形协调条件;当轴向力超过启动荷载时,其弹性变形超过 δ_a —极限弹性变形,进入第二刚度 K_2 段,开始发挥自复位和耗能作用;当达到最大行程后卸载,支撑开始进入卸载启动阶段,卸载启动荷载在数值上等于 $2F$,其与加载启动荷载的比值即为图 2 中的 β ;卸载过程中为了使支撑实现完全的自复位,应当满足 $P_0 \geq F$ 。

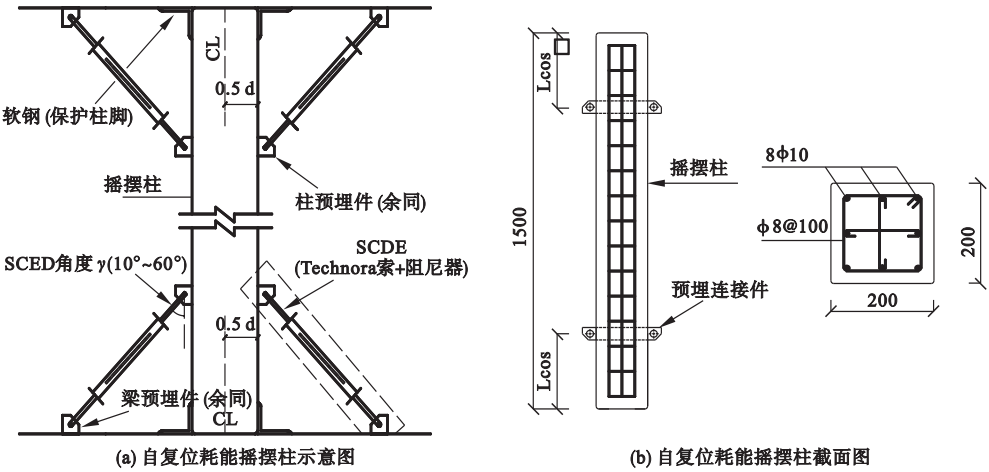


图1 自复位耗能摇摆柱示意图、截面尺寸及配筋

Fig. 1 Schematic diagram, section size and reinforcements of SCEDRC

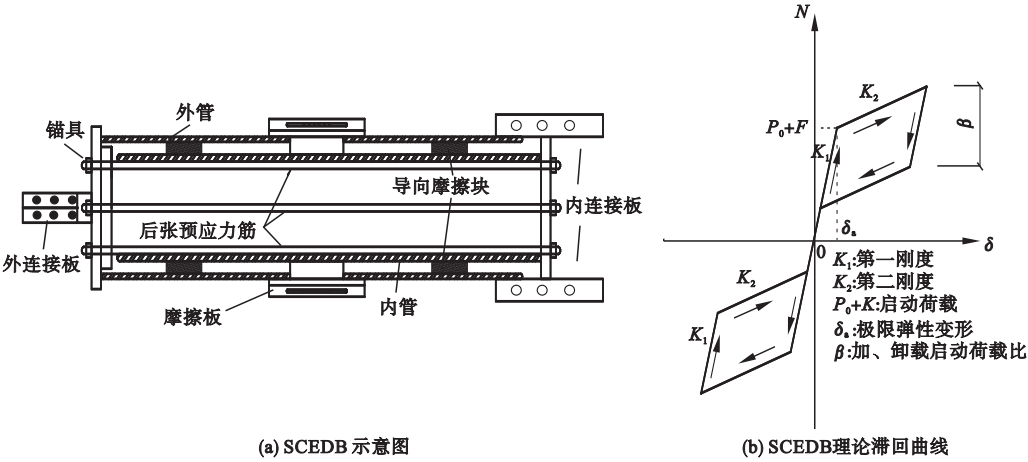


图2 SCEDB 示意图及其滞回曲线

Fig. 2 Schematic diagram and hysteresis curve of SCEDB

SCEDB 的第一刚度 K_1 由内管刚度 K_{in} 、外管刚度 K_{out} 及预应力拉索的刚度 K_{pt} 三部分组成,计算公式为^[13]

$$K_1 = \frac{2}{3} \left(\frac{E_s A_{in}}{L_s} + \frac{E_s A_{out}}{L_s} + \frac{E_{pt} A_{pt}}{L_s} \right). \quad (1)$$

SCEDB 进入第二刚度 K_2 后,内、外管由于产生相对运动而退出工作,此时其刚度仅由预应力拉索提供:

$$K_2 = K_{pt}. \quad (2)$$

式中: E_s 为钢材的弹性模量; E_{pt} 为预应力拉索的弹性模量; A_{in} 为内管截面面积; A_{out} 为外管截面面积; A_{pt} 为预应力拉索的截面面积; L_s 为支撑的长度.

按上述原理,采用 Q235 的方管设计 SCEDB,内、外管的尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 、 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$;预应力拉索采用直径 10 mm 、弹性模量 73 GPa 的 Technora 索,设计预拉力 22 kN 、摩擦力 18 kN ,参数 β 值为 0.9 ;参考文献[14]给出的隅撑与框架对角线最佳长度比,取其长度为 $300\sqrt{2} \text{ mm}$;数据带入公式得: $K_1 = 306.303 \text{ kN/mm}$, $K_2 = 13.507 \text{ kN/mm}$.

为了研究 SCEDB 安装角度 γ 、第一刚度 K_1 、第二刚度 K_2 、预拉力 P_0 、摩擦力 F 、长度 L_s 、摇摆柱截面宽度 d 变化对 SCEDRC 滞回性能的影响规律,对上述变量以基本设计参

数为标准进行调整,详见表1.安装角度 γ 为 SCEDB 与摇摆柱的夹角,要保证支撑正常工作应使其安装位置距柱端不低于塑性铰长度,即:

$$L_s \cos \gamma \geq L_p.$$

(3)

由此可得,安装角度 γ 上限值为 60° .

表1 各参数调整表

Table 1 The table of each parameter adjustment

参数	调整范围
安装角度 γ	$10^\circ \sim 60^\circ$ (以 10° 递增)
第一刚度 K_1	$0.8K_1, 1.25K_1$
第二刚度 K_2	$0.8K_2, 1.25K_2$
初始预拉力 P_0	$1.25P_0, 1.5P_0$
摩擦力 F	$0.6F, 0.8F$
支撑长度 L_s	$200\sqrt{2} \text{ mm}, 400\sqrt{2} \text{ mm}$
摇摆柱截面宽度 d	$300 \text{ mm}, 400 \text{ mm}$

2 基于 OpenSees 的模拟

2.1 有限元模拟

文中普通钢筋混凝土柱及摇摆柱均采用 OpenSees 中基于柔度法的弹塑性纤维单元 (Nonlinear Beam-column) 模拟,普通柱

与摇摆柱的截面尺寸及配筋相同.钢筋和混凝土分别采用 Steel02 和 Concrete02 本构模型^[15],其中核心区混凝土应考虑钢筋对其约束效应;SCEDB 采用 OpenSees 中的 Self - Centering 本构模型,并将其赋予 Two node link element(两节点单元)中模拟;为了考虑柱尺寸对 SCEDRC 滞回性能的影响,采用 Rigid link beam(刚性连杆)模拟柱截面尺寸.

模拟自由摇摆柱时将柱分为3个单元(见图3(a)).两端为塑性铰区域,塑性铰长度按 Paulay 等^[16]提出的经验公式计算:

$$L_p = 0.08L + 0.022f_y d_b.$$

(4)

式中: L 为摇摆柱长度; f_y 为纵筋的屈服强度; d_b 为纵筋直径.计算得: $L_p \approx 200 \text{ mm}$.摇摆柱端部的单压接触效应参考陈学伟等^[17]单压连接的模拟方法,利用 OpenSees 中 Series Material 材料将 Elastic - No Tension (ENT)材料与普通材料串联来模拟.模拟 SCEDRC 时,由于支撑距柱端均大于塑性铰长度,因此将柱分为5个单元,两端为塑性铰区域(见图3(b)).

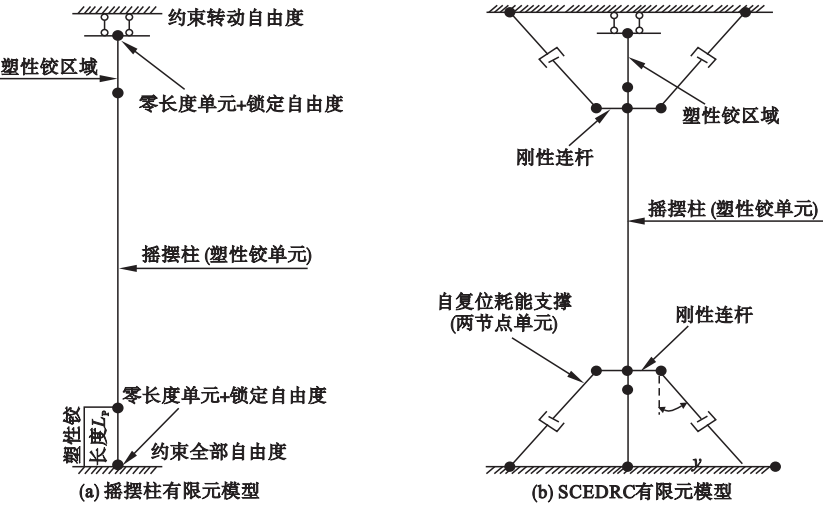


图3 摇摆柱及自复位耗能摇摆柱有限元模型

Fig. 3 Finite element model of rocking column and SCEDRC

2.2 加载模式

采用低周往复加载模式,通过水平方向位移控制加载、加载点位于柱顶;参考现行抗震规范表5.5.5对弹塑性层间位移角限值的

规定^[18],取最大水平控制位移为 $\pm 32 \text{ mm}$;为了考察 SCEDRC 在多周、往复加载过程否提供稳定的耗能能力,各位移水平下均循环3周,最终加载模式曲线如图4所示.

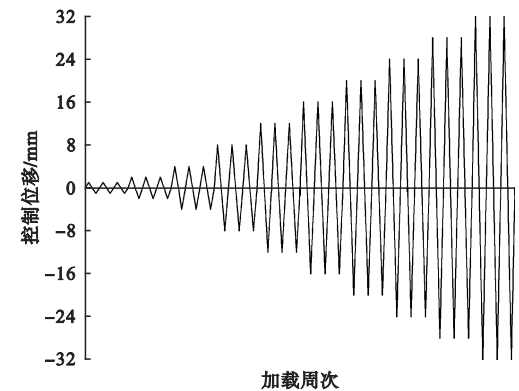


图4 低周往复加载模式曲线

Fig.4 Curve of low-frequency cyclic loading model

表2 普通柱和 SCEDRC 耗能对比

Table 2 Energy dissipative comparison between reinforced concrete column and SCEDRC						
位移/mm	第一周耗能/(kN·mm)		第二周耗能/(kN·mm)		第三周耗能/(kN·mm)	
	普通柱	SCEDRC	普通柱	SCEDRC	普通柱	SCEDRC
1	1.743 2	0.623 3	0.153	0.088 9	0.099 2	0.076 9
2	7.108 6	7.543 4	0.488 6	1.0076	0.426 4	0.936 3
4	20.069	77.956	3.900 5	71.988	3.641 1	71.922
8	201.31	228.99	137.13	218.37	135.92	218.61
12	379.02	375.30	355.75	363.83	355.27	363.54
16	624.92	520.69	580.29	508.17	579.08	507.55
20	872.76	694.41	823.31	667.16	832.32	645.21
24	1 144.2	955.28	1 143.6	960.24	1 143.8	976.88
28	1 470.8	1 348.7	1 440.8	1 371.8	1 440.8	1 385.5
32	1 775.0	1 810.9	1 748.1	1 820.3	1 748.1	1 826.5

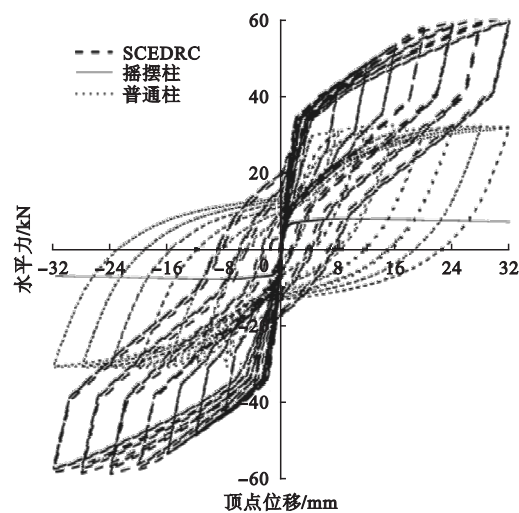


图5 普通柱、摇摆柱及 SCEDRC 滞回曲线

Fig.5 Hysteresis curves of reinforced concrete column,rocking column and SCEDRC

3 模拟结果分析

3.1 普通柱、摇摆柱及 SCEDRC 滞回分析

为了验证上述设计可实现预期“可恢复功能”,首先对相同尺寸及配筋的普通柱、摇摆柱及 SCEDRC 进行滞回对比分析,此处支撑采用标准支撑、以 30°安装.表 2 为普通柱与 SCEDRC 在 5% 轴压比、各位移水平下的耗能对比,图 5 为三者 在 5% 轴压比下的滞回曲线.

从图 5 及表 2 对比中可以看出,摇摆柱具有完全自复位能力,但最大抗侧力相较于其他两者很小,且几乎没有耗能能力;普通柱的滞回曲线饱满,加、卸载完成后其残余位移达到 22.9 mm;而 SCEDRC 呈现出了自复位结构所特有的“旗帜型”滞回曲线且抗侧力相较于其他两者显著增大,加、卸载完成后其残余位移仅为 9.1 mm,较普通柱减小了 60.3%,各位移水平下其与普通柱的耗能相差不大,在保证足够耗能能力同时能够使结构残余位移大幅度减小,且在往复多次循环加载中耗能能力无明显退化,说明其可以提供稳定的耗能能力;最终可实现预期的“可恢复功能”.

3.2 不同支撑角度滞回分析

图6(a)、(b)为5%、15%轴压比,各支撑角度下SCEDRC的滞回曲线;表3为5%、15%轴压比,各角度下的耗能及抗侧力对比.结合图、表可以看出,SCEDRC均可呈现出自复位结构所特有的“旗帜型”滞回曲线,各角度SCEDRC的耗能、自复位及抗侧力性能差距悬殊,最大可达2~3倍.5%轴压比下,10°、50°、60°时SCEDRC具有完全的自复位能力但耗能及抗侧性能较弱;而在20°、30°、40°时有足够的耗能及抗侧力,但当滞回位移超过24mm时,卸载后均有明显的残余变形,说明支撑安装角度是影响SCEDRC性能的主要因素之一.随着轴压比的增大,耗能能力无明显变化,但各角度下SCEDRC均可实现完全的自复位能力且抗侧力分别增长了16.1%、20.4%、34.3%、31.7%、27.5%、75.3%,这是由于柱顶点位移未超过倾覆点

时,轴压力可以提供一定的抗倾覆力矩,增大轴压比有利于提升其自复位及抗侧力性能.综上可知,在轴压比较大、20°~40°支撑角时,可以充分发挥SCEDRC性能.

图6(c)、(d)为各角度下SCEDB的滞回曲线.从图中可以看出,模拟与理论的滞回曲线形状一致;非对称性是由正、反向加载时,摇摆柱转动所绕旋转点位置不同、支撑的变形协调关系发生改变而导致的.支撑轴向变形随着轴压比增大而增大,是因为当支撑有轴向变形产生时摇摆柱与基础也开始脱离接触,此时轴力在沿支撑方向会产生分量,从而对支撑的轴向变形量产生影响.结合表3可以看出,各角度SCEDB耗能大小关系与SCEDRC的基本保持一致,且各角度支撑耗能占比均可达到60%以上,说明支撑在其中起主要耗能作用.

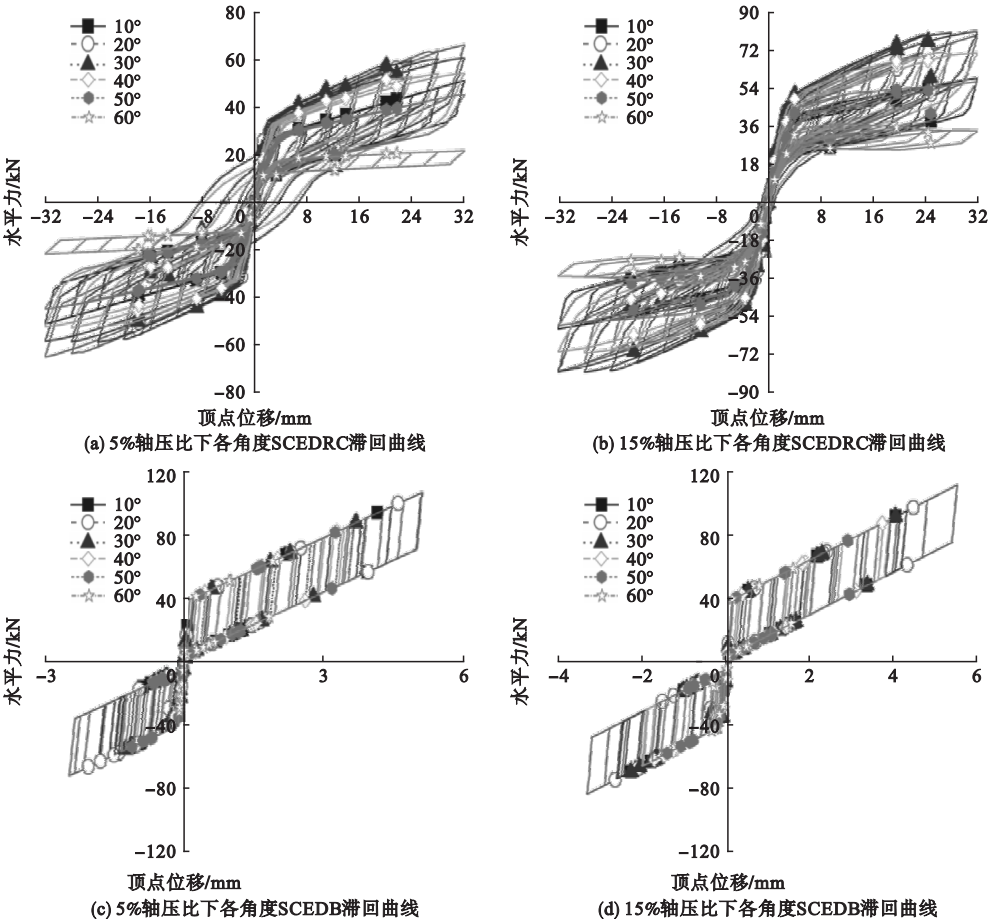


图6 不同角度下的滞回曲线及自复位支撑耗能占比

Fig. 6 Hysteresis curves and energy dissipative ratio of SCEDB with different angles

表3 不同角度下的耗能及抗侧力对比

Table 3 Comparison of energy dissipation and lateral force resistance with different angles

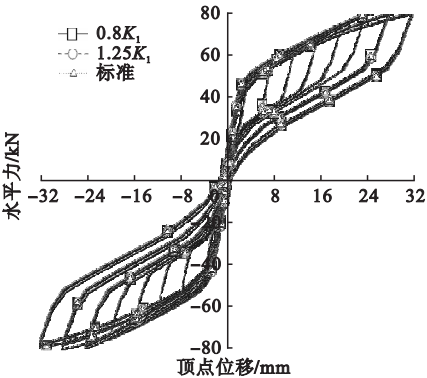
角度/(°)	SCEDRC				SCEDB	
	耗能/(kN·mm)		最大抗侧力/kN		耗能/(kN·mm)	
	5%轴压比	15%轴压比	5%轴压比	15%轴压比	5%轴压比	15%轴压比
10	12 180	12 617	51.28	59.53	12 061	12 099
20	16 269	15 944	66.40	79.97	14 352	15 317
30	18 000	18 359	60.74	81.56	11 348	13 749
40	15 272	14 298	54.45	71.70	9 915	11 029
50	9 167	9 352	45.37	57.85	8 829	8 485
60	3 896	4 062	21.74	38.10	3 798	3 424

注:表中的耗能为完整加载周次内,所有位移水平下滞回耗能总和(后表同理)。

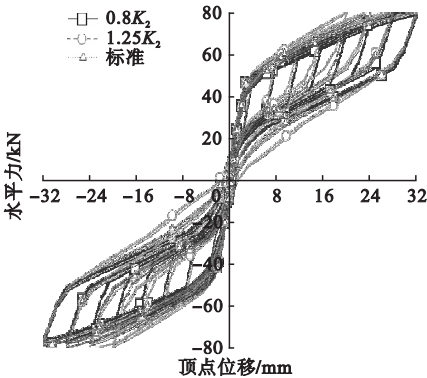
3.3 不同支撑参数滞回分析

根据角度分析的结果,后续分析以15%轴压比、30°支撑安装角度为基准.图7(a)~(d)为各支撑参数下SCEDRC的滞回曲线,表4、表5为各支撑参数下SCEDRC的耗能及抗侧力对比.结合图表可以看出,支撑各参数的变化对SCEDRC的抗侧性能均无显著影响.第一刚度 K_1 变化对其耗能及自复位性能几乎没有影响,这是因为 K_1 段内支撑仅有

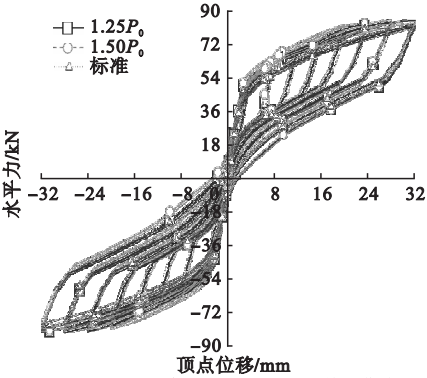
微小的弹性变形,未启动、处于完全的线弹性状态所导致的.进入第二刚度 K_2 后支撑启动,当刚度由 $0.8K_2$ 增加到 $1.25K_2$ 、摩擦力由 $0.6F$ 增加到 F 时,其耗能分别增加了11.6%、20%,但自复位能力均略有下降.当支撑中的初始预拉力由 P_0 增加至 $1.5P_0$ 时,其耗能增加了23.4%,且自复位能力无明显变化,因此增大 P_0 是提升SCEDRC性能简单而有效的方法.



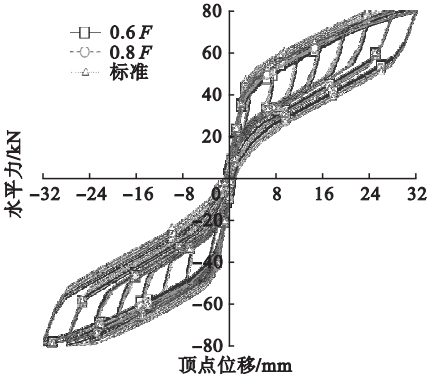
(a) 不同第一刚度 K_1 下SCEDRC滞回曲线



(b) 不同第二刚度 K_2 下SCEDRC滞回曲线



(c) 不同预拉力 P_0 下SCEDRC滞回曲线



(d) 不同摩擦力 F 下SCEDRC滞回曲线

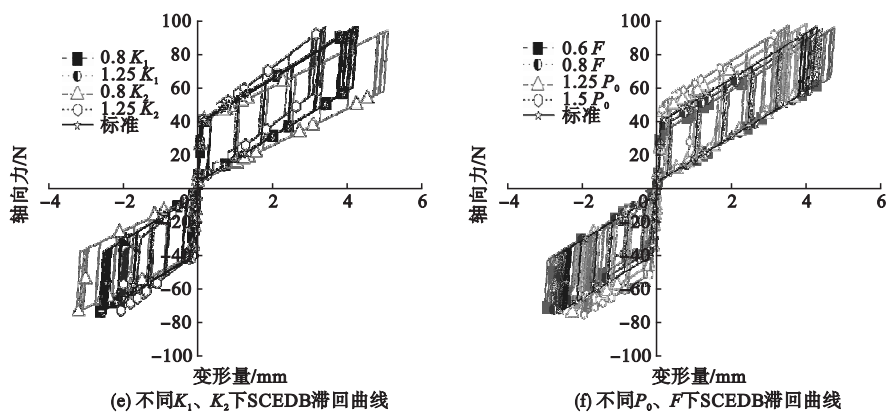


图 7 不同支撑参数下的滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves with different brace parameters

表 4 不同支撑参数下 SCEDRC 的抗侧力

Table 4 Lateral force resistance of SCEDRC with different brace parameters								kN
抗侧力								标准值
0.8K ₁	1.25K ₁	0.8K ₂	1.25K ₂	0.6F	0.8F	1.25P ₀	1.5P ₀	
81.57	81.54	80.18	82.13	80.63	80.32	84.42	84.85	81.56

表 5 不同支撑参数下 SCEDRC 的耗能

Table 5 Energy dissipation of SCEDRC with different brace parameters								kN·mm
耗能								标准值
0.8K ₁	1.25K ₁	0.8K ₂	1.25K ₂	0.6F	0.8F	1.25P ₀	1.5P ₀	
26 462	31 160	8 803	25 121	15 304	16 895	20 633	22 753	18 359

图 7 (e) 和 (f) 为不同支撑参数下 SCEDB 滞回曲线. 从图中可以看出,除了第一刚度 K_1 外,随着支撑其余三个参数的增大,在相同的轴向力下支撑的轴向变形分别减小了 19.6%、10.7%、12.5%,这就意味着在相同的地震力作用下支撑可以有更多的行程冗余,更有利于增加耗能能力,提升结构抗震性能.

3.4 不同支撑长度及柱截面尺寸滞回曲线分析

图 8 为不同支撑长度及柱截面尺寸下 SCEDRC 的滞回曲线;表 6 为不同支撑长度及柱截面尺寸下的耗能及抗侧力对比. 结合

图表可以看出,当柱截面尺寸由 200 mm 增大至 400 mm 时,SCEDRC 抗侧力无明显变化、耗能增大 69.7%,但支撑耗能占比却由 75.9% 下降至 30.5%,且卸载后残余位移增大了 185%,说明柱身产生了较大塑性变形、支撑并没有起到集中耗能和损伤控制的作用,此时无法实现“可恢复功能”的目的. 而支撑长度由 $200\sqrt{2}$ mm 增至 $400\sqrt{2}$ mm 时,SCEDRC 耗能、抗侧力及支撑耗能均增大了 2~3 倍,且不影响其自复位功能. 故在不影响建筑使用功能前提下,增加支撑长度对提升 SCEDRC 性能最为有效.

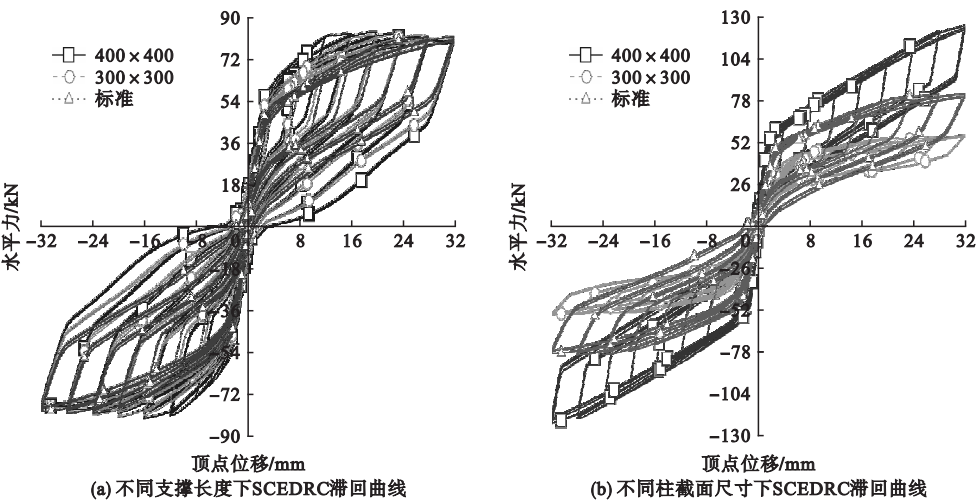


图8 不同支撑长度及柱截面尺寸下 SCEDRC 的滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of SCEDRC with different brace length and column section sizes

表6 不同支撑长度及柱截面尺寸下的耗能及抗侧力

Table 6 Energy dissipation and lateral force resistance with different brace length and column section sizes

参数	SCEDRC		SCEDB 耗能/
	最大抗侧力/kN	耗能/(kN·mm)	(kN·mm)
柱截面 300 mm×300 mm	82.95	26 462	11 981.92
柱截面 400 mm×400 mm	83.63	31 160	9 497.76
支撑长度 $L_s=200\sqrt{2}$ mm	55.58	8 803	7 892.44
支撑长度 $L_s=400\sqrt{2}$ mm	124.42	25 121	22 599.08

4 结 论

(1)自复位耗能摇摆柱(SCEDRC)在保证具有足够的耗能能力的同时可以实现结构的自复位,可以达到预期“可恢复功能”结构的目的。

(2)支撑角度的变化对 SCEDRC 的滞回性能影响显著;各角度的耗能及抗侧力差距最大可达 2~3 倍;5% 轴压比、20°~40° 支撑角,在柱顶位移较大时自复位能力较差;但当轴压比增大到 15% 时得到改善,总体可以表现出良好的自复位能力。

(3)自复位支撑第一刚度 K_1 变化,对 SCEDRC 性能几乎没有影响;随着第二刚度 K_2 、摩擦力 F 的增大耗能增大,但自复位能力略有下降;随着初始预拉力 P_0 的增大耗能增大且自复位性能未受影响。

(4)随着摇摆柱截面尺寸的增大,SCEDRC 中 SCEDB 性能显著下降,无法发挥集中耗能和损伤控制的作用;而在不影响建筑使用功能的前提下,增大支撑长度对提升 SCEDRC 性能最为有效。

参考文献

[1] BERKELEY U C. Report of seventh joint planning meeting of NEES/E-defense collaborative [R]. Berkeley: UC Berkeley, 2010.

[2] HWASUNG R. Seismic behavior of structures using rocking column and viscous dampers [D]. Buffalo: The State University of New York, 2007.

[3] HWASUNG R, ANDREI M R. Analytical modeling of rocking elements[J]. Engineering structures, 2009, 31(5): 1179~1189.

[4] HWASUNG R, ANDREI M R. Modeling and seismic response of structures with concrete rocking columns and viscous dampers[J]. En-

- gineering structures, 2010, 32 (8): 2096 – 2107.
- [5] CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R, KIM H J, et al. Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation [J]. Journal of structure engineering, 2008, 134: 96 – 107.
- [6] EROCHKO J, CHRISTOPOULOS C. Seismic response of six-story steel frame building with self-centering energy-dissipative braces combined with linear viscous dampers [C]. Alaska: Tenth U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Frontiers of Earthquake Engineering, 2014.
- [7] 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 [J/OL]. 中国科技论文在线, 2017, 19. [http://www. paper. edu. cn](http://www.paper.edu.cn).
(JIANG Chun, GAO Wenjun, Lü Xilin. Rocking component and numerical modeling of rocking column based on OpenSees [J/OL]. Science paper on line, 2017, 19. [http://www. paper. edu. cn](http://www.paper.edu.cn).)
- [8] 吕西林, 崔晔, 刘兢兢. 自复位钢筋混凝土框架结构振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (4): 19 – 26.
(Lü Xilin, CUI Ye, LIU Jingjing. Shaking table test of a self-centering reinforced concrete frame [J]. Journal of building structures, 2014, 35 (4): 19 – 26.)
- [9] 高文俊, 吕西林. 自复位钢筋混凝土框架振动台试验的数值模拟 [J]. 结构工程师, 2014, 30 (1): 13 – 19.
(GAO Wenjun, Lü Xilin. Numerical simulation of a self-centering reinforced concrete frame under shaking table [J]. Structural engineers, 2014, 30 (1): 13 – 19.)
- [10] 吕西林, 周颖, 陈聪. 可恢复功能抗震结构新体系研究进展 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34 (4): 130 – 139.
(Lü Xilin, ZHOU Ying, CHEN Cong. Research progress on innovative earthquake-resilient structural systems [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2014, 34 (4): 130 – 139.)
- [11] 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.)
- [12] 周云. 粘弹性阻尼减震结构设计 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.
(ZHOU Yun. Structural design of viscoelastic damping structures [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press of China, 2006.)
- [13] 宋子文. 自复位耗能支撑结构地震响应分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
(SONG Ziwen. Seismic response analysis of structures with self-centering energy dissipative braces [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [14] 李庆松, 黄真, 陈龙珠. 斜隅撑框架体系的弹塑性受力分析 [J]. 工业建筑, 2005, 35 (9): 85 – 87.
(LI Qingsong, HUANG Zhen, CHEN Longzhu. Elastoplastic analysis of KNEE bracing system [J]. Industrial construction, 2005, 35 (5): 85 – 87.)
- [15] 古泉, 黄素蓉. OpenSees 实用教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
(GU Quan, HUANG Surong. Practical tutorials for OpenSees [M]. Beijing: Science Press of China, 2016.)
- [16] PAULAY T, PRIESTLEY M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. New York: Wiley, 1992.
- [17] 陈学伟. 结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
(CHEN Xuewei. Structural nonlinear analysis program OpenSEES theory and tutorial [M]. Beijing: Building Industry Press of China, 2014.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for seismic design of building: GB50011—2010 [S]. Beijing: Building Industry Press of China, 2010.)