

引用本文:郝文秀,魏兴娜,徐 晓,等.方钢管活性粉末混凝土柱地震损伤模型研究[J].建筑科学与工程学报,2022,39(3):165-172.
HAO Wen-xiu, WEI Xing-na, XU Xiao, et al. Study on Seismic Damage Model of Square Steel Tubular Reactive Powder Concrete Columns
[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 165-172.

DOI:10.19815/j.jace.2021.07044

方钢管活性粉末混凝土柱地震损伤模型研究

郝文秀,魏兴娜,徐 晓,于万里

(河北农业大学 城乡建设学院,河北 保定 071001)

摘要:为研究方钢管活性粉末混凝土(RPC)柱在水平低周往复荷载作用下的抗震性能和地震损伤模型,利用 ABAQUS 有限元软件建立了 125 根不同参数(含钢率、轴压比及长细比)的方钢管 RPC 柱模型,对其滞回曲线、骨架曲线、延性及耗能能力进行分析。参考 Park 损伤模型和付国有效耗能假设,提出一种基于变形和有效累积滞回耗能的双参数损伤模型,非线性拟合得到损伤参数 $\alpha=0.851$ 和 $\beta=-0.508$ 。研究结果表明:滞回曲线的形状规则且饱满,说明方钢管 RPC 柱具有良好的变形能力和耗能能力,有限元分析结果与试验结果吻合较好,验证了方钢管 RPC 柱模型建立的正确性;将方钢管 RPC 柱试件的变形和有效累积滞回耗能结果代入损伤模型计算的试件损伤变量 D 值均接近于 1,试件最终破坏形态及其损伤变量 D 值与损伤评估中《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009)规定的地震破坏等级中的破坏现象及其所对应的损伤变量 D 值基本一致,说明该损伤模型能较好地反映方钢管 RPC 柱的地震损伤状态。

关键词:方钢管;活性粉末混凝土柱;地震损伤模型;抗震性能

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2022)03-0165-08

Study on Seismic Damage Model of Square Steel Tubular Reactive Powder Concrete Columns

HAO Wen-xiu, WEI Xing-na, XU Xiao, YU Wan-li

(School of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei, China)

Abstract: In order to study the seismic performance and seismic damage model of reactive powder concrete (RPC) filled square steel tubular columns under horizontal low cyclic loading, 125 models of square steel tubular RPC columns with different parameters (steel ratio, axial compression ratio and slenderness ratio) were established by ABAQUS finite element software, and the hysteresis curve, skeleton curve, ductility and energy dissipation capacity were analyzed. Referring to Park damage model and Fu effective energy consumption hypothesis, a two-parameter damage model based on deformation and effective cumulative hysteresis energy consumption was proposed, and the damage parameters $\alpha=0.851$ and $\beta=-0.508$ were obtained by nonlinear fitting. The study results show that the shapes of the hysteresis curves are regular and full, indicating that the square steel tubular RPC columns has good deformation capacities and energy dissipation capacities. The finite element analysis results are in good agreement with

收稿日期: 2021-07-20

基金项目: 河北省重点研发计划项目(21327209D); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2018209)

作者简介: 郝文秀(1972-),男,河北承德人,副教授,工学博士, E-mail: hwxansys@126.com.

the experimental results, verifying the correctness of the establishment of the square steel tubular RPC column models. According to the results of deformation and effective cumulative hysteresis energy consumption of square steel tubular RPC columns, the damage variable D value calculated by damage model is close to 1. The final failure mode of the specimen and its damage variable D value are basically consistent with the damage phenomenon and its corresponding damage variable D value in the seismic damage level specified in *Classification of Earthquake Damage to Buildings and Special Structures* (GB/T 24335—2009) in the damage assessment, indicating that the damage model can better reflect the seismic damage state of square steel tubular RPC column.

Key words: square steel tube; reactive powder concrete column; seismic damage model; seismic performance

0 引言

活性粉末混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 具有十分优越的力学性能和耐久性能^[1-3]。在地震作用下,与普通混凝土相比,RPC 具有承载力高、耐久性好、良好的抗震性和抗冲击性能等优点,且掺加钢纤维的方钢管 RPC 柱延性较好;与高强混凝土相比,RPC 具有抗拉强度高和体积稳定性良好等优点。然而 RPC 的延性性能比较差,在承载力达到极限状态时会发生脆性破坏^[4-7]。RPC 与钢管结合形成的方钢管 RPC 柱结合了 2 种材料的优点,形成一种承载力高且延性性能好的组合构件^[8-11]。

地震对结构造成破坏的主要原因是结构在水平低周往复荷载作用下会形成内部疲劳损伤,该损伤具有持久性。结构破坏不是突发性的超过其临界破坏值,而是结构内部材料力学性能逐渐发生劣化的过程,即在结构产生的累积损伤达到临界破坏值时,结构将完全破坏。

目前,国内外对于方钢管柱的研究大多集中在力学性能和抗震性能方面,很少有关于地震累积损伤性能方面的研究,而地震引起的累积损伤会使结构产生严重破坏甚至倒塌,并且这种损伤是不可逆的^[12-17]。因此,开展水平低周往复荷载作用下方钢管 RPC 柱的累积损伤性能和地震损伤模型研究是非常必要的。

1 方钢管 RPC 柱损伤评估

方钢管 RPC 柱在地震作用下的损伤属于疲劳荷载作用下产生的损伤。荷载作用一段时间后,方钢管 RPC 柱将反复进入塑性状态。与此同时,柱子产生的变形和滞回耗能将逐渐累积,在疲劳累积损伤变量 D 值达到完全破坏范围后,方钢管 RPC 柱

的承载力急剧下降。

参考《建(物)筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009)规定的地震破坏分级及构件损伤评估方法对方钢管 RPC 柱的损伤程度进行判断,同时参考同课题组 3 个方钢管 RPC 柱试件的试验数据和对应的试件破坏状态,以及桑丹等^[18]提出的钢管混凝土构件及损伤指数的对应关系,确定方钢管 RPC 柱破坏现象和所对应的损伤变量 D 值的取值范围,如表 1 所示。

表 1 试件破坏现象和损伤变量对应关系

Table 1 Corresponding Relationship Between Failure Phenomena and Damage Variables

损坏程度	破坏现象	试件承载能力	损伤变量 D 值
基本完好	钢管表面开始出现屈服	力-位移曲线处于弹性阶段	0.00~0.25
轻微破坏	钢管全面屈服,出现局部屈曲	承载力达到屈服荷载,进入弹塑性阶段	0.25~0.45
中等破坏	钢管出现严重环向鼓曲	承载力达到最大,基本保持稳定,有少量退化	0.45~0.75
严重破坏	钢管出现裂缝,并逐渐扩大	承载力下降,退化速度加快	0.75~0.85
完全破坏	钢管出现断裂,内部混凝土压碎	钢管对内部混凝土无约束作用,承载力急剧下降	0.85~1.00

2 有限元模拟及分析

2.1 有限元模型

利用 ABAQUS 软件建立方钢管 RPC 柱模型,钢管和 RPC 均采用实体单元 C3D8R,其中钢材和 RPC 的本构模型分别采用二次塑流模型和混凝土损伤塑性模型^[19]。模型基本参数包括轴压比、含钢率和长细比,每个基本参数包括 5 组数据,模型基本参数见表 2。柱底端采用固定端约束,柱顶端施加

表 2 模型基本参数
Table 2 Basic Parameters of Model

柱截面边长 B/mm	钢管壁厚 t/mm	柱有效高度 H/mm	轴压比 n	含钢率 α	长细比 λ
200	4	1 000	0.2	0.085	17.54
200	6	1 200	0.4	0.132	21.05
200	8	1 400	0.6	0.181	24.56
200	10	1 600	0.8	0.235	28.07
200	12	1 800	1.0	0.291	31.57

注:轴压比 $n=N/(f_cA)$, N 为轴向压力, A 为柱截面积;长细比 $\lambda=H/i$, i 为回转半径;含钢率 $\alpha=A_s/A_c$, A_s 为钢管截面面积, A_c 为混凝土截面积。

轴向压力和水平位移,水平位移加载顺序为 2、4、6、8、10、13、16、19、22、5、30、35、40、45、50 mm,以后

的位移增量为 10 mm(每级位移加载循环 3 次),直至方钢管 RPC 柱发生破坏。为全面考虑每个基本参数对柱子抗震性能的影响以及使柱模型有限元计算结果更加准确,共建立了 125 根方钢管 RPC 柱模型,其中混凝土抗压强度 $f_c=116.3\text{ MPa}$,弹性模量为 $4.205\times10^4\text{ MPa}$ 。钢材选用 Q235,屈服强度为 327.69 MPa,弹性模量为 $2.06\times10^5\text{ MPa}$ 。

2.2 有限元计算结果及分析

利用 ABAQUS 软件对 125 根方钢管 RPC 柱模型进行有限元计算,分析了 125 根方钢管 RPC 柱在水平低周往复荷载作用下的抗震性能及累积损伤。为减小篇幅,选取具有代表性的 15 根方钢管 RPC 柱的计算结果,见表 3。

表 3 方钢管 RPC 柱有限元计算结果
Table 3 Finite Element Calculation Results of Square Steel Tubular RPC Column

试件编号	含钢率 α	长细比 λ	轴压比 n	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 P_{\max}/kN	峰值位移 Δ_m/mm	破坏位移 δ_m/mm	延性系数 μ	极限位移 δ_u/mm	有效累积滞回耗能/ (kN·m)
FGZ-1	0.085	24.56	0.6	115.87	23.56	134.44	39.21	67.01	2.844	113.19	143.83
FGZ-2	0.132	24.56	0.6	154.11	24.42	175.38	39.51	69.68	2.853	126.51	106.32
FGZ-3	0.181	24.56	0.6	177.62	22.81	209.88	39.31	69.88	3.064	150.93	87.89
FGZ-4	0.235	24.56	0.6	210.51	23.86	244.66	44.69	65.81	2.758	190.04	58.83
FGZ-5	0.291	24.56	0.6	232.11	23.06	277.54	38.39	47.29	2.051	203.91	38.63
FGZ-6	0.085	21.05	0.2	126.20	19.38	152.26	33.47	70.65	3.646	152.01	43.90
FGZ-7	0.085	21.05	0.4	126.78	16.00	155.42	27.45	50.69	3.168	93.09	32.17
FGZ-8	0.085	21.05	0.6	134.16	16.80	163.59	34.35	48.03	2.859	82.90	27.78
FGZ-9	0.085	21.05	0.8	114.26	13.85	137.24	34.43	60.71	4.383	65.51	47.57
FGZ-10	0.085	21.05	1.0	94.85	26.32	108.25	41.01	72.24	2.745	53.39	94.81
FGZ-11	0.181	17.54	0.4	270.24	15.60	302.86	21.32	35.27	2.261	76.63	31.33
FGZ-12	0.181	21.05	0.4	207.24	18.24	243.65	31.98	44.33	2.430	111.04	40.84
FGZ-13	0.181	24.56	0.4	177.00	21.20	203.54	34.83	56.20	2.651	144.02	49.04
FGZ-14	0.181	28.07	0.4	148.11	23.43	176.53	48.88	68.19	2.910	195.69	39.36
FGZ-15	0.181	31.57	0.4	134.63	25.68	156.27	59.81	81.42	3.171	206.17	67.31

方钢管 RPC 柱抗震性能的影响因素有很多,本文采用控制单一变量法来研究。针对一种影响因素分别从滞回曲线、骨架曲线、延性系数及耗能能力 4 个方面进行研究分析。

2.2.1 滞回曲线

图 1 为 15 个不同影响因素下的柱模型荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线,滞回曲线大多呈现“饱满”状态,表明方钢管 RPC 柱吸收地震能量的能力较强,具有很好的抗震性能。

2.2.2 骨架曲线

图 2 为不同影响因素下柱模型骨架曲线对比。由图 2(a)可见,随着含钢率增加,柱峰值荷载由 134.44 kN 增长到 277.54 kN,屈服荷载也相应增大。由图 2(b)可见:轴压比在 0.2~0.8 之间,柱弹

性阶段的刚度比较接近,而峰值荷载随着轴压比增大先略有增加后减小;轴压比达到 1.0 时,峰值荷载和屈服弯矩随着轴压比增大明显降低。由图 2(c)可见,长细比越大,弹塑性阶段刚度和极限承载力越小,柱模型越早进入屈服阶段,而骨架曲线的下降速率越小,说明长细比越大,柱模型的变形性能越好。

2.2.3 耗能能力

在水平低周往复荷载作用下,结构处于持续的加卸载过程中。在加载和卸载 2 个过程中, $P-\Delta$ 滞回曲线与坐标轴所围成的面积分别代表方钢管 RPC 柱吸收能量和释放能量的大小,即结构耗能大小,而耗能大小代表结构在地震中消耗地震能量的能力。因此,耗能能力能够作为评价结构抗震性能的一个指标。计算得到不同影响因素下柱模型累积

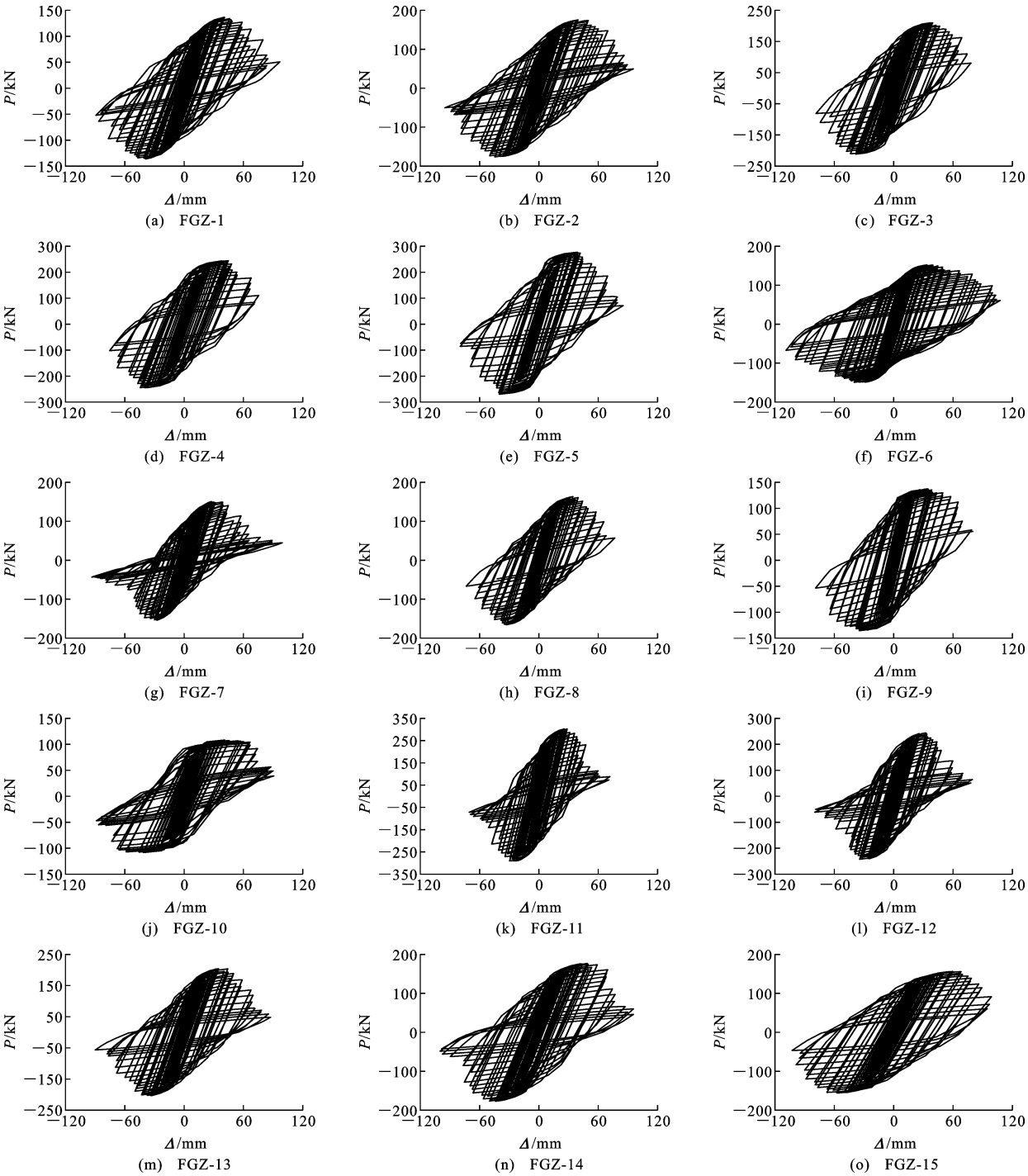


图 1 滞回曲线

Fig. 1 Hysteresis Curves

滞回耗能 E 随加载位移的变化曲线,见图 3。

由图 3 可见:在达到屈服位移之前,柱子的累积滞回耗能比较小,且增长缓慢;随着加载位移的增大,柱子进入弹塑性阶段,累积滞回耗能也相应增加,增长速度较快;加载后期,柱子由于受到疲劳损伤的影响,相应的耗能能力曲线趋于平缓。

2.2.4 延性性能

往复荷载作用下柱模型的延性一般采用延性系

数 μ 来表示,本文采用能量等效法确定方钢管 RPC 柱正反向的屈服荷载 P_y 及对应屈服位移 Δ_y 的平均值,不同影响因素下柱模型的延性系数见表 3。

由表 3 可知,方钢管 RPC 柱的延性系数在 2.051~4.383 之间,说明方钢管 RPC 柱具有很好的变形能力。随着长细比增大,柱的延性系数呈现增大趋势,从 2.261 增长到 3.171。柱的延性系数随含钢率的增大先增加后略有下降。柱的延性系数

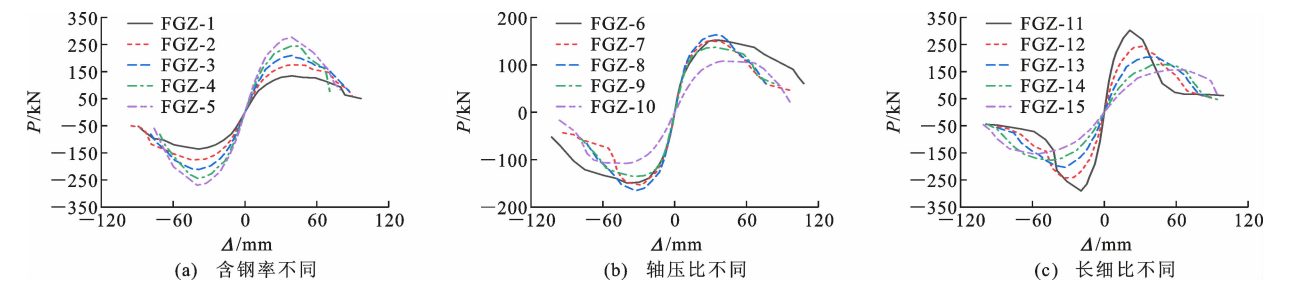


图 2 不同影响因素下试件骨架曲线对比

Fig. 2 Comparison of Skeleton Curves of Specimens Under Different Influence Factors

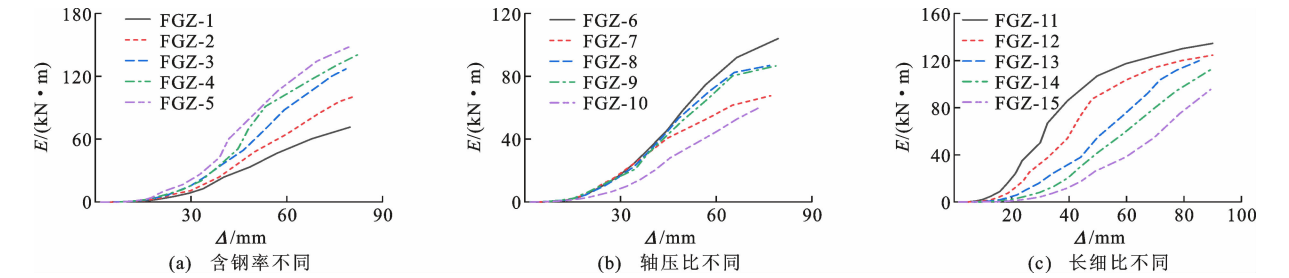


图 3 不同影响因素下试件耗能曲线对比

Fig. 3 Comparison of Energy Consumption Curves of Specimens Under Different Influence Factors

随着轴压比增大而减小,柱子的变形性能逐渐降低。

2.3 有限元分析与试验结果比较

参考 3 个水平低周往复荷载作用下方钢管 RPC 柱试验试件(试件的设计参数见表 4,加载制度与有限元模型加载方式相同)建立方钢管 RPC 柱模型,将柱模型和试件在水平低周往复荷载作用下的滞回曲线和骨架曲线进行对比。

图 4 为方钢管 RPC 柱模型与试件的滞回曲线对比。图 5 为方钢管 RPC 柱模型与试件的骨架曲线对比。由图 4、5 可见,有限元模拟的滞回曲线、骨架曲线与试验曲线吻合较好,说明有限元计算模型

是正确的、合理的,利用 ABAQUS 软件建立的柱模型能够较好地模拟方钢管 RPC 柱在水平低周往复荷载作用下的受力过程。

3 损伤分析

3.1 建立损伤模型

为了将结构的损伤程度更加清晰直观地表达出来,参考 Park 的双参数损伤模型和付国等提出的有效耗能假设^[20-21],本文提出了变形和有效累积滞回耗能非线性组合的损伤模型,其表达式为

表 4 试件设计参数

Table 4 Test Piece Design Parameters

试件编号	钢管壁厚 t/mm	长细比 λ	含钢率	钢纤维掺量体积率/%	钢管屈服强度 f_y/MPa	钢管极限强度 f_u/MPa
1	4	20.78	0.085	1	280.3	350.3
2	6	20.78	0.132	1	300.5	370.2
3	8	20.78	0.181	1	330.4	390.0

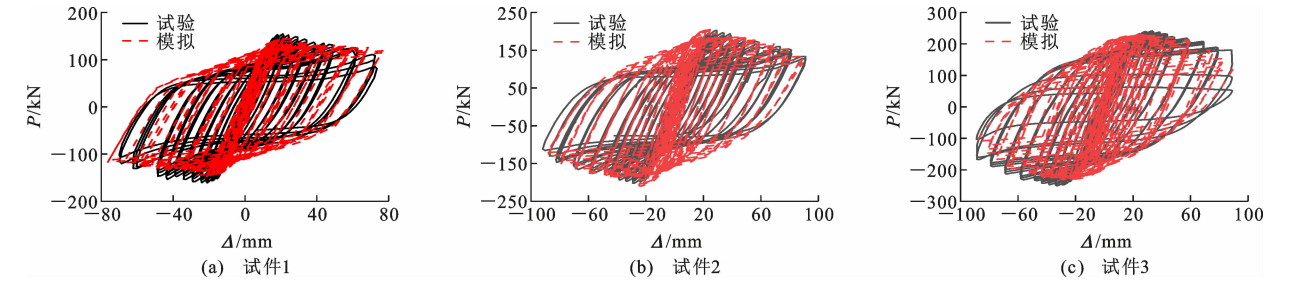


图 4 滞回曲线对比

Fig. 4 Comparison of Hysteresis Curves

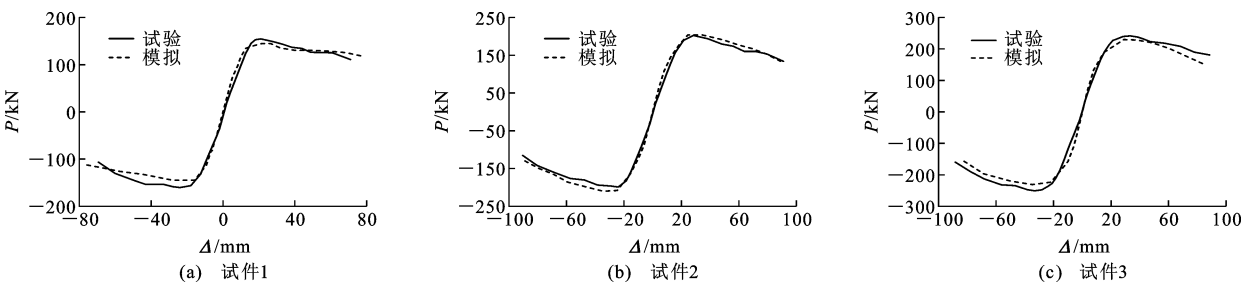


图 5 骨架曲线对比

Fig. 5 Comparison of Skeleton Curves

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \alpha \left(\frac{\sum e_j E_j}{Q_y \delta_u} \right)^\beta \tag{1}$$

式中： δ_m 为水平低周往复荷载作用下试件的最大变形； δ_u 为试件单调加载下的极限位移； Q_y 为试件的屈服力； E_j 为试件在第 j 个加载循环下的滞回耗能； e_j 为试件在第 j 个加载循环下的有效耗能因子； α 和 β 均为损伤参数。

3.1.1 最大变形和极限位移

因为水平低周往复荷载作用会对试件产生累积损伤,故与单调荷载作用相比,水平低周往复荷载作用下试件的最大变形即破坏点位移 δ_m 比单调荷载作用下的极限位移 δ_u 小。本文取方钢管 RPC 柱在水平往复荷载作用下最大变形 δ_m 为其骨架曲线下降段承载力为峰值承载力 85% 时所对应的变形,方钢管 RPC 柱在单调荷载作用下的极限位移 δ_u 为其承载力下降到峰值承载力 85% 时所对应的位移^[22-24],其中 15 根方钢管 RPC 柱模型的最大变形 δ_m 和极限位移 δ_u 见表 3。

3.1.2 有效累积滞回耗能

有效累积滞回耗能是结构处于非弹性阶段时耗能能力之和的大小,本文引入有效耗能因子计算有效累积滞回耗能,其中 15 根方钢管 RPC 柱模型的有效累积滞回耗能见表 3。

3.2 确定损伤参数

对 125 根方钢管 RPC 柱模型的变形和有效累积滞回耗能进行非线性拟合,得到损伤参数 $\alpha = 0.851$ 和 $\beta = -0.508$,所以方钢管 RPC 柱在水平低周往复荷载作用下的地震损伤模型为

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + 0.851 \left(\frac{\sum e_j E_j}{Q_y \delta_u} \right)^{-0.508} \tag{2}$$

3.3 验证损伤模型

为验证上述损伤模型的可靠性,利用 3 个试件的试验数据对该损伤模型进行验算,得到的损伤变量 D 值见表 5。

表 5 试件损伤变量

Table 5 Damage Variables of Specimens

试件编号	破坏点位 移 δ_m /mm	极限位移 δ_u /mm	有效累积滞回耗能 $\sum e_j E_j / (\text{kN} \cdot \text{m})$	屈服力 Q_y/kN	损伤变 量 D 值
1	45.75	109.21	27.34	145	1.064
2	58.05	142.13	43.40	185	1.068
3	69.79	189.61	62.78	223	1.064

由表 5 可以看出,3 个试件在低周往复荷载作用下的损伤变量 D 值均接近于 1,说明 3 个试件最终的损坏程度均达到完全破坏。试件的最终破坏形态和损伤变量 D 值与前面损伤评估中的破坏现象和所对应的损伤变量 D 值相吻合,验证了有限元计算结果拟合得到损伤模型的合理性,为实际工程中方钢管 RPC 结构的损伤分析提供了理论计算依据。

4 结 语

(1)利用 ABAQUS 建立 125 根方钢管 RPC 柱模型,并模拟柱在水平低周往复荷载作用下的受力过程。结果表明:方钢管 RPC 柱具有良好的抗震性能,随着含钢率的增加,方钢管 RPC 柱的峰值荷载和耗能能力不断提高。轴压比较小时,柱的弹性刚度变化不大,但随着轴压比增加,峰值荷载先略有增加后又下降,轴压比达到 1.0 时,峰值荷载和屈服弯矩明显下降。柱的峰值荷载随着长细比增加而下降,但变形能力逐渐增强。

(2)在方钢管 RPC 柱试验的基础上,建立了方钢管 RPC 柱有限元模型,通过对比有限元模拟的滞回曲线、骨架曲线计算结果与试验结果发现,两者吻合较好,说明本文建立的方钢管 RPC 柱有限元模型是正确的、合理的。

(3)提出一种基于变形和耗能的方钢管 RPC 柱双参数地震损伤模型,对方钢管 RPC 柱模型的变形和有效累积滞回耗能进行非线性拟合得到损伤参数 $\alpha = 0.851$, $\beta = -0.508$,确定了方钢管 RPC 柱损伤模型表达式。将方钢管 RPC 柱试验的变形和有效

累积滞回耗能结果代入提出的双参数损伤模型计算得出损伤变量 D 值均接近于 1,说明该损伤模型是可靠的、合理的,能够准确反映方钢管 RPC 柱在地震作用下的损伤情况。

参考文献:

References:

- [1] 屈文俊,邬生吉,秦宇航. 活性粉末混凝土力学性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(4):13-18.
QU Wen-jun, WU Sheng-ji, QIN Yu-hang. Mechanical Property Tests of Reactive Powder Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4):13-18.
- [2] 闫志刚,罗 华,安明喆. 钢管活性粉末混凝土柱界面黏结性能研究[J]. 土木工程学报,2010,43(8):57-62.
YAN Zhi-gang, LUO Hua, AN Ming-zhe. A Study of the Bond Behavior of the Interface of Reactive Powder Concrete Filled Steel Tube Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(8):57-62.
- [3] MATTE V, MORANVILLE M. Durability of Reactive Powder Composites; Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(1):1-9.
- [4] DUGAT J, ROUX N, BERNIER G. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes[J]. Materials and Structures, 1996, 29(4):233-240.
- [5] 单 波,单 宇,刘福财,等. 活性粉末混凝土预制管组合柱抗震性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2020,42(4):94-104.
SHAN Bo, SHAN Yu, LIU Fu-cai, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Concrete-filled Reactive Powder Concrete Tube[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4):94-104.
- [6] 郝文秀,钟铁毅. 活性粉末混凝土桥墩延性试验研究与数值分析[J]. 土木工程学报,2010,43(6):82-86.
HAO Wen-xiu, ZHONG Tie-yi. Experimental Study and Numerical Analysis of the Ductility of Reactive Powder Concrete Piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6):82-86.
- [7] 季文玉,罗 华,杨国静. 钢管活性粉末混凝土长柱轴压性能试验研究[J]. 中国铁道科学,2014,35(1):28-33.
JI Wen-yu, LUO Hua, YANG Guo-jing. Experimental Research on Mechanical Behavior of Axially Loaded RPC Filled Circular Steel Tube Slender Column[J]. China Railway Science, 2014, 35(1):28-33.
- [8] 戎 芹,曾宇声,侯晓萌,等. 圆钢管钢纤维活性粉末混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):247-253.
RONG Qin, ZENG Yu-sheng, HOU Xiao-meng, et al. Experimental Study on Mechanical Behavior of RPC-filled Circular Steel Tube Columns Under Axial Compression[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3):247-253.
- [9] 牛志强,郝文秀,杜喜凯,等. 方钢管活性粉末混凝土轴压柱力学性能试验研究[J]. 建筑科学,2018,34(7):78-84.
NIU Zhi-qiang, HAO Wen-xiu, DU Xi-kai, et al. Experimental Study on the Mechanical Properties of the Square Steel Tube Reactive Powder Concrete Columns by Axial Compression[J]. Building Science, 2018, 34(7):78-84.
- [10] 吴炎海,林震宇. 钢管活性粉末混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 中国公路学报,2005,18(1):57-62.
WU Yan-hai, LIN Zhen-yu. Experimental Study of Behavior on RPC Filled Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1):57-62.
- [11] 王秋维,王 杨,张春尧,等. 基于 ABAQUS 的钢管活性粉末混凝土短柱轴压受力性能研究[J]. 防灾减灾工程学报,2019,39(3):421-429.
WANG Qiu-wei, WANG Yang, ZHANG Chun-yao, et al. Numerical Simulation Analysis on Mechanical Behavior of Axially Loaded Reactive Powder Concrete Filled Steel Tube Short Columns[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3):421-429.
- [12] HAN B G, DONG S F, OU J P, et al. Microstructure Related Mechanical Behaviors of Short-cut Super-fine Stainless Wire Reinforced Reactive Powder Concrete [J]. Materials & Design, 2016, 96:16-26.
- [13] 裴万吉,赵均海,魏雪英. 钢管混凝土的截面形式及其承载力分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):49-53.
PEI Wan-ji, ZHAO Jun-hai, WEI Xue-ying. Analysis of Section Types of Concrete-filled Steel Tube and Its Load Capacity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):49-53.
- [14] FU G Y, FU G Y, YU C J, et al. Behaviour of Rectangular Concrete-filled Steel Tubular Slender Column with Unequal Wall Thickness[J]. Engineering Structures, 2021, 236:112100.
- [15] WANG Q, SHI Q, XU Z, et al. Axial Capacity of Re-

- active Powder Concrete Filled Steel Tube Columns with Two Load Conditions[J]. Steel and Composite Structures, 2019, 31(1): 13-25.
- [16] VIVEK D, SRIDHAR J, ELANGO K S, et al. Axial Compressive Behaviour of Concrete Filled Steel Tubular Column[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1145(1): 012017.
- [17] ZHANG Y Y, HUANG Y, LEI K, et al. Seismic Behaviors of Steel Bar Reinforced Joints of Concrete Filled Steel Tubular Laminated Columns[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(9): 3491-3503.
- [18] 桑 丹, 王 璐. 轴向往复荷载作用钢管混凝土柱损伤模型研究[J]. 四川建材, 2018, 44(8): 53-54.
SANG Dan, WANG Lu. Study on Damage Model of Concrete Filled Steel Tubular Columns Under Axial Reciprocating Load[J]. Sichuan Building Materials, 2018, 44(8): 53-54.
- [19] 邓宗才, 顾佳培, 贺少锋. 活性粉末混凝土短柱抗震性能数值模拟[J]. 建筑科学, 2019, 35(7): 119-127.
DENG Zong-cai, GU Jia-pei, HE Shao-feng. Numerical Simulation on Seismic Performance of Reactive Powder Concrete Short Columns[J]. Building Science, 2019, 35(7): 119-127.
- [20] PARK Y J, ANG A H S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [21] 付 国, 刘伯权, 邢国华. 基于有效耗能的改进 Park-Ang 双参数损伤模型及其计算研究[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 84-90.
- FU Guo, LIU Bo-quan, XING Guo-hua. The Research and Calculation on Modified Park-Ang Double Parameter Seismic Damage Model Based on Energy Dissipation[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 84-90.
- [22] 钱稼茹, 李宁波, 纪晓东, 等. 复合钢管高强混凝土柱累积损伤性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 30-40.
QIAN Jia-ru, LI Ning-bo, JI Xiao-dong, et al. Experimental Study on Cumulative Damage Performance of Composite-sectioned High Strength Concrete-filled Steel Tubular Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 30-40.
- [23] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [24] 张素梅, 刘界鹏, 王玉银, 等. 双向压弯方钢管高强混凝土构件滞回性能试验与分析[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 9-18.
ZHANG Su-mei, LIU Jie-peng, WANG Yu-yin, et al. Hysteretic Behavior of Biaxially Loaded High Strength Concrete-filled Square Hollow Section Beam-columns[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 9-18.