

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230918001

方钢管超高性能混凝土柱抗震性能试验及数值模拟*

李慧玮¹, 仵鹏涛¹, 刘中宪¹, 刘国瑞², 徐慎春³, 安凯旋⁴

(1. 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384; 2. 天津城建大学 计算中心, 天津 300384;
3. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006; 4. 长治职业技术学院 土木工程系, 山西 长治 046000)

摘要: 钢管混凝土柱因其承载力高、抗震性能良好且施工方便等特点成为建筑结构发展方向之一,但目前对于钢管超高性能混凝土柱抗震性能研究较少。对不同类型方钢管混凝土柱抗震性能(4根方钢管超高性能混凝土柱、1根方钢管高强混凝土、1根方钢管普通混凝土)进行对比分析研究。结合6根方钢管混凝土柱的低周往复试验数据,建立纤维有限元模型进行参数分析。主要研究了在低周往复荷载作用下的破坏形式、滞回曲线、骨架曲线、延性以及耗能能力等,分析了轴压比、含钢率和混凝土种类等主要设计参数的影响规律。结果表明:(1)纤维有限元模型能够有效分析方钢管超高性能混凝土柱滞回特性;(2)与方钢管普通混凝土柱和高强混凝土柱相比,方钢管超高性能混凝土柱抗震性能更为优异;(3)方钢管超高性能混凝土柱随着轴压比的提高,试件水平承载力及刚度增大,但延性降低;随着含钢率的增加,试件水平承载力、刚度、延性及耗能能力均提高;随着钢纤维体积率的增加,试件延性、耗能能力提高。

关键词: 超高性能混凝土; 抗震性能; 低周往复试验; 纤维模型

中图分类号: TU398⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1084-10

Seismic Performance Test and Numerical Simulation of Square Steel Tube UHPC Columns

LI Huiwei¹, WU Pengtao¹, LIU Zhongxian¹, LIU Guorui², XU Shenchun³, AN Kaixuan⁴

(1. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin 300384;

2. Computing Center, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

3. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangdong 510006, China;

4. Department of Civil Engineering, Changzhi Vocational and Technical College, Changzhi 046000, China)

Abstract: Concrete-filled steel tubular (CFST) columns have become a key development direction in building structures due to their high bearing capacity, good seismic performance, and convenient construction. However, there is currently limited research on the seismic performance of ultra-high performance concrete (UHPC) CFST columns, making further investigation necessary. This paper conducted a comparative analysis of the seismic performance of different types of square CFST columns

* 收稿日期:2023-09-18;修回日期:2024-06-28

基金项目:国家自然科学基金项目(52308518)、天津市企业科技特派员项目(23YDTPJC00100)资助

作者简介:李慧玮(1995—),女,硕士研究生。主要从事混凝土抗震性能领域研究。E-mail:361631762@qq.com

通信作者:仵鹏涛(1989—),男,博士研究生。主要从事超高性能混凝土结构抗爆抗冲击领域研究。

E-mail:wupengtao0228@tcu.edu.cn

(4 UHPC square CFST columns, 1 high-strength square CFST column, and 1 ordinary square CFST column). Using low-cyclic loading test data from 6 square CFST columns, a fiber finite element model was established to perform a parametric analysis. The study mainly investigated failure modes, hysteresis curves, skeleton curves, ductility and energy dissipation capacity under low-cyclic loading test, and analyzed the influence of main design parameters such as axial compression ratio, steel ratio and concrete type. The results showed that: (1) The fiber finite element model could effectively analyze the hysteretic characteristics of UHPC square CFST columns. (2) Compared to ordinary and high-strength square CFST columns, UHPC square CFST columns exhibited better seismic performance. (3) As the axial compression ratio increased, the horizontal bearing capacity and stiffness of the test specimens increased, but ductility decreased. As the steel content increased, the horizontal load-bearing capacity, stiffness, ductility, and energy dissipation capacity of the specimens all improved. As the volume fraction of steel fiber increased, the ductility and energy dissipation capacity of the specimens were improved.

Keywords: ultra-high performance concrete; seismic performance; low-cyclic loading test; fiber model

0 引言

钢管混凝土柱因其承载力高、抗震性能良好且施工方便等特点成为建筑结构发展方向之一。众多学者基于试验及有限元仿真,对钢管混凝土柱长细比、含钢率以及轴压比等参数进行分析,研究了钢管混凝土柱的抗震性能。聂瑞锋等^[1]对6根钢管混凝土柱进行低周反复荷载试验及数值模拟发现钢管混凝土柱耗能能力及塑性变形能力优异。吕西林等^[2]通过改变宽厚比、轴压比及核心混凝土强度等参数,得到方钢管混凝土柱抗震性能优于普通钢筋混凝土柱。王铁成等^[3]在验证有限元模型的准确性后,改变试件含钢率、长细比及轴压比等,结果发现试件处于高含钢率、轴压比且长细比较小时耗能能力最好。王景玄等^[4]基于OpenSees平台对钢管混凝土结构进行滞回性能及动力时程分析。王秋维等^[5]使用Abaqus对钢管RPC短柱轴压力学性能研究发现:增加钢材强度及含钢率可有效提高短柱极限及残余承载力。闻洋等^[6]对圆钢管再生混合混凝土框架结构进行低周往复试验发现:增加柱截面含钢率可提高结构水平承载力、延性及耗能能力,且刚度退化减慢。

曾繁良等^[7]对钢管混凝土柱排架-核心筒结构抗震性能进行研究,基本自振周期和阻尼比随震损增加而增大,动力放大效应减小,长周期地震动反应较显著。刁延松等^[8]通过低周往复试验,研究了新型异形钢管混凝土柱-钢梁节点抗震性能,与外隔

板式节点相比,新型节点具有较高的承载力、较好的延性和耗能能力。张艺欣等^[9]对装配式核心钢管混凝土柱进行了抗震性能试验研究,结果表明装配式核心钢管混凝土柱均发生预期的弯曲破坏模式,滞回曲线饱满,承载力、刚度和耗能能力与现浇柱接近,极限位移角与延性略有增加。何子奇等^[10]研究了十字形钢管混凝土柱-H形钢梁框架节点抗震性能,研究结果表明节点的滞回曲线饱满,节点域的变形和耗能能力较强;建立的有限元分析模型可用于模拟节点的抗震性能。程睿等^[11]研究方钢管混凝土柱与U形钢组合梁分离式内隔板节点的抗震性能,结果表明:4个节点试件的破坏模式均为梁端受弯破坏,滞回曲线呈反S形、有明显的捏缩现象;加强梁柱交界面处的连接可减缓刚度退化速度、显著提高节点的承载能力和耗能能力。武海鹏等^[12]对异形截面多腔钢管混凝土分叉柱的抗震性能进行了试验研究,并基于试验结果及截面构造特点,进行了数值计算。试验及数值计算结果表明:钢管钢板整体加厚构造承载力略有提高;提出的异形多腔钢管混凝土柱简化建模方法计算效率较高,精度满足工程设计要求。

高强混凝土因其承载力高且耐久性好,可有效减小构件截面面积,减少自重并增大建筑可使用面积。因此,在钢管普通混凝土柱抗震性能研究基础上,学者们展开对钢管高强混凝土柱的研究。如韩林海^[13]通过分析得到钢管高强混凝土压弯构件力学性能变化与钢管普通混凝土柱类似。徐礼华等^[14]通过对钢管自应力自密实高强混凝土中长柱

进行轴心受压试验,分析不同参数对试件极限承载力以及延性影响。李宁波等^[15]使用OpenSees对外方内圆复合钢管高强混凝土柱进行抗震性能分析,增大圆钢管直径及壁厚可有效提高承载能力及耗能。近年来研究多集中于钢管高强混凝土柱,但高强混凝土相比普通混凝土延性差。为改善此缺点,可选用强度高、塑性及韧性大且自密实易浇筑的超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)。L. H. An等^[16]通过对18根圆钢管超高性能混凝土柱进行单轴压缩试验,研究发现钢纤维可有效增强试件延性并减小局部变形。目前对于钢管超高性能混凝土柱抗震性能研究甚少,有必要展开深入研究。

本文首先给出了6根方钢管混凝土柱(4根方钢管超高性能混凝土柱、1根方钢管高强混凝土、1根方钢管普通混凝土)低周往复试验结果,在此基础上建立了纤维有限元模型,详细讨论了轴压比、含钢率、混凝土种类以及UHPC钢纤维体积率对方钢管混凝土柱抗震性能的影响。

1 试验概况

本试验试件以两端固接、反弯点为中心的框架柱为模型,进行1/2缩尺设计。在方钢管混凝土柱顶端,使用500 t竖向千斤顶和200 t液压伺服作动器分别施加轴力和水平往复荷载(图1),以模拟钢管混凝土柱在地震作用下的破坏形式。为保证试验的精确性,在正式试验开始前先以设计轴力的50%进行预加载,使试件受力均匀,并检查试验装置及测量仪器是否工作正常,而后加载到设计轴力直至试验结束。在此期间,水平往复荷载采用位移控制,首先以0.25%、0.5%、0.75%的侧移率分别施加一次循环位移,后以1%、1.75%、2.5%(以0.75%

等差增长)分别施加三次循环位移直至承载力下降至峰值的85%或试件破坏。

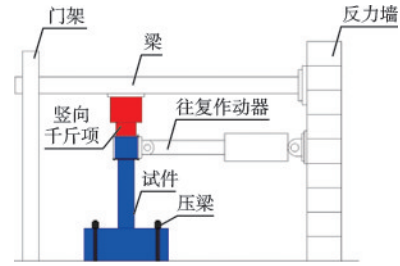


图1 试验加载装置

Fig.1 Diagram of the test setup

图2为加载方案示意图。本试验设计制作6根方钢管混凝土柱,其中包括4根方钢管超高性能混凝土(UHPC)柱、1根方钢管高强混凝土(High Strength Concrete, HSC)、1根方钢管普通混凝土(Normal Strength Concrete, NSC)柱。通过调整轴压比、含钢率、混凝土强度和钢纤维体积率等参数进行对比与分析。试件设计参数及钢纤维见表1、表2。钢材选用Q345B钢(表3),含钢率计算公式为 $\alpha = A_s / A_{con}$ 。轴压比 $n = N / (A_s f_y + A_{con} f_c)$,其中 N 为实际施加轴力, A_s 为钢管面积, f_y 为钢管屈服强度。 A_{con} 为核心混凝土截面面积。由于缺乏试验数据以及为安全起见,本文试件竖向承载力计算较为保守, f_c 取为0.85倍混凝土圆柱体抗压强度(f'_c)。

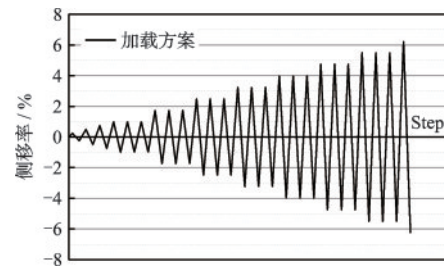


图2 加载方案示意

Fig.2 Schematic diagram of the loading scheme

表1 试件设计参数

Table 1 Specimen design parameters

试件编号	$D \times t \times h / \text{mm}$	混凝土强度等级/MPa	轴压比 n	含钢率 α	钢纤维体积率 $\lambda / \%$
S-150-0.24-0.067-2	250×4×1 250	UHPC150	0.24	0.067	2
S-150-0.24-0.085-2	250×5×1 250	UHPC150	0.24	0.085	2
S-150-0.36-0.085-2	250×5×1 250	UHPC150	0.36	0.085	2
S-150-0.24-0.067-1	250×4×1 250	UHPC150	0.24	0.067	1
S-80-0.24-0.067-0	250×4×1 250	C80	0.24	0.067	0
S-30-0.24-0.085-0	250×5×1 250	C30	0.24	0.085	0

注:S代表试件, D 为试件边长, h 为试件高度, t 为钢管厚度, C 为混凝土强度

表2 钢纤维性质

Table 2 Properties of steel fibers

钢纤维	直径/mm	长度/mm	抗拉强度/MPa
MF10	0.12	10	>4 000

表3 钢材性能参数

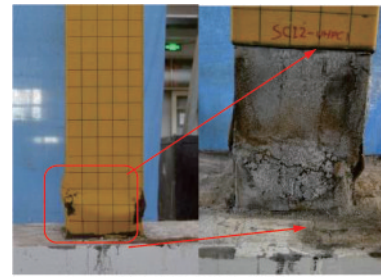
Table 3 Properties of steel

钢材等级	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
Q345B	205	360	527

2 试验结果与结果分析

对6根方钢管混凝土柱进行低周往复水平荷载试验研究发现:加载初期,试件均处于弹性阶段。在水平荷载作用下,布置于试件上的应变示数均匀变化且钢管表面未出现明显变化。随着水平荷载逐级增加,底部受压区将出现微小的屈曲现象,但在随后循环荷载作用下受压区底部屈曲现象被拉平,同时试件对侧也将开始出现微小的屈曲现象。在荷载逐级增大的过程中,屈曲现象越来越明显,屈曲范围越来越大,同时试件其余两侧也将开始出现微小的屈曲现象。当钢管的屈曲现象扩展到无法恢复的状态,核心混凝土将失去钢管对它的约束作用,承载力将开始迅速下降。当试件承载力下降至峰值的85%以下时,柱底屈曲现象快速发展形成环状灯笼形破坏(图3)。

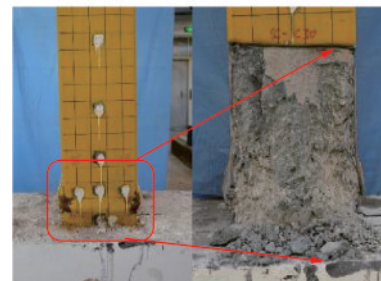
试验过程中发现,6根柱的破坏形式都表现为压弯破坏,但破坏过程稍有差别。具体过程表现为:掺钢纤维的方钢管超高性能混凝土柱和普通混凝土柱表现为钢管先发生屈服,后发生屈曲现象;高强混凝土柱则表现为先屈曲后屈服。在试件破坏过程中,核心混凝土为高强和普通混凝土时试件将出现混凝土碎裂的声音,而方钢管超高性能混凝土柱,由于钢纤维对核心混凝土的阻裂、增韧作用并未听到响声。为直观观察核心混凝土破坏情况将钢管底部切开:当核心混凝土为普通及高强混凝土时,核心混凝土大面积剥落;超高性能混凝土仅在屈曲段形成多条压弯裂缝,并没有出现严重的剥落现象,表现出较好的完整性。试件典型破坏形式如图3所示。



(a) S-150-0.24-0.085-2



(b) S-80-0.24-0.067-0



(c) S-30-0.24-0.085-0

图3 试件破坏示意

Fig.3 Failure patterns of the specimens

3 数值模拟

3.1 数值模拟方法

有限元软件分析钢管混凝土结构,建立模型大致分为两类:三维实体单元模型和纤维梁柱单元模型。三维实体单元有限元模型具有计算精度高,对局部破坏描述完整的特点,但实体单元具有计算成本高、不易收敛等缺点。纤维梁柱单元有限元模型具有建模、力学概念简单且计算快捷的特点。本文使用有限元软件Ls-dyna建立纤维梁柱单元模型对钢管混凝土柱进行抗震性能分析。该模型符合平面假定,并且忽略粘结滑移问题和剪切变形。建立纤维模型采用离散单元法,将试件沿轴向划分单元,单元截面沿s、t轴划分纤维,定义各纤维单轴应力-应变曲线,而后通过积分得到截面以及整个试件的弯矩与挠度变形。

3.2 有限元模型

在建立钢管混凝土柱模型时,采用自底而上的建模方式,按照柱子轴向划分为6个单元、7个节点(图4)。柱底端采用与试验模型相同的固接方法,顶端施加恒定轴压和往复水平荷载。单元截面被划分为36个纤维,其中因考虑试件破坏时易在钢管角部开裂问题将钢管划分为20个纤维积分点和16个混凝土纤维积分点(图5)。

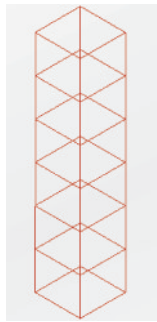


图4 单元划分
Fig.4 Unit division

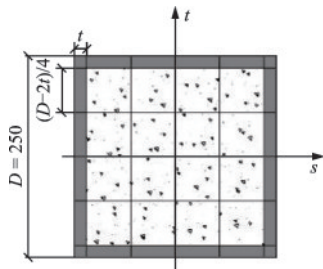


图5 积分点划分
Fig.5 Division of Integral points

3.3 本构模型

钢材和混凝土材料本构模型均选择符合地震循环特性的材料模型**MAT_RC_BEAM*。定义混凝土纤维积分点时,输入质量密度、弹性模量、圆柱体极限抗压强度以及极限应变等参数。混凝土本构选用Blakeley-Park模型^[17],该模型应力-应变曲线包络于修正Park-Kent模型(图6)中,通过引入强度提高系数K,体现钢管对核心混凝土强度及延性的提高作用,且此模型刚度随反复加卸载降低。混凝土抗拉强度以线性上升至极限拉应力,后以试验得出混凝土开裂斜率下降。本文根据修正后的Park-Kent模型进一步修改超高性能混凝土本构模型所

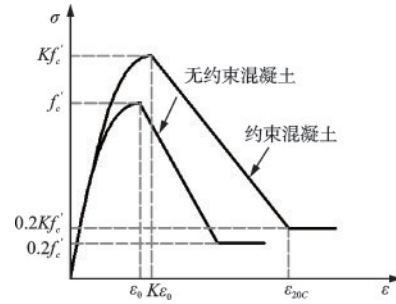


图6 修正 Park-Kent模型
Fig.6 Modified Park-Kent model

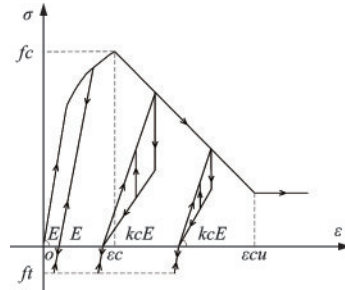


图7 Blakeley-Park模型^[17]
Fig.7 Blakeley-Park Model^[17]

需参数。钢纤维主要影响材料的强度和韧性。在本构中,通过修改极限强度、延性、抗拉强度等参数考虑钢纤维的掺入。

当定义钢材纤维积分点时,单轴荷载应力-应变曲线为先以杨氏模量为斜率上升至钢材屈服点,屈服点之后产生塑性流动,后进入应变强化阶段直至钢材极限强度。在往复荷载作用下,钢材处于弹性阶段时,加卸载恢复力模型都以杨氏模量为斜率。屈服点之后的弹塑性阶段由Ramberg-Osgood模型^[18]符合Bauschinger效应。

4 模拟结果及其验证

4.1 滞回曲线

图8为各试件荷载-位移滞回曲线模拟与试验结果对比图,曲线吻合良好并得出以下结论:试件屈服前处于弹性阶段时,各级滞回环呈现狭而细长特点,曲线斜率几乎无变化。试件随着水平荷载的增大屈服后,滞回环面积不断增大趋于饱满,试件刚度不断退化。方钢管超高性能混凝土柱与普通混凝土柱滞回曲线均饱满成纺锤形,无明显捏缩现象。但内填高强混凝土滞回环面积狭小,耗能能力减小。

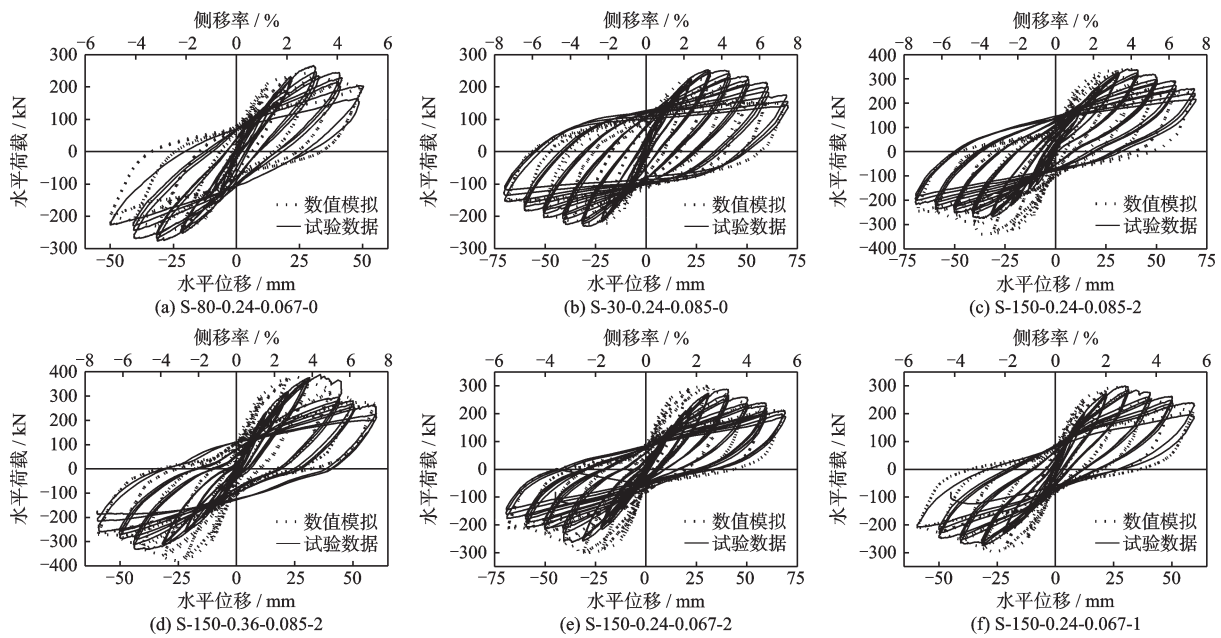


图8 荷载-位移滞回曲线

Fig.8 Load-displacement hysteresis loops

在其它参数不变的情况下,随着轴压比的增加,滞回曲线仍饱满,水平承载力提高,但极限位移相对减小。随着含钢率的增加,滞回环面积,水平承载力均有所提高。钢管混凝土中加入钢纤维在有效提高水平承载力的同时,改善混凝土强度越高脆性越大的问题。

4.2 骨架曲线

骨架曲线为每次循环加载达到水平力最大峰

值的轨迹,是确定恢复力模型中特征点的重要依据。图9为各试件骨架曲线模拟结果与试验数据的对比,曲线吻合较好并表现出相似的特点:试件屈服前的弹性阶段,正向和反向的加卸载都表现为线性变化,试件刚度无明显变化;随着侧移率的增加,试件进入弹塑性阶段,试件刚度下降,水平承载力增速放缓;在到达极限承载力后进入塑性阶段,试件刚度持续下降,水平承载力开始下降直至试件破坏,数值模拟和实验数据对比见表4。

表4 特征点荷载及位移对比数据

Table 4 Characteristic point load and displacement comparison data

试件编号	X_1 (拉)/ mm	Y_1 (拉)/ kN	X_2 (拉)/ mm	Y_2 (拉)/ kN	X_3 (推)/ mm	Y_3 (推)/ kN	X_4 (推)/ mm	Y_4 (推)/ kN
S-150-0.24-0.067-2-S	14.23	263.35	31.30	300.37	-14.47	-260.78	-31.30	-301.04
S-150-0.24-0.067-2	27.53	245.45	40.84	276.18	-25.11	-226.32	-31.36	-251.46
S-150-0.24-0.085-2-S	16.18	278.62	21.90	323.66	-14.52	-270.71	-21.90	-325.80
S-150-0.24-0.085-2	27.60	298.59	40.73	329.44	-25.35	-235.70	-31.37	-262.26
S-150-0.36-0.085-2-S	13.68	310.87	21.89	374.37	-13.78	-308.97	-21.89	-373.18
S-150-0.36-0.085-2	22.42	318.02	29.81	356.32	-25.91	-279.36	-43.95	-315.77
S-150-0.24-0.067-1-S	13.54	258.98	21.90	287.99	-13.73	-256.06	-21.90	-287.83
S-150-0.24-0.067-1	19.05	247.47	31.22	287.93	-24.18	-235.66	-31.34	-267.78
S-80-0.24-0.067-0-S	14.07	213.49	21.89	237.12	-14.26	-210.56	-21.89	-237.46
S-80-0.24-0.067-0	25.01	235.80	31.38	256.02	-23.73	-251.59	-31.40	-271.86
S-30-0.24-0.085-0-S	13.67	190.25	30.50	215.91	-13.53	-191.03	-30.50	-223.00
S-30-0.24-0.085-0	23.43	221.38	40.70	246.90	-23.53	-214.35	-31.47	-222.43

注: X_1, Y_1, X_3, Y_3 为屈服位移及荷载, X_2, Y_2, X_4, Y_4 为极限位移及荷载

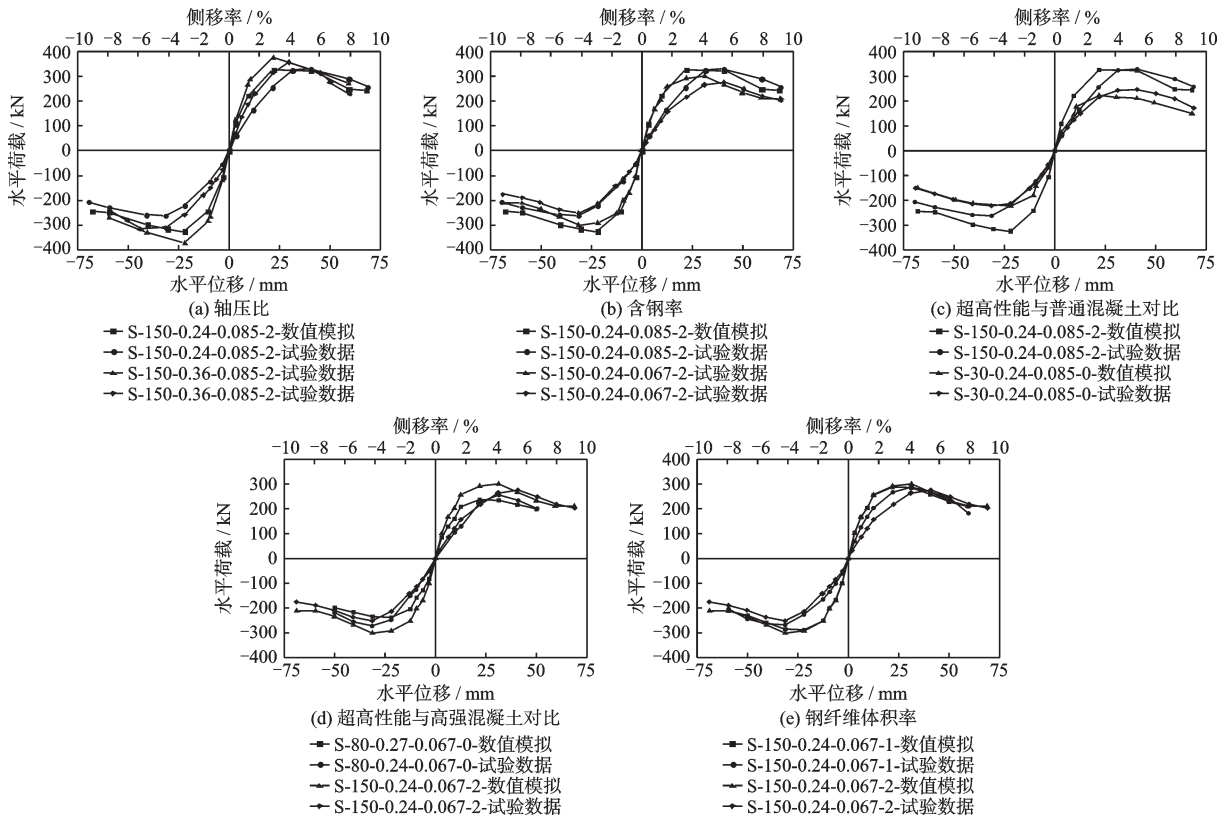


图9 骨架曲线

Fig.9 Skeleton curves

当试件处于较高轴压比时,试件截面受拉区面积较小,核心混凝土开裂少具有更高的完整性,延缓了试件破坏速度,从而水平承载力显著提高。但轴压比越大,试件延性越差。其原因为受压侧应变不断增大导致截面塑性转动能力降低;另一方面,水平荷载作用下,轴向力引起的附加弯矩会加速构件塑性阶段水平承载力的下降,如图9(a)所示。在实际工程中应设置合理轴压比,在提高承载力的同时延性不会明显降低。增大含钢率,有助于钢管对于核心混凝土约束能力的加强,水平承载能力及整体延性提高如图9(b)所示。通过图9(c)和(d)所示,随着核心混凝土强度的增大,试件承载力和刚度提高。此外,超高强混凝土因其掺加钢纤维,在进入塑性阶段后曲线下降平缓,且试件延性随钢纤维体积率增大而提高,如图9(e)所示。

4.3 延性与耗能能力

延性系数与耗能能力是方钢管混凝土柱抗震性能研究的重要指标及参数。试件的延性及耗能能力越好,则表现为在发生地震时吸收的能量多,

抵御强震能力强。本文延性系数的确定方法采用破坏点变形与屈服点变形比值进行计算。根据JGJ101-1996,如式(1)^[19]所示,其中 μ 为延性系数, Δ_y 为屈服位移, Δ_{μ} 为承载力下降至85%的水平位移。屈服点由Park^[20]法确定。

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta_{\mu}^{-}}{\Delta_y^{-}} + \frac{\Delta_{\mu}^{+}}{\Delta_y^{+}} \right) \quad (1)$$

耗能能力为判断结构抗震性能是否优越的重要指标,即 $p-\Delta$ 曲线滞回环所围面积。对于试件耗能能力 E 计算,由式(2)滞回环面积^[21]累计求得。

$$E = \sum_0^x F dx \quad (2)$$

试验(μ_1, E_1)与数值计算(μ_2, E_2)结果的对比见表5。

通过有限元数值模拟LS-DYNA软件,模拟低周往复荷载作用下的结果和试验结果吻合较好。由此证明,本文所建立的纤维单元有限元模型能够有效分析方钢管混凝土柱在低周反复荷载作用下的力学性能。但模拟结果与试验结果存在一定差别,产生的原因是:在试验中柱墩与钢管混凝土柱

表5 试验与数值模拟对比

Table 5 Comparison of test results and numerical simulation

试件编号	μ_1	μ_2	E_1/kJ	E_2/kJ
S-150-0.24-0.067-2	2.12	3.11	174.06	239.46
S-150-0.24-0.085-2	2.61	3.65	226.06	286.52
S-150-0.36-0.085-2	2.18	3.22	226.66	226.97
S-150-0.24-0.067-1	2.09	3.06	123.33	164.69
S-80-0.24-0.067-0	1.90	2.99	74.38	98.09
S-30-0.24-0.085-0	2.41	3.48	233.11	264.84

之间存在滑移,使得柱墩边界未处于完全固接状态,而有限元模型底部边界为完全固接;试件本身存在的诸如试件钢管焊缝质量、核心混凝土非完全均质等问题。

5 参数分析

在验证有限元模型的准确性后,以S-150-0.24-0.085-2作为标准试件,以轴压比、含钢率及混凝土类型对方钢管超高性能混凝土柱进行参数扩展分析。

5.1 轴压比

对轴压比0.10、0.24、0.36、0.4分别进行低周往复荷载试验数值模拟。由图10可得,轴压比的增大使耗能能力下降。如图11所示,轴压比对应峰值水平承载力分别为257.43、326.42、374.37、367.36 kN。在轴压比0.10~0.36时,轴压比越大,试件水平承载力和刚度都显著增大,但试件延性逐渐减小。当 $n=0.4$ 时,水平承载力比 $n=0.36$ 下降1.9%,下降段下降速率明显加快且呈现脆性破坏特点。其原因为当轴压比过大时,核心混凝土在加载过程中会出现局部受压破坏失去承载力。

5.2 含钢率

在试验基础上改变含钢率对其滞回性能进行分析,含钢率分别为0.085、0.122和0.161。如图12、图13各试件峰值水平承载力分别为326.42、392.80、441.77 kN。在其他参数不变的情况下,含钢率的增加使试件滞回曲线愈发饱满,可得其耗能能力增大如图12所示。从骨架曲线(图13)可明显看出:增加钢管壁厚可有效增大钢管混凝土柱水平承载力、刚

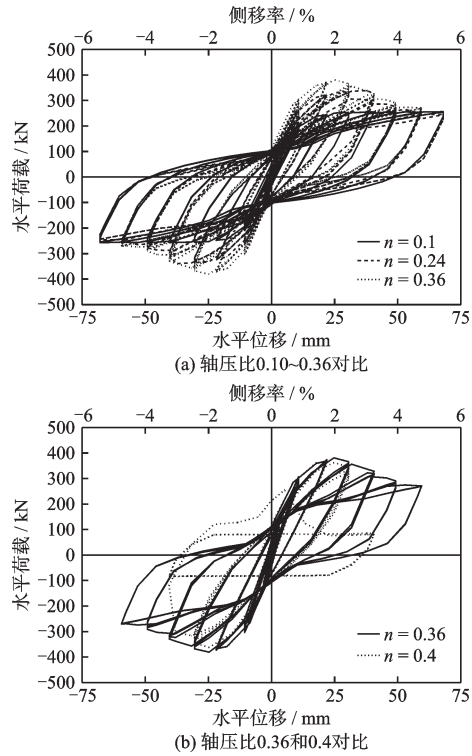


图10 轴压比对滞回曲线的影响
Fig.10 Influence of axial pressure ratio on hysteresis loops

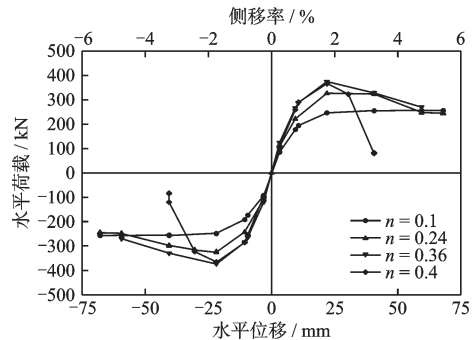


图11 轴压比对骨架曲线的影响
Fig.11 Influence of axial pressure ratio on skeleton curves

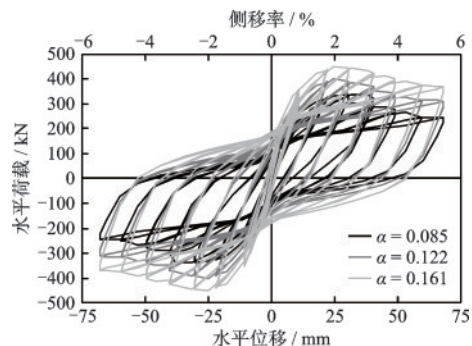


图12 含钢率对滞回曲线的影响
Fig.12 Influence of steel content on hysteresis loops

度及延性。其原因为:含钢率增大使整个试件的抗弯、抗压、抗拉性能提高,从而使抗震性能提高。

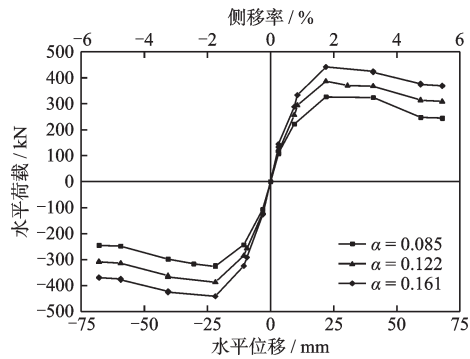


图 13 含钢率对骨架曲线的影响

Fig.13 Influence of steel content on skeleton curves

5.3 混凝土种类

为比较不同混凝土种类对于钢管混凝土柱滞回性能的影响,设置 C30、C80 和 C150 三种混凝土参数,其峰值水平承载力分别为 223.13、276.20、326.42 kN。图 14 为三种混凝土试件的滞回曲线,可知 UHPC 试件耗能能力最好。由图 15 中骨架曲线可以明显看出:混凝土强度的增加,使试件水平承载能力和刚度提高。超高性能混凝土因加入钢纤维,提高了试件水平承载能力和延性。其原因为:钢纤维对于基体开裂的拉结作用在提高核心混

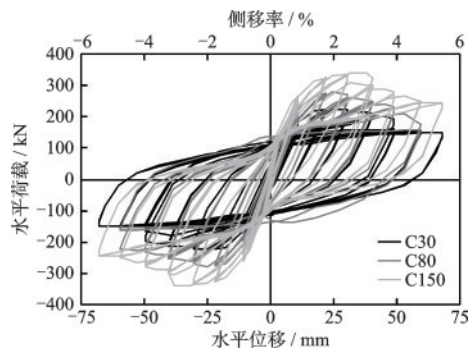


图 14 混凝土种类对滞回曲线的影响

Fig.14 Influence of concrete type on hysteresis loop

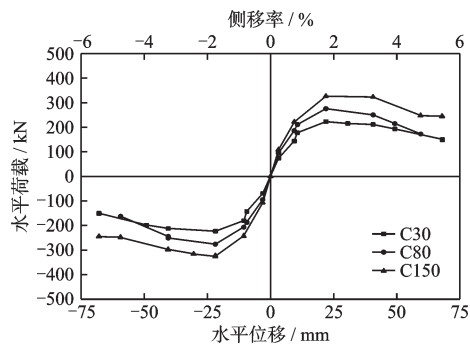


图 15 混凝土种类对骨架曲线的影响

Fig.15 Influence of steel type on skeleton curves

凝土强度的同时也增强了其抗弯、抗拉性能,使试件在低周往复荷载作用下核心混凝土相对于无纤维混凝土失效面积减小,从而整体承载力、刚度、耗能及延性均有不同幅度提高。

6 结论

根据方钢管混凝土柱在低周往复荷载作用下试验研究及数值模拟,可得知纤维有限元模型能够有效分析方钢管超高性能混凝土柱滞回特性;与方钢管普通混凝土柱和高强混凝土柱相比,方钢管超高性能混凝土柱抗震性能更为优异;方钢管超高性能混凝土柱随着轴压比的提高,试件水平承载力及刚度增大,但延性降低;随着含钢率的增加,试件水平承载力、刚度、延性及耗能能力均提高;随着钢纤维体积率的增加,试件延性、耗能能力提高。具体表现为如下几点:

(1)当核心混凝土为普通及高强混凝土时,混凝土大面积剥落;超高性能混凝土仅在屈曲段形成多条压弯裂缝,表现出较好的完整性。

(2)方钢管超高性能混凝土柱滞回曲线均饱满成纺锤形,无明显捏缩现象;在骨架曲线到达峰值承载力后,试件水平承载力缓慢下降,表现出良好的延性。

(3)核心混凝土为超高性能混凝土时,与普通和高强混凝土相比,水平承载力分别提高 46.3%、18%,同时试件刚度及延性提高。

(4)当轴压比为 0.10~0.36 时,随轴压比增大,超高性能混凝土柱水平承载力和刚度都显著提高,但试件延性逐渐减小。当 $n=0.4$ 时,水平承载力比 $n=0.36$ 下降 1.9%,且呈现明显脆性破坏特点。

(5)试件含钢率增大 43.5%、89.4% 时,其水平承载能力分别提高 20.3%、35.3%,滞回曲线愈饱满且塑性阶段下降更加平缓。

参考文献:

[1] 聂瑞峰,徐培葵,阎宇.方钢管混凝土柱抗震性能试验研究和仿真分析[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(11):1596-1602.
Nie R F, Xu P Z, Yan Y. Experimental research and finite element analysis on seismic behavior of concrete filled square steel tubular columns[J]. Journal of Tongji

- University (Natural Science), 2012, 40 (11): 1596-1602. (in Chinese)
- [2] 吕西林, 陆伟东. 反复荷载作用下方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(2): 2-11, 27.
Lyu X L, Lu W D. Seismic behavior of concrete-filled rectangular steel tubular columns under cyclic loading [J]. Journal of building structures, 2000, 21(2): 2-11, 27. (in Chinese)
- [3] 王铁成, 张磊, 赵海龙, 等. 钢管混凝土柱抗震性能参数影响分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增1): 339-344.
Wang T C, Zhang L, Zhao H L, et al. Analysis of parameter influence on seismic behavior of concrete filled square steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Sup1): 339-344. (in Chinese)
- [4] 王景玄, 王文达, 魏国强. 基于OpenSees平台的钢管混凝土结构力学性能数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 613-618, 631.
Wang J X, Wang W D, Wei G Q. Numerical simulation on mechanical performance of concrete filled steel tubular structures based on OpenSees platform [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(5): 613-618, 631. (in Chinese)
- [5] 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 Q W, Wang Y, Zhang C Y, 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. (in Chinese)
- [6] 闻洋, 陈伟, 杨铮, 等. 圆钢管再生混合混凝土框架性能的控制分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 309-315.
Wen Y, Chen W, Yang Z, et al. Analysis on controlling of the performance of circular steel tubular recycled mixed concrete frame [J]. 2019, 39 (2) : 309-315. (in Chinese)
- [7] 曾繁良, 黄炎生, 周靖. 钢管混凝土柱排架-核心筒结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(12): 190-197.
Zeng F L, Huang Y S, Zhou J. A study on the seismic performance of concrete-filled steel tube column-steel shelf-concrete core tube structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(12): 190-197. (in Chinese)
- [8] 刁延松, 郭荡, 屠康, 等. 新型异形钢管混凝土柱-钢梁节点抗震性能试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(5): 1724-1733.
Diao Y S, Guo d, Tu K, et al. Experiment of seismic behavior of new joints between concrete filled special-shaped steel tube column and steel beams [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(5): 1724-1733. (in Chinese)
- [9] 张艺欣, 刘阳, 阮杰, 等. 装配式核心钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(12): 135-144.
Zhang Y X, Liu Y, Ruan J, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated core steel tube reinforced concrete columns [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(12): 135-144. (in Chinese)
- [10] 何子奇, 胡盛文, 李彬洋, 等. 十字形钢管混凝土柱-H形钢梁框架节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(11): 95-106.
He Z Q, Hu S W, Li B Y, et al. Research on seismic behavior of cruciform special-shaped CFST column to H-section steel beam joint [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(11): 95-106. (in Chinese)
- [11] 程睿, 张继东, 胥兴, 等. 方钢管混凝土柱与U形钢组合梁分离式内隔板节点抗震性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 47-58.
Cheng R, Zhang J D, Xu X, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular column to U-shaped steel-concrete composite beam joints with separated internal diaphragm [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 47-58. (in Chinese)
- [12] 武海鹏, 崔舒蓉, 钟志伟, 等. 异形多腔钢管混凝土分叉短柱抗震性能试验及数值计算[J]. 振动与冲击, 2024, 43(4): 115-124.
Wu H P, Cui S R, Zhong Z W, et al. Seismic behaviour test and numerical calculation on special-shaped bifurcated CFT short column with multiple cavities [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(4): 115-124. (in Chinese)
- [13] 韩林海. 钢管高强混凝土压弯构件力学性能研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(5): 24-30.
Han L H. Researches for the behavior of high strength concrete filled steel tubular compression-bending members [J]. Journal of Harbin University of C.E. & Architecture, 1997, 30(5): 24-30. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)

(下转第 1105 页)