

高强方钢管超高性能混凝土柱抗震性能研究

秦靖凯, 何学杰, 张娟, 骆志, 于子程, 杜国锋

(长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023)

摘要: 为研究高强方钢管超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete filled high-strength square steel tube, UHPCFHST) 柱的抗震性能, 以套箍系数、长细比和轴压比为研究参数, 对 UHPCFHST 柱进行低周往复荷载试验。观察试件的破坏形态, 分析各参数对试件滞回性能、刚度、延性和耗能能力的影响规律。研究表明: 所有试件破坏特征均相似, 柱底出现钢管鼓曲和混凝土压碎现象。随着套箍系数的增大 (套箍系数由 0.55~0.98), 试件的延性分别提升了 8.91% 和 21.52%。随着长细比的增加, 试件的初始刚度、水平承载力和延性下降, 长细比越大试件的延性减弱越显著。轴压比由 0.1 增大到 0.2 时, 试件的初始刚度和水平承载能力提高, 而延性下降。同时, 将文中承载力试验结果与各规范计算值进行对比分析, 美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构建筑规范》的计算结果较实测低 48%, 偏于保守, 而 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》的计算结果较实测高 17%, 经分析福建省地方标准 DBJ/T13—51—2010 最为计算与实测最为贴合, 为高强方钢管超高性能混凝土柱在低周往复荷载作用下的设计提供参照依据。

关键词: 高强方钢管; 超高性能混凝土; 拟静力试验; 抗震性能; 承载力

中图分类号: TU352.11; TU398.9

文献标识码: A

Research on the seismic performance of high-strength square steel tube ultra-high performance concrete columns

QIN Jingkai, HE Xuejie, ZHANG Juan, LUO Zhi, YU Zicheng, DU Guofeng

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of ultra-high performance concrete filled high-strength square steel tube (UHPCFHST) columns, this paper uses the hoop factor, length-to-slender ratio, and axial compression ratio as the parameters of study to conduct the low cyclic reversed loading test. The damage patterns of the specimens were observed, and the influence of each parameter on the hysteretic properties, stiffness, ductility and energy dissipation capacity of the specimens was analyzed. The test results show that the damage characteristics of all specimens are similar, and the phenomena of steel pipe buckling and concrete crushing appear at the bottom of the column. With the increase of the hoop coefficient (from 0.55 to 0.98), the ductility of the specimens increased by 8.91% and 21.52%, respectively. The initial stiffness, horizontal bearing capacity and ductility of the specimens decrease with the increase of the length-to-slender ratio, and the greater the length-to-slender ratio, the more significant the weakening of the ductility of the specimens. When the axial compression ratio increases from 0.1 to 0.2, the initial stiffness and horizontal bearing capacity of the specimen increase, while the ductility decreases. At the same time, the load-bearing capacity test results in this paper and the calculated values of each specification are compared and analyzed. The calculation results of the United States ANSI/AISC 360—16 AISC specification for structural steel buildings are lower than the measured values by 48%, which is relatively conservative. The

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2023-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078052)

作者简介: 秦靖凯 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢管混凝土结构力学性能研究。E-mail: 1425491692@qq.com

通讯作者: 杜国锋 (1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事钢管混凝土结构、长输管道结构抗震及健康监测研究。E-mail: gfd@yangtzeu.edu.cn

calculation results of the GB 50936—2014 technical code for concrete filled steel tubular structures are higher than the measured values by 17%, After analyzing the Fujian provincial local standard DBT/T13-51—2010 technical specification for concrete-filled steel tube structures, the calculation is the most consistent with the actual measurement, which provides a reference basis for the design of high-strength square steel pipe ultra-high-performance concrete columns under low cyclic reversed loading.

Key words: high strength square steel tube; ultra-high performance concrete; pseudo-static test; seismic performance; bearing capacity

0 引言

普通钢管混凝土结构充分发挥钢管与混凝土的优势,具有承载力高、延性好和抗震性能好等优良特性^[1]。但随着超高层建筑的发展,构件尺寸不断增大,出现自重大、占空间、成本高和运输难等问题,普通钢管混凝土构件已经无法很好地解决上述问题。高强钢管超高性能混凝土柱集高强钢管和超高性能混凝土的双重优点,具有更高的承载力、更小的截面尺寸与更好的经济效益^[2-4],在未来的工程建设中越来越重要。

目前,国内外学者针对普通钢管混凝土结构的抗震性能研究已取得一定成果。邹昀等^[5]以轴压比为参数探究钢管混凝土柱的抗震性能,结果显示较高轴压比下,试件的水平承载力及刚度越大,但其退化加快,延性变差。徐培蓁等^[6]通过试验,研究了不同参数对强度 Q235 方钢管与 C35 混凝土组合柱抗震性能的影响,得出方钢管混凝土柱具有良好的耗能能力。王铁成等^[7]以长细比、含钢率等为参数,设计 3 根方钢管混凝土柱进行抗震性能研究,得出长细比对钢管混凝土柱的刚度退化影响最为显著。然而,在低周往复荷载作用下,普通钢管混凝土柱极易发生局部鼓曲,影响外包钢管对核心混凝土的约束能力,降低了构件承载能力。因此,提高外包钢管强度和核心混凝土的力学性能成为必然。罗云标等^[8]结合试验和有限元对圆钢管超高性能混凝土柱进行抗震性能研究,得到圆钢管超高性能混凝土柱有着更优良的抗震性能。ZHANG 等^[9]对超高强钢管混凝土柱进行拟静力试验,结果表明钢管强度的增大显著提升了试件的抗震性能。TIAN 等^[10]通过拟静力试验对超高性能混凝土管柱进行研究,结果表明超高性能混凝土管柱相比钢筋混凝土柱的抗震性能更优良。韦建刚等^[11]以含钢率、轴压比和钢材强度为参数,对 Q900 高强钢管和 C150 超高强混凝土柱进行抗震试验研究,得到钢材强度的改变对试件延性影响较大。邱增美等^[12]以长细比为基本参数,对高强方钢管高强混凝土柱压弯构件进行低周往复加载试验,结果表明随着长细比增加,试件的弹性刚度明显较小。基于已有研究成果表明^[13-16],钢管超高性能混凝土柱的轴压力学性能较好,但随着核心混凝土强度增加,构件延性变差,因此增加内置钢骨可以明显改善构件的延性。

综上所述,学者们针对普通钢管混凝土柱的抗震性能研究较多,但对同时采用高强钢管与超高性能混凝土组合柱的研究却鲜有报道。为此,本文以钢管强度、长细比和轴压比为试验参数,对高强方钢管超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete filled high-strength square steel tube, UHPCFHST) 柱的抗震性能进行拟静力试验研究,分析试件延性性能、刚度退化及耗能能力等抗震指标。此外,将本文试验所得承载力结果与根据美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构建筑规范》^[17]、我国 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》^[18]和 DBJ/T13-51—2010《钢管混凝土结构技术规程》^[19]计算所得承载力结果进行对比分析,为低周往复荷载作用下高强方钢管超高性能混凝土构件的设计提供建议,为 UHPCFHST 柱在实际工程中的应用提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计 9 根 UHPCFHST 柱,其中,所采用的钢管厚度 t 为 6、8、10 mm,所选方钢管截面尺寸为 180 mm×180 mm;试件高度分别为 1500、1700、2000 mm;轴压比 n 取 0.10、0.15、0.20;长细比 λ 为 18.57、22.42、28.19;试件具体设计参数见表 1。其中,试件套箍系数 $\xi = \alpha_{sc} f / f_c$, ($\alpha_{sc} = A_s / A_c$ 为试件含钢率, A_c 、 A_s 分别为核心混凝土截面面积和试件钢管截面面积),试件轴压比 $n = N / N_0$, $N_0 = A_c f_c + A_s f_y$ (N 为试件轴压力, f_c 、 f_y 分别为混凝土抗压强度和钢材抗拉强度)。试件长细比根据 $\lambda = 2\sqrt{3}L/B$ 计算 (L 为试件计算长度, B 为试件边长)。

表 1 试件设计参数

Table 1 Specimen design parameters

试件编号	壁厚 t /mm	轴压比 n	长细比 λ	套箍系数 θ	高度 H /mm	计算长度 L /mm	钢材强度/MPa
HU-T6-N10-L3	6	0.10	28.19	0.55	2000	1465	Q460
HU-T8-N10-L3	8	0.10	28.19	0.90	2000	1465	Q460
HU-T10-N10-L3	10	0.10	28.19	0.98	2000	1465	Q460
HU-T6-N20-L1	6	0.20	18.57	0.55	1500	965	Q460
HU-T6-N20-L2	6	0.20	22.42	0.55	1700	1165	Q460
HU-T6-N20-L3	6	0.20	28.19	0.55	2000	1465	Q460
HU-T8-N10-L2	8	0.10	22.42	0.90	1700	1165	Q460
HU-T8-N15-L2	8	0.15	22.42	0.90	1700	1165	Q460
HU-T8-N20-L2	8	0.20	22.42	0.90	1700	1165	Q460

注:试件编号由四部分组成: H 为 Q460 钢材; U 为 UHPC; T 为钢管厚度; N 为试件轴压比 n 小数点后数值; 柱长 L : 1~1500 mm, 2~1700 mm, 3~2000 mm。

1.2 试件材料性能

超高性能混凝土配合比如表 2 所示,采用 P.O.52.5 级普通硅酸盐水泥、细骨料为 40~70 目和 70~140 目的石英砂,掺和料包括优质微硅粉和 S95 级矿粉,外加剂采用聚羧酸高性能减水剂,钢纤维采用镀铜钢纤维,参数如表 3 所示。

根据 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》^[20] 相关规定,在浇筑管内的超高性能混凝土时,每批次分别制作 3 个 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块与 3 个 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体试块,试块和 UHPCFHST 柱在同等条件下养护 28 d,参照 T/CECS 10107—2020《超高性能混凝土(UHPC)技术要求》^[21],实测超高性能混凝土立方体试块抗压

强度的平均值为 129.4 MPa,棱柱体抗压强度为 124.6 MPa。同时,按照国家标准 GB/T 228.1—2020《金属材料 拉伸试验 第一部分:室温试验方法》^[22] 进行拉伸试验,钢材试样的物理力学性能指标如表 4 所示。

表 4 钢材试样材性表

Table 4 Material property of steel specimens

试样材料	试样厚度 t /mm	弹性模量 $E_s/(\times 10^5 \text{ N/mm}^2)$	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa
Q460	6	2.06	480.2	609.4
	8	2.08	567.2	664.3
	10	2.09	442.4	578.7

1.3 加载装置

水平加载装置是固定在反力墙上的行程为 300 mm 的液压作动器,竖向加载装置是量程为 2000 kN 的液压千斤顶,具体的试验加载装置示意图和试件如图 1 所示。

按照 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》^[23] 规范,试验采用如图 2 所示的加载制度。开始前,先通过千斤顶施加竖向轴力,取设计轴力的 40%~50% 重复 1~2 次对试件进行预加载,以消除钢管内部 UHPC 的不均匀性^[24];试验加载制度采用位移控制,在试件未屈服之前,每级循环加载 1 次,在试件屈服之后,每级循环加载 3 次,直至试件水平承载力下降至峰值承载力的 85% 左右时,即认为试件失效^[22],停止加载。

表 2 超高性能混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of ultra high performance concrete

水泥	硅灰	矿渣粉	石英砂/目		减水剂	水	钢纤维
			40~70	70~140			
700	210	105	420	420	35.525	203	235.5

表 3 钢纤维物理参数

Table 3 Physical parameters of steel fibers

名称	直径/mm	长度/mm	长径比	抗拉强度/MPa
钢纤维	0.18~0.22	12~14	67.7	≥2850

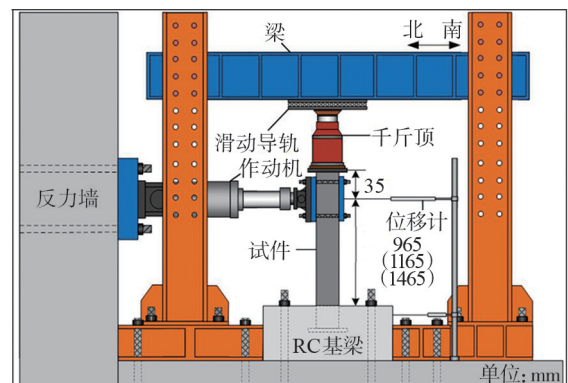


图 1 加载装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of loading device

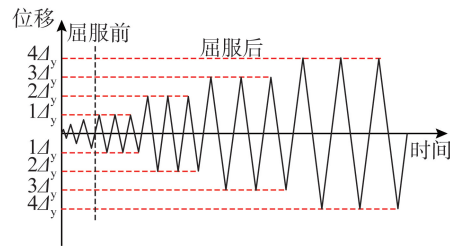


图2 试验加载制度

Fig. 2 Test loading system

2 试验结果及其分析

2.1 破坏特征

本试验的位移加载方向为南北方向,以北侧拉力为正。各试件最终的破坏形态和破坏模式基本一致,试件的加载破坏过程分为弹性阶段-弹塑性阶段-破坏阶段,本文以试件 HU-T6-N20-L1 和 HU-T8-N20-L2 为例,对其破坏形态进行分析。

1) 试件 HU-T6-N20-L1

如图3所示,在试验加载初期,试件处于弹性阶段,残余变形较小,钢管无屈曲变形,整体无明显破坏现象。随着加载位移不断增大,试件进入弹塑性阶段,当位移加载到 $2\Delta_y$ 时,钢管下柱端开始出现局部屈曲现象;当位移加载到 $3\Delta_y \sim 4\Delta_y$ 时,试件出现断断续续的响声,钢管局部屈曲加剧,水平荷载达到峰值;当位移加载到 $5\Delta_y$ 时,水平荷载下降到峰值荷载的85%以下,试件逐渐丧失轴压承载能力,钢管的局部屈曲现象加重甚至出现开裂,同时柱底混凝土被压碎。

2) 试件 HU-T8-N15-L2

如图4所示,试验在 $1\Delta_y$ 开始加载时,出现混凝土压碎声,继续加载至 $1\Delta_y$ 结束,观察钢筋混凝土基梁连接处有裂缝产生,但试件下柱端无明显鼓曲现象;当位移加载到 $2\Delta_y$ 时,钢管下柱端开始出现局部屈曲现象;当位移加载到 $3\Delta_y \sim 4\Delta_y$ 时,试件与基础梁连接区混凝土剥离,基础梁上的裂缝扩展,试件达到水平峰值承载力;当位移加载到 $5\Delta_y \sim 6\Delta_y$ 时,鼓曲较之前无明显变化,裂纹数量在明显增加;当位移加载到 $7\Delta_y$ 时,荷载均下降至峰值的85%左右,试验停止加载。



图3 试件 HU-T6-N20-L1 破坏形态

Fig. 3 Specimen HU-T6-N20-L1 failure pattern



图4 试件 HU-T8-N15-L2 破坏形态

Fig. 4 Specimen HU-T8-N15-L2 failure pattern

2.2 滞回曲线

本次试验滞回曲线如图5所示,整个加载过程中,试件柱共经历了3个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。在试件加载初期,曲线呈线性增加,滞回环面积较小,试件基本无刚度退化和能量耗散。随着水平位移的增加,滞回曲线的斜率减小,滞回环愈加饱满,同时能量耗散增加,刚度退化较为明显。当试件进入破坏阶段时,能量耗散进一步增加,试件也表现出明显承载力退化和强度退化。加载结束后,试件的滞回曲线整体较为饱满,无明显捏缩现象,表明UHPCFHST柱具有良好的耗能能力。此外,由于核心混凝土的累计损伤和钢管局部屈曲,在同级水平位移加载下,第2循环和第3循环的水平荷载均低于第1循环的水平荷载^[21]。

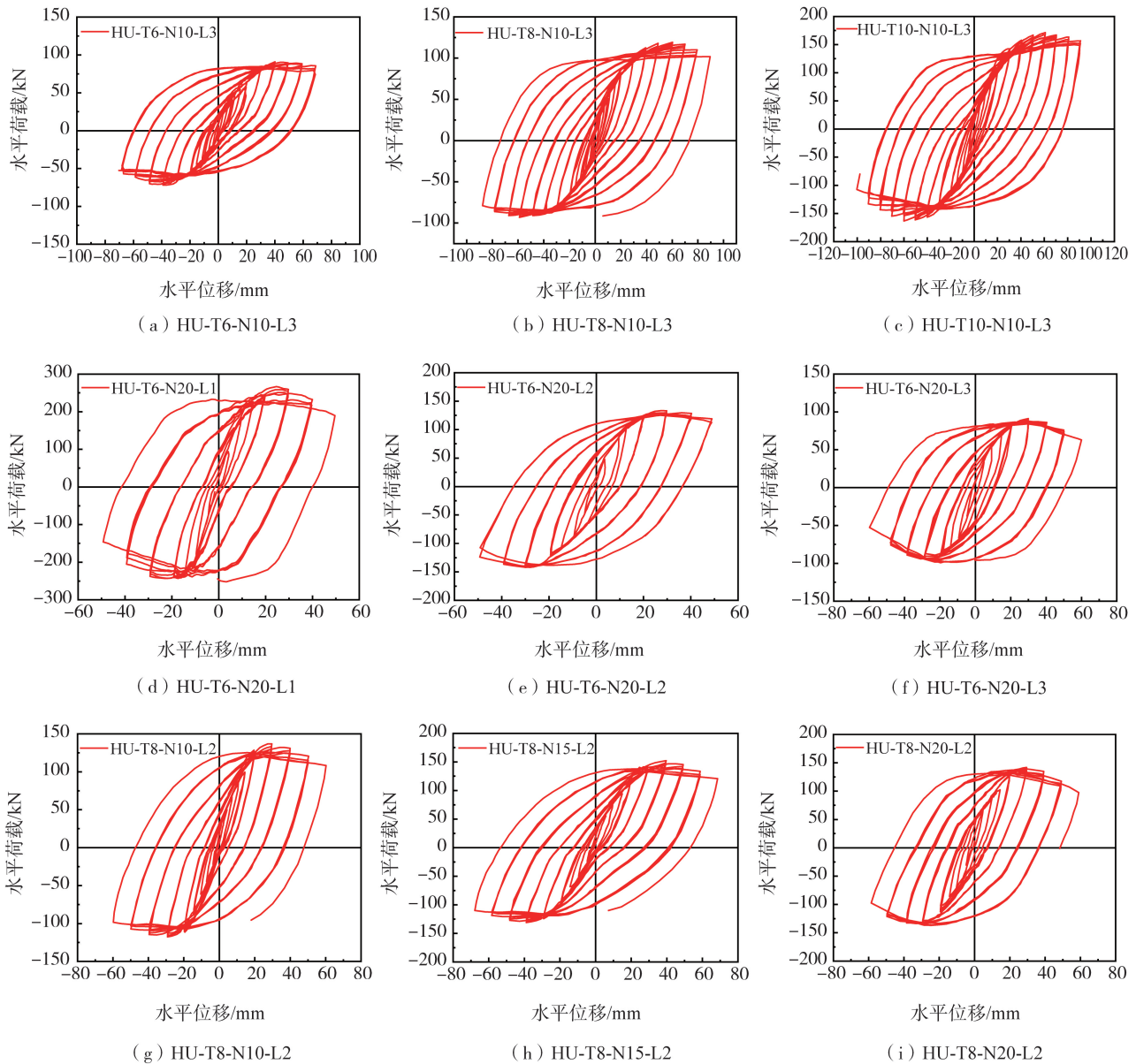


图 5 滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curve

2.3 骨架曲线

根据试验滞回曲线结果,绘制骨架曲线如图 6 所示,骨架曲线反映了试件的受力与变形的关系。表 5 中给出了各个试件的特征点荷载和位移,其中, P_y 为屈服荷载,由等效能量法确定; P_{max} 为峰值荷载(kN); P_u 为极限荷载(kN),为荷载下降到峰值荷载的 85% 时所对应的荷载; Δ_y 、 Δ_{max} 、 Δ_u 分别为屈服荷载、峰值荷载和极限荷载。通过表 5 和图 6 分析各参数对骨架曲线的影响。

1) 套箍系数:对比分析试件 HU-T10-N10-L3 ($\theta=0.98$),试件 HU-T8-N10-L3 ($\theta=0.90$) 和 HU-T6-N10-L3 ($\theta=0.55$),如图 6(a) 所示。当试件的套箍系数降低,对应试件的峰值承载力分别降低 15.71% 和 51.35%,且初始刚度也有下降。该结果表明随着套箍系数的减小,试件峰值承载力和初始刚度明显降低。

2) 长细比:对比分析试件 HU-T6-N20-L1、试件 HU-T6-N20-L2 和 HU-T6-N20-L3,如图 6(b) 所示。随着长细比的增加,试件在弹性阶段和强化阶段的刚度逐渐降低。同时,由于轴向力在各截面产生弯矩较大,加剧了试件水平极限承载力的下降趋势。

3) 轴压比:对比分析试件 HU-T8-N10-L2、试件 HU-T8-N15-L2 和 HU-T8-N20-L2,如图 6(c) 所示。随着轴压比的增加,骨架曲线下降段斜率增大,极限位移减小,这表明轴压比越大,试件脆性越强。此外,峰值荷载随轴压比增大呈先增大后减小的趋势^[26-27],这表明钢管的最大约束应力与轴压比存在一个阈值。

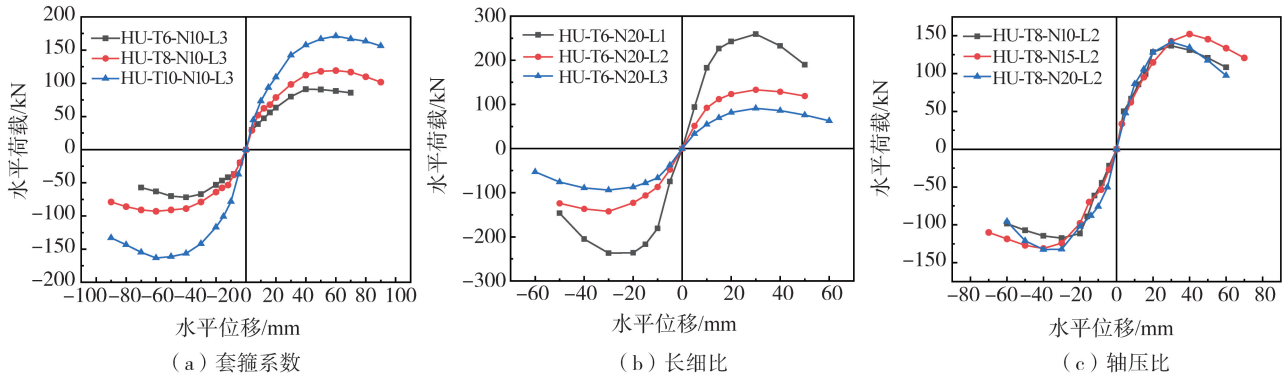


图6 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curve

2.4 延性

延性是衡量试件在低周反复荷载作用下的变形能力,可作为判断试件抗震性能优劣的标准之一。本文采用位移延性系数 μ 作为衡量试件延性的标准^[20],其表达式为

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{1}$$

式中: Δ_u 为试件极限位移,取试件加载至峰值荷载下降至 85%时所对应的水平位移值; Δ_y 为试件屈服位移 (mm),采用如图 7 所示的等效能量法来确定,使用式(1)计算出的延性系数,如表 5 所示。

试件延性系数见表 5。根据表 5,进一步分析不同参数对试件延性影响如下:

1) 套箍系数:对比分析试件 HU-T6-N10-L3 ($\theta = 0.55$),试件 HU-T8-N10-L3 ($\theta = 0.90$) 和 HU-T10-N10-L3 ($\theta = 0.98$),随着套箍系数的增大,试件的延性系数分别提升 8.91% 和 21.52%,试件延性性能的提升显著。随着试件壁厚的增加,钢管对核心混凝土的约束能力提升,试件表现出良好的延性性能。

2) 长细比:对比分析试件 HU-T6-N20-L1 ($\lambda = 18.57$),试件 HU-T6-N20-L2 ($\lambda = 22.42$) 和试件 HU-T6-N20-L3 ($\lambda = 28.19$),长细比增大,试件的延性系数分别下降 1.99% 和 7.45%。结果表明试件长细比越大,试件的延性减弱越显著。此外,试件的长细比过大,试件将从压弯破坏转向失稳破坏,会影响其抗震性能。

3) 轴压比:试件轴压比从 0.10 增大到 0.15,试件 HU-T8-N15-L2 ($n = 0.15$) 的延性系数降低 9.58%,同时轴压比从 0.15 增大到 0.20,试件 HU-T8-N10-L2 ($n = 0.20$) 的延性系数降低 4.69%。结果表明随着轴压比的增加,试件延性逐渐减弱。同时,由于轴压比越大所产生的荷载-位移效应越大,试件的水平承载力呈现先增加后下降的趋势。试件在达到峰值荷载后的变形难以稳定,会较早达到破坏位移,导致试件延性性能减弱。

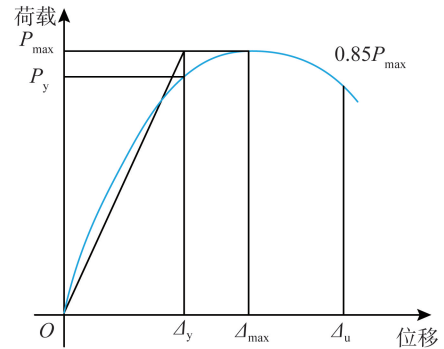


图7 等效能量法

Fig. 7 Equivalent energy method

表5 试件各特征点荷载-位移值

Table 5 Load-displacement values of each characteristic point of the specimen

试件编号	加载方向	屈服点		峰值点		破坏点		μ
		Δ_y /mm	P_y /kN	Δ_{max} /mm	P_{max} /kN	Δ_u /mm	P_u /kN	
HU-T6-N10-L3	正向	27.61	75.67	40.00	90.98	70.00	85.66	2.85
	负向	24.57	-60.83	40.00	-71.93	70.00	-57.06	2.54
HU-T8-N10-L3	正向	31.29	103.9	60.00	119.26	90.00	101.75	2.99
	负向	30.08	-78.9	60.00	-93.02	90.00	-78.86	2.88
HU-T10-N10-L3	正向	29.40	125.98	60.00	171.27	90.00	132.41	3.15
	负向	28.57	-117.76	60.00	-163.37	90.00	-112.78	3.40
HU-T6-N20-L1	正向	16.56	218.68	30.00	259.16	40.00	189.64	2.65
	负向	15.11	-230.31	30.00	-237.00	50.00	-146.30	3.02
HU-T6-N20-L2	正向	16.88	112.28	30.00	132.97	50.00	118.88	2.49
	负向	16.77	-115.56	30.00	-142.15	50.00	-124.00	2.96

续表

试件编号	加载方向	屈服点		峰值点		破坏点		μ
		Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_{\max}/mm	P_{\max}/kN	Δ_u/mm	P_u/kN	
HU-T6-N20-L3	正向	19.13	81.15	30.00	91.08	50.00	75.99	2.98
	负向	14.26	-77.16	30.00	-94.22	50.00	-75.86	2.61
HU-T8-N10-L2	正向	19.20	127.42	30.00	136.77	60.00	108.25	2.73
	负向	22.00	-111.37	30.00	-117.54	60.00	-98.35	3.13
HU-T8-N15-L2	正向	22.43	130.83	40.00	152.32	70.00	120.83	2.83
	负向	21.68	-103.19	40.00	-131.03	70.00	-110.01	2.71
HU-T8-N20-L2	正向	19.57	128.24	30.00	141.82	60.00	117.36	2.72
	负向	22.04	-123.89	30.00	-132.66	50.00	-95.47	2.55

2.5 刚度退化

本文采用割线刚度 K_i 来反映试件在低周反复荷载加载过程中的刚度退化情况,即第 i 级滞回环的正向和负向峰值荷载的绝对值之和与水平位移的绝对值之和的比值为

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中: K_i 为试件在第 i 级加载时的刚度; $\pm F_i$ 为试件在第 i 级加载时的正负峰值荷载; $\pm \Delta_i$ 为试件在第 i 级加载时正负峰值荷载所对应的水平位移。

根据式(2),将各试件刚度退化的计算结果绘制成刚度退化对比曲线,如图 8 所示。进一步分析不同参数对试件刚度退化的影响如下:

1) 套箍系数:如图 8(a) 所示,套箍系数对试件的初始刚度影响较大,且随着套箍系数的增加,试件 HU-T10-N10-L3 ($\theta=0.98$) 在初始刚度退化的速率相较于试件 HU-T10-N10-L3 ($\theta=0.55$) 和试件 HU-T10-N10-L3 ($\theta=0.90$) 有所减缓,但随着位移的不断加载,试件在屈服之后的退化趋势基本保持一致。

2) 长细比:如图 8(b) 所示,长细比的改变对试件整体刚度影响较大,相比试件 HU-T6-N20-L1 ($\lambda = 18.57$),试件 HU-T6-N20-L2 ($\lambda = 22.42$) 和试件 HU-T6-N20-L3 ($\lambda = 28.19$) 在屈服后的刚度退化速率明显放缓。此外,试件 HU-T6-N20-L2 ($\lambda = 18.57$) 初始刚度更大,未屈服之前,刚度退化趋势更缓。

3) 轴压比:如图 8(c) 所示,随着轴压比的增加,试件初始刚度有所上升,在试件未屈服时,刚度退化趋势基本不变。但试件轴压比过大,加剧了钢管屈曲和核心混凝土累计损伤的发展,导致试件屈服后的刚度退化速率更快。

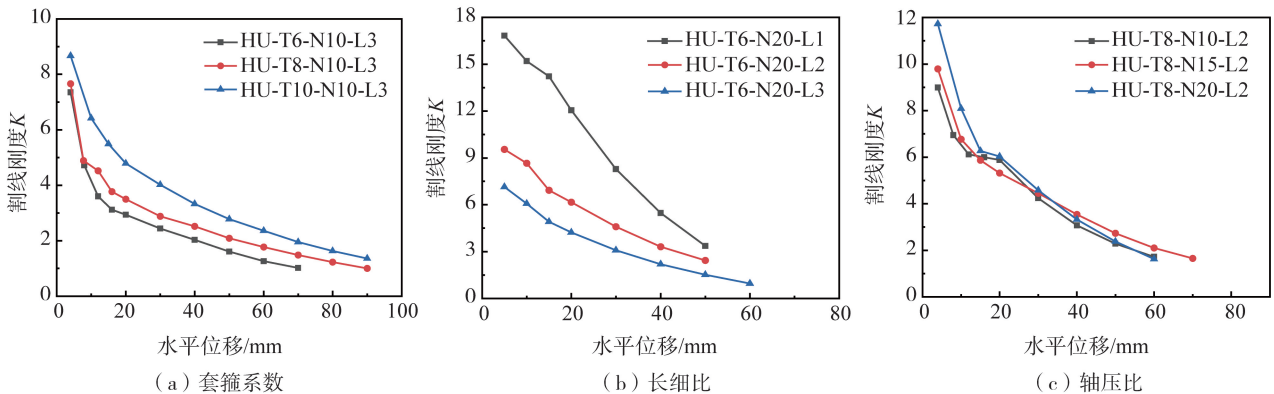


图 8 刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness degradation curve

2.6 耗能能力

本文采用能量耗散系数 E 和等效黏滞阻尼系数 h_e 两项指标^[17]对试件耗能能力的强弱进行判定。能量耗散系数 E 和等效黏滞阻尼系数 h_e 的计算式为

$$E = \frac{S_{ABCD}}{S_{\Delta OAE} + S_{\Delta OCF}} \quad (3)$$

$$h_e = \frac{E}{2\pi} \quad (4)$$

式中 S_{ABCD} 即滞回曲线所包含的面积, $S_{\Delta OAE}$ 和 $S_{\Delta OCF}$ 分别如图 9 所示。

根据式(3)、式(4)和图 9 所示滞回曲线示意图, 将计算结果绘制等效黏滞阻尼系数 h_e -位移曲线如图 10 所示。

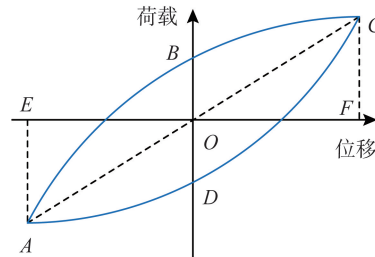


图 9 滞回曲线示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the hysteresis curve

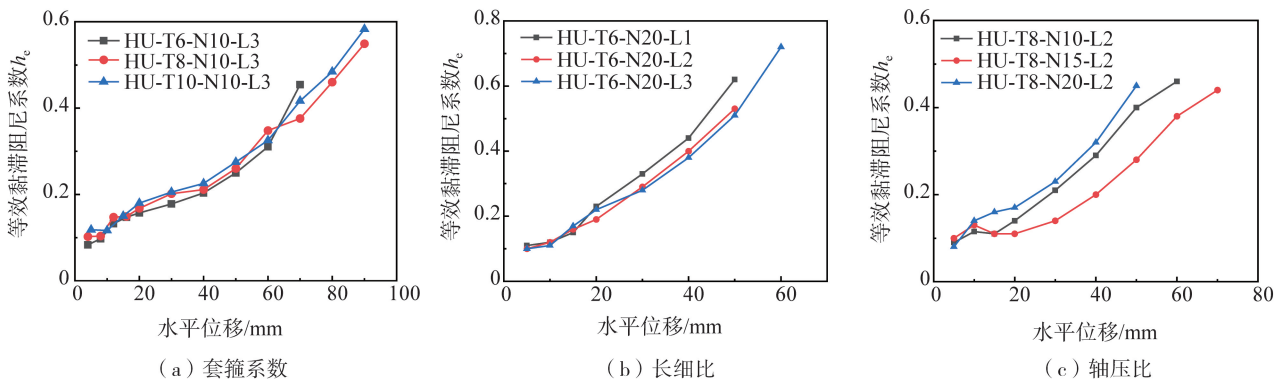


图 10 试件 h_e - Δ 曲线

Fig. 10 Specimen h_e - Δ curve

进一步分析不同参数对试件耗能能力的影响如下:

1) 套箍系数: 如图 10(a) 所示, 随着套箍系数的增加, 试件 HU-T6-N10-L3 ($\theta=0.55$)、试件 HU-T8-N10-L3 ($\theta=0.90$) 和试件 HU-T10-N10-L3 ($\theta=0.98$) 的 h_e 逐渐增大。表明套箍系数的增大, 增强了钢管与核心混凝土之间的相互作用, 试件的刚度和强度均得到提升, 同时其累积耗能能力增强, 抗震性能提高。

2) 长细比: 如图 10(b) 所示, 试件加载初期, 加载位移较小, 各试件的耗能能力相差不大, 当加载位移较大时, 长细比越小的试件表现出的耗能能力越强, 但相比于其他试件并无明显提升。表明长细比的改变对试件的耗能能力无显著影响。

3) 轴压比: 如图 10(c) 所示, 对比分析试件 HU-T8-N10-L2 ($n=0.10$)、试件 HU-T8-N15-L2 ($n=0.15$) 和试件 HU-T8-N20-L2 ($n=0.20$), 随着试件的轴压比增大, 试件的初始耗能能力均有所提高。此外, 随着轴压比的增大, 混凝土受压区应力增加, 试件提早进入塑性阶段, 耗能能力均有显著提升。

3 承载力计算

根据我国 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》^[18]、美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构建筑规范》^[17] 和福建省地方标准 DBJ/T13-51—2010《钢管混凝土结构技术规程》^[19] 计算所得的高强方钢管超高性能混凝土柱的理论承载力值与本文中试验值的对比结果如表 6 所示。由表 6 可知, 根据美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构建筑规范》计算承载力与试验实测数据相差较大, 理论计算值相较于实测数据均低于 48%, 说明通过此规范进行试件设计偏于保守和安全, 必然造成材料的浪费; 采用我国 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》计算所得承载力值均高出试验值 17% 以上, 说明此规范不能完全适用于采用高强钢管和超高性能混凝土组合构件的设计。因此, UHPCFHST 柱不建议采用此规范进行设计; 相比美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构建筑规范》和我国 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》, 根据 DBJ/T13-51—2010

《钢管混凝土结构技术规程》得到的承载力计算值与试验值更加吻合,平均值相差 13%且均方差为 0.121,说明根据此规范计算结果与试验数据的差异性较小。此外,通过图 11 试验与规范承载力数据对比的情况可以看出,通过 DBJ/T13-51-2010《钢管混凝土结构技术规程》标准计算的承载力与试验实测数据更加贴合。因此,可采用 DBJ/T13-51-2010《钢管混凝土结构技术规程》对 UHPCFHST 柱的承载力进行计算。

根据我国 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》^[18]的规范标准进行承载力计算,相关公式如下:

当 $\frac{N}{N_u} \geq 0.255$ 时,

$$\frac{N}{N_u} + \frac{\beta_m M}{1.5M_u(1-0.4N/N'_E)} \leq 1 \tag{5}$$

当 $\frac{N}{N_u} < 0.255$ 时,

$$-\frac{N}{2.17N_u} + \frac{\beta_m M}{M_u(1-0.4N/N'_E)} \leq 1 \tag{6}$$

式中: N'_E 为系数, $N'_E = 11.6k_E f_{sc} A_{sc} / \lambda^2$; N 、 M 为作用于构件的轴心拉力和弯矩; N_u 、 M_u 的计算与取值参考文献[18]。

根据福建省地方标准 DBJ/T13-51-2010《钢管混凝土结构技术规程》^[19]的标准进行承载力计算,相关公式为

当 $N/N_u \geq 2\varphi^3 \eta_0$ 时,

$$\frac{N}{N_u} + \frac{a \cdot \beta_m \cdot M}{M_u} \leq 1 \tag{7}$$

当 $N/N_u < 2\varphi^3 \eta_0$ 时,

$$\frac{-b \cdot N^2}{N_u^2} - \frac{c \cdot N}{N_u} + \left(\frac{1}{d}\right) \frac{\beta_m \cdot M}{M_u} \leq 1 \tag{8}$$

$$a = 1 - 2\varphi^2 \cdot \eta_0, \quad b = \frac{1 - \zeta_0}{\varphi^3 \cdot \eta_0^2}, \quad c = \frac{2 \cdot (\zeta_0 - 1)}{\eta_0}, \quad d = 1 - 0.25 \cdot \left(\frac{N}{N_E}\right) \tag{9}$$

$$\zeta_0 = 1 + 0.14\xi^{-1.3}, \quad \eta_0 = \begin{cases} 0.5 - 0.2445 \cdot \xi & (\xi \leq 0.4) \\ 0.1 + 0.14 \cdot \xi^{-0.84} & (\xi > 0.4) \end{cases} \tag{10}$$

式中: N_E 为欧拉临界力, $N_E = \pi^2 \cdot E_{sc} \cdot A_{sc} / \lambda^2$; φ 轴心受压构件稳定系数,具体取值参考文献[17]。

根据美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构建筑规范》^[24]规范及先前研究^[26]进行承载力计算,相关公式为

$$\frac{N}{P_u} + \frac{8}{9} \left(\frac{M}{M_u}\right) \leq 1 \left(\frac{N}{P_u} \geq 0.2\right) \tag{11}$$

$$\frac{N}{2P_u} + \frac{M}{M_u} \leq 1 \left(\frac{N}{P_u} \leq 0.2\right) \tag{12}$$

式中: P_u 为考虑稳定性的轴压构件的承载力; M_u 为轴压载荷为零时的力矩承载力。

表 6 承载力计算结果对比

Table 6 Comparison of bearing capacity calculation results

试件编号	试件名称	P_{max}/kN	ANSI/AISC 360—16		GB 50936—2014		DBJ/T13-51—2010	
			P_c/kN	P_c/P_{max}	P_c/kN	P_c/P_{max}	P_c/kN	P_c/P_{max}
S1	HU-T6-N10-L3	81.5	44.9	0.55	103.5	1.27	75.80	0.93
S2	HU-T8-N10-L3	106.1	50.9	0.48	126.2	1.19	92.3	0.87
S3	HU-T10-N10-L3	167.3	82.0	0.49	197.4	1.18	157.3	0.94
S4	HU-T6-N20-L1	248.1	126.5	0.51	302.6	1.22	213.4	0.86
S5	HU-T6-N20-L2	137.6	67.4	0.49	166.4	1.21	114.2	0.83
S6	HU-T6-N20-L3	92.7	44.5	0.48	121.4	1.31	80.7	0.87
S7	HU-T8-N10-L2	127.2	64.9	0.51	152.6	1.20	104.3	0.82
S8	HU-T8-N15-L2	141.7	69.4	0.49	165.7	1.17	117.6	0.83
S9	HU-T8-N20-L2	137.2	68.6	0.50	168.7	1.23	116.6	0.85
	平均值			0.50		1.22		0.87
	均方差			0.062		0.127		0.121

注: P_{max} 为基于试验实测所得承载力值; P_c 为基于相应规范计算所得理论值。

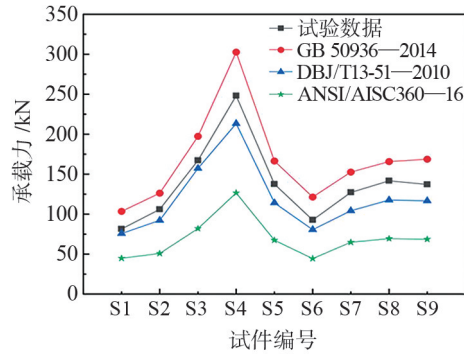


图 11 试验与规范承载力数据对比

Fig. 11 Comparison of test and code-specified bearing capacity data

4 结论

本文以套箍系数、长细比和轴压比为参数,对高强方钢管超高性能混凝土柱抗震性能进行研究,此外,对比承载力试验值与美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构建筑规范》、我国 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》和福建省地方标准 DBJ/T13—51—2010《钢管混凝土结构技术规程》计算结果,对 UHPCFHST 柱在低周往复荷载作用下的设计提供参照依据。得出如下结论:

1)通过分析试件的骨架曲线,高强方钢管超高性能混凝土柱的初始刚度随套箍系数和轴压比的增加而增大,但随长细比的增加而降低。结果表明套箍系数、轴压比和长细比的改变对高强方钢管超高性能混凝土柱的初始刚度影响较大。

2)通过分析试件柱的延性性能,高强方钢管超高性能混凝土柱的延性性能随着套箍系数的提高而提升,但随着轴压比和长细比的增加,延性性能会有下降的趋势。结果表明,套箍系数和长细比的改变对高强方钢管超高性能混凝土柱延性性能影响较为显著。

3)通过分析试件柱的刚度退化曲线,随着套箍系数提高和长细比减小,高强方钢管超高性能混凝土柱的初始刚度增大,刚度退化速率加快;试件柱随轴压比增大初始刚度变化较小,但退化速率略有加快;长细比对刚度退化曲线的影响最为显著。

4)通过分析试件柱的耗能能力,可知随着加载位移的增大,高强方钢管超高性能混凝土柱的耗能能力逐渐增强。在一定范围内,较大的套箍系数、轴压比能显著提升高强方钢管超高性能混凝土柱的耗能能力,而长细比相反。

5)通过对比承载力试验值与美国 ANSI/AISC 360—16《钢结构建筑规范》、我国 GB 50936—2014《钢管混凝土结构技术规范》和福建省地方标准 DBJ/T13—51—2010《钢管混凝土结构技术规程》计算结果,建议采用 DBJ/T13—51—2010《钢管混凝土结构技术规程》对 UHPCFHST 柱进行承载力设计。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
HAN Linhai. Concrete-filled steel tubular structure: Theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 陈宝春, 李莉, 罗霞, 等. 超高强钢管混凝土研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 1-21.
CHEN Baochun, LI Li, LUO Xia, et al. Review on ultra-high strength concrete filled steel tubes[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(5): 1-21. (in Chinese)
- [3] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24. (in Chinese)
- [4] 王成启, 郭玉林, 梁远博. 钢纤维对超高性能混凝土性能的影响[J]. 水运工程, 2022(9): 22-26, 34.
WANG Chengqi, GUO Yulin, LIANG Yuanbo. Effect of steel fiber on properties of ultra high performance concrete[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(9): 22-26, 34. (in Chinese)
- [5] 邹响, 高传超, 王城泉, 等. 高轴压比下波纹侧板-方钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(4): 35-41.
ZOU Yun, GAO Chuanchao, WANG Chengquan, et al. Experimental study on seismic behavior of corrugated webs-square concrete filled steel tubular columns with high axial compression ratio[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(4): 35-41. (in Chinese)

- [6] 徐培蓁, 聂瑞锋, 叶列平. 方钢管混凝土柱塑性变形性能的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(5): 609-614, 622.
XU Peizhen, NIE Ruifeng, YE Lieping. Experimental study on seismic behavior of concrete filled square steel tubular columns to low-cycle reversed horizontal load[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(5): 609-614, 622. (in Chinese)
- [7] 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(增刊1): 339-344.
WANG Tiecheng, ZHANG Lei, ZHAO Hailong, et al. Analysis of parameter influence on seismic behavior of concrete filled square steel tubular columns[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Sup. 1): 339-344. (in Chinese)
- [8] 罗云标, 赵玉彩, 严加宝, 等. 圆钢管超高性能混凝土组合柱抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(1): 77-86.
LUO Yunbiao, ZHAO Yucai, YAN Jiabao, et al. Analysis on seismic performance of ultra-high performance concrete-filled steel tube columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(1): 77-86. (in Chinese)
- [9] ZHANG J W, LIU Y J, CHEN Z Q, et al. Seismic behavior of high-strength concrete-filled square steel tube columns reinforced with ultrahigh-strength reinforcing bars[J]. Structures, 2021, 34: 3125-3140.
- [10] TIAN H W, ZHOU Z, WEI Y, et al. Experimental and numerical investigation on the seismic performance of concrete-filled UHPC tubular columns[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103118.
- [11] 韦建刚, 周俊, 罗霞, 等. 高强钢管超高性能混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(7): 30-40, 51.
WEI Jiangan, ZHOU Jun, LUO Xia, et al. Experimental study on quasi-static behavior of ultra-high strength concrete filled high strength steel tubular columns[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 30-40, 51. (in Chinese)
- [12] 邱增美, 李幅昌, 杨志坚. 高强方钢管超高性能混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊2): 295-303.
QIU Zengmei, LI Guochang, YANG Zhijian. Experimental study on Seismic performance of high-strength square steel tube high-strength concrete columns[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Sup. 2): 295-303.
- [13] 杜国锋, 何学杰, 袁洪强, 等. 不锈钢管超高性能混凝土柱抗震性能研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2023, 20(1): 87-95.
DU Guofeng, HE Xuejie, YUAN Hongqiang, et al. Study on seismic behavior of ultra-high performance concrete filled stainless steel tubular columns[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2023, 20(1): 87-95. (in Chinese)
- [14] 程展, 李俊华, 刘子丹, 等. 内置钢骨的方形不锈钢管超高性能混凝土短柱轴压力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 78-88.
CHENG Zhan, LI Junhua, LIU Zidan, et al. Axial compressive performance of steel reinforced ultra-high performance concrete filled square stainless steel tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 78-88. (in Chinese)
- [15] 刘子丹, 焦文帅, 程展, 等. 钢骨不锈钢管超高性能混凝土柱轴压性能研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(5): 17-27.
LIU Zidan, JIAO Wenshuai, CHENG Zhan, et al. Research on the axial compression behavior of steel-reinforced ultra-high performance concrete-filled stainless steel tubular columns[J]. Industrial Construction, 2023, 53(5): 17-27. (in Chinese)
- [16] 何嘉威, 张虎, 张继承, 等. 内置型钢方形不锈钢管超高性能混凝土柱偏压性能[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(11): 1-11.
HE Jiawei, ZHANG Hu, ZHANG Jicheng, et al. Eccentric compression performance of steel-reinforced ultra-high performance concrete filled square stainless steel tubular columns[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(11): 1-11. (in Chinese)
- [17] ANSI/AISC 360—16 AISC Specification for structural steel buildings[S]. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [18] GB 50936—2014 钢管混凝土结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
GB 50936—2014 Technical code for concrete filled steel tubular structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [19] DBJ/T 13-51—2010 钢管混凝土结构技术规程[S]. 福州: 福建省住房和城乡建设厅, 2010.
DBJ/T 13-51—2010 Technical specification for concrete-filled steel tube structures [S]. Fuzhou: Fujian Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, 2010. (in Chinese)
- [20] GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
GB/T 31387—2015 Active powder concrete [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [21] T/CECS 10107—2020 超高性能混凝土(UHPC)技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
T/CECS 10107—2020 Technical requirements for ultra-high performance concrete (UHPC) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [22] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T 228.1—2010 Tensile tests for metallic materials-Part 1: test method at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [23] JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [24] 张娟. L形钢管混凝土柱的地震损伤分析及抗震性能研究[D]. 荆州: 长江大学, 2019.
ZHANG Juan. Seismic damage analysis and seismic performance study of L-shaped concrete-filled steel tubular columns[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2019. (in Chinese)
- [25] 游经团. 矩形钢管混凝土柱压弯构件滞回性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2002.
YOU Jingtuan. Study on hysteretic behaviour of concrete-filled double tubular slender columns [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2002. (in Chinese)
- [26] CAI H, XU L H, CHI Y, et al. Seismic performance of rectangular ultra-high performance concrete filled steel tube (UHPCFST) columns[J]. Composite Structures, 2021, 259: 113242.
- [27] XU S C, WU C Q, LIU Z X, et al. Experimental investigation on the cyclic behaviors of ultra-high-performance steel fiber reinforced concrete filled thin-walled steel tubular columns[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 140: 1-20.