

引用本文: 韦建刚, 周俊, 杨艳, 等. 钢管超高强混凝土柱拟静力试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 62-69.

WEI Jian-gang, ZHOU Jun, YANG Yan, et al. Quasi-static Test on Ultra-high Strength Concrete Filled Steel Tube Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 62-69.

DOI: 10.19815/j.jace.2020.09045

钢管超高强混凝土柱拟静力试验

韦建刚^{1,2}, 周俊¹, 杨艳¹, 陈宝春¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 以轴压比、含钢率和长径比为参数, 进行了 11 根钢管超高强混凝土柱拟静力试验, 分析了试件荷载-位移滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能以及强度和刚度退化等抗震性能指标。结果表明: 随着轴压比增大, 极限承载能力和延性降低, 试件耗能能力减弱, 强度和刚度退化程度增强; 随着含钢率增大, 弹性刚度、极限承载力以及延性呈增大趋势, 耗能能力增强, 强度和刚度退化程度减弱; 随着长径比增大, 弹性刚度、极限承载力以及延性都呈减小趋势, 整体耗能能力减弱, 强度和刚度退化程度增强; 受适用材料范围的限制, 目前规程中的抗弯刚度和极限弯矩计算方法并不适用于钢管超高强混凝土结构, 计算结果偏差较大, 有必要对其进行适当修正, 以期适用于该类结构抗弯刚度和极限弯矩计算。

关键词: 钢管; 超高强混凝土; 拟静力试验; 抗震性能; 极限弯矩

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)05-0062-08

Quasi-static Test on Ultra-high Strength Concrete Filled Steel Tube Columns

WEI Jian-gang^{1,2}, ZHOU Jun¹, YANG Yan¹, CHEN Bao-chun¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China)

Abstract: Taking axial compression ratio, steel ratio and aspect ratio as experimental parameters, quasi-static tests on eleven ultra-high strength concrete filled steel tubular (UCFST) columns were carried out, and load-displacement hysteretic curve, skeleton curve, as well as the seismic performance indexes such as ductility, energy consumption, strength and stiffness degradation were analyzed. The results show that with the increase of axial compression ratio, the ultimate bearing capacity and the ductility of the specimens decrease, the overall energy dissipation capacity also decreases, and the degradation in strength and stiffness is substantial. As steel ratio increases, the elastic stiffness and ultimate bearing capacity as well as the ductility can be improved, meanwhile the energy dissipation capacity increases, degradation levels for strength and stiffness decrease. As aspect ratio increases, the elastic stiffness and ultimate bearing capacity as well as the ductility decrease, while the overall energy dissipation capacity also decreases, and the degradation of strength and stiffness increase. Limited to the scopes of applicable materials, the current codified flexural rigidity and ultimate bending moment

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878172); 福建省高校产学研合作项目(2019H6020); 福建省高校创新团队发展计划项目

作者简介: 韦建刚(1971-), 男, 广西上思人, 研究员, 博士研究生导师, 工学博士, 博士后, E-mail: weijg@fzu.edu.cn.

通信作者: 杨艳(1979-), 女, 福建邵武人, 副研究员, 工学博士, E-mail: yangyan@fzu.edu.cn.

calculation methods for conventional composite structural members are not suitable for UCFST structures, and the deviation of calculation results are very large. It is necessary to modify them properly, so as to apply them to the flexural rigidity and ultimate bending moment calculation of UCFST structures.

Key words: steel tube; ultra-high strength concrete; quasi-static test; seismic performance; ultimate bending moment

0 引 言

超高性能混凝土 (Ultra-high Performance Concrete, UHPC) 在全世界范围内一直备受关注^[1-2],其在桥梁工程^[3-4]中有着大量应用。迄今为止的研究和观察表明,UHPC 有潜力将混凝土扩展为同以往不同的新形式,将 UHPC 与普通混凝土、钢材等材料进行组合形成新型组合结构是当前工程界的研究热点^[5];将未掺有钢纤维的 UHPC[本文为将其与掺有钢纤维的 UHPC 进行区别,称之为超高强混凝土 (Ultra-high Strength Concrete, UH-SC)]与钢管组成钢管超高强混凝土 (UHSC Filled Steel Tubular,UCFST)结构,不但具备普通钢管混凝土的组合效应特征,且外部钢管的约束可以在一定程度上弥补 UHSC 由于强度的提高而导致的脆性缺陷^[6]。

对于 UCFST 结构的研究,目前主要集中在静力性能方面。Xiong 等^[7]、韦建刚等^[8-9]以钢材强度、UHSC 强度、套箍系数、径厚比以及长细比等为参数,对 UCFST 试件进行了长短柱的轴压、偏压试验研究,提出一系列适用于 UCFST 试件受压承载力的计算公式;对于 UCFST 结构抗震性能研究,Wei 等^[10]对该结构弯矩-曲率滞回性能进行了分析。还有部分学者以轴压比、径厚比以及钢材强度等为

参数,进行了钢管高强混凝土 (High Strength Concrete Filled Steel Tubular,HCFST)结构的拟静力试验,分析了各试件抗震性能^[11-12]。

为了进一步探讨 UCFST 结构的抗震性能,本文借鉴 CFST 结构拟静力试验研究^[13-14],以 UCFST 柱为研究对象,采用拟静力试验方法分析轴压比、含钢率和长径比对 UCFST 试件荷载-位移滞回曲线、强度和刚度退化、耗能以及延性等指标的影响,了解该类结构的抗震性能,可为其应用研究提供参考数据。

1 试验概况

以轴压比、含钢率和长径比为试验参数,设计了 11 根 UCFST 柱。表 1 为试件的详细设计资料,其中,钢管采用 Q345 钢材,试件编号由五部分组成:S 代表钢管,U 代表 UHSC,T 为钢管厚度,L 为试件长度,N 代表试件轴压比 n 小数点后数值,且 $n = N_0/N_u$, N_0 为试验时施加在试件端部的水平轴力, N_u 为钢管屈服时对应的试件强度承载力^[15], D 为钢管外径, α 为含钢率。

2 加载方案与测量方式

本文采用如图 1 所示两端铰支跨中作用集中荷载的梁式加载方式。试验加载制度采用位移控制方

表 1 试件参数

Tab. 1 Specimen Parameters

序号	试件编号	钢管外径 D/mm	厚度 T/mm	长度 L/mm	长径比 L/D	含钢率 α	N_0/kN	轴压比 n
1	SU-T8-L19-N03	140	8	1 900	14	0.275	111	0.03
2	SU-T8-L19-N06	140	8	1 900	14	0.275	223	0.06
3	SU-T8-L19-N11	140	8	1 900	14	0.275	446	0.11
4	SU-T8-L19-N17	140	8	1 900	14	0.275	668	0.17
5	SU-T8-L19-N23	140	8	1 900	14	0.275	891	0.23
6	SU-T5-L19-N11	140	5	1 900	14	0.160	378	0.11
7	SU-T6-L19-N11	140	6	1 900	14	0.196	400	0.11
8	SU-T10-L19-N11	140	10	1 900	14	0.361	489	0.11
9	SU-T8-L14-N11	140	8	1 400	10	0.275	446	0.11
10	SU-T8-L24-N11	140	8	2 400	17	0.275	446	0.11
11	SU-T8-L29-N11	140	8	2 900	21	0.275	446	0.11

式^[16],试件屈服前每级位移加载 1 圈,屈服后,以屈服位移倍数为加载位移,每级位移加载 3 圈,直至试件破坏。在平面铰中心和试件两侧四分之一点处布置位移计对其挠度进行测量;由 MTS 伺服加载系统和放置在跨中处的位移计同时测量跨中挠度。试件最不利截面位于刚性夹具两侧,在试件刚性夹具两侧截面各选取 4 个点布置相互垂直的双向应变花,以测得最不利截面上关键点的钢管纵向和横向的应变。

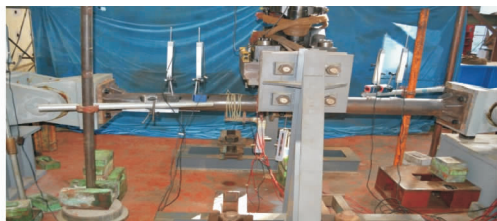


图 1 试验装置
Fig. 1 Test Device

3 试验结果与分析

3.1 荷载-位移滞回曲线

所有试件加载后都呈整体弯曲破坏。图 2 为各 UCFST 柱荷载-位移滞回曲线,从图 2 可以看出,11 根试件呈大致相同的趋势,都较为饱满,无捏缩,呈纺锤形,说明其抗震性能较好。在加载初期,滞回曲线基本呈直线状,试件刚度无退化,处于弹性阶段,残余变形基本为 0。随着位移的增大,试件进入弹塑性阶段,滞回曲线不再经过 0 点,呈直线上升,在该阶段,有残余变形开始产生,滞回曲线形成完整的滞回环,且随着循环位移的不断增大,滞回环所围成的面积不断增大,越来越饱满。由图 2(a)~(e)可知:随着轴压比的增大,滞回环面积不断减小,耗能减弱;在轴压比较小时,荷载-位移滞回曲线在后期基本呈直线状,无明显下降,而轴压比较大时,荷载-位移滞回曲线有明显的下降段。由图 2(c), (f)~(h)可知,在保持其他参数不变情况下,随着含钢率的增大,滞回曲线围成的面积越大,形状越饱满,耗能能力越强。对比图 2(c), (i)~(k)可知,随着试件长径比增大,滞回曲线面积越小,耗能能力不断退化。因此,轴压比、含钢率以及长细比对试件荷载-位移滞回曲线具有较大的影响。

3.2 荷载-位移骨架曲线

图 3 和表 2 分别为试件的荷载-位移骨架曲线及骨架曲线特征值。从图 3 可知:试件在屈服前,骨架曲线基本呈直线上升趋势;随着跨中竖向位移增

加,试件进入弹塑性状态,刚度下降,曲线斜率降低。结合图 3 和表 2 可知:轴压比对弹性段刚度没有太大影响,但是轴压比由 0.03 增大到 0.23 时,试件峰值承载力降低了 36.77%,且下降段下降速度变快;随着含钢率的增大,试件弹性阶段刚度和极限承载力都有较大提高,含钢率由 0.160 增大到 0.361,弹性刚度增大了 43.12%,试件峰值承载力提高了 63.32%;同时长径比对试件的弹性刚度及承载力影响也较大,长径比由 10 增大到 21 时,弹性刚度降低了 84.74%,峰值承载力减小了 70.44%。由此可知,轴压比、含钢率和长径比对 UCFST 柱荷载-位移骨架曲线影响较大。

由表 2 可知:随着轴压比的增大,试件承载力减小,延性系数呈先增大后减小趋势,主要是因为轴压比为 0.03 的试件骨架曲线未出现下降段,使得轴压比由 0.03 增大至 0.06 时延性系数增大;随着长径比的增大,试件承载力减小,延性系数呈先增大后减小趋势;随着含钢率的增加,试件承载力和延性系数则呈增大趋势。由此可知,轴压比、含钢率以及长径比对试件承载力和位移延性系数有着较大的影响。

3.3 耗能能力

等效黏滞阻尼系数是衡量结构耗能能力的重要参数,各试件等效黏滞阻尼系数-位移曲线见图 4。从图 4 可以看出,随着位移增大,试件等效黏滞阻尼系数都不断增大。随着轴压比增大,同一位移试件等效黏滞阻尼系数都有所增大,这与普通钢管混凝土结构的表现一致^[14]。对于不同含钢率试件,等效黏滞阻尼系数呈减小趋势。对比不同长径比试件,试件等效黏滞阻尼系数整体上呈减小趋势。

3.4 刚度退化

UCFST 柱随着位移的增大,刚度会随着试件进入塑性阶段而不断减小,从而发生刚度退化。刚度退化采用割线刚度^[16]表示,图 5 为 UCFST 柱刚度退化曲线,横坐标为累积滞回耗能,可根据文献[17]计算。由图 5 可知,在加载初期,曲线下降程度明显,刚度退化较快,在加载后期,曲线则趋于平缓。其中,随着轴压比和长径比的增大,刚度退化程度越大,且长径比的变化对其影响较大;随着含钢率的增大,试件刚度退化程度则不断减小。

3.5 强度退化

试件的强度退化是指试件随着反复加载位移的增大,其承载力不断降低的过程,可用同级荷载退化系数^[17]表示。试件强度退化曲线如图 6 所示,与极限荷载 P_u ($P_u = 0.8P_{max}$) 对应的退化系数为 ± 0.8

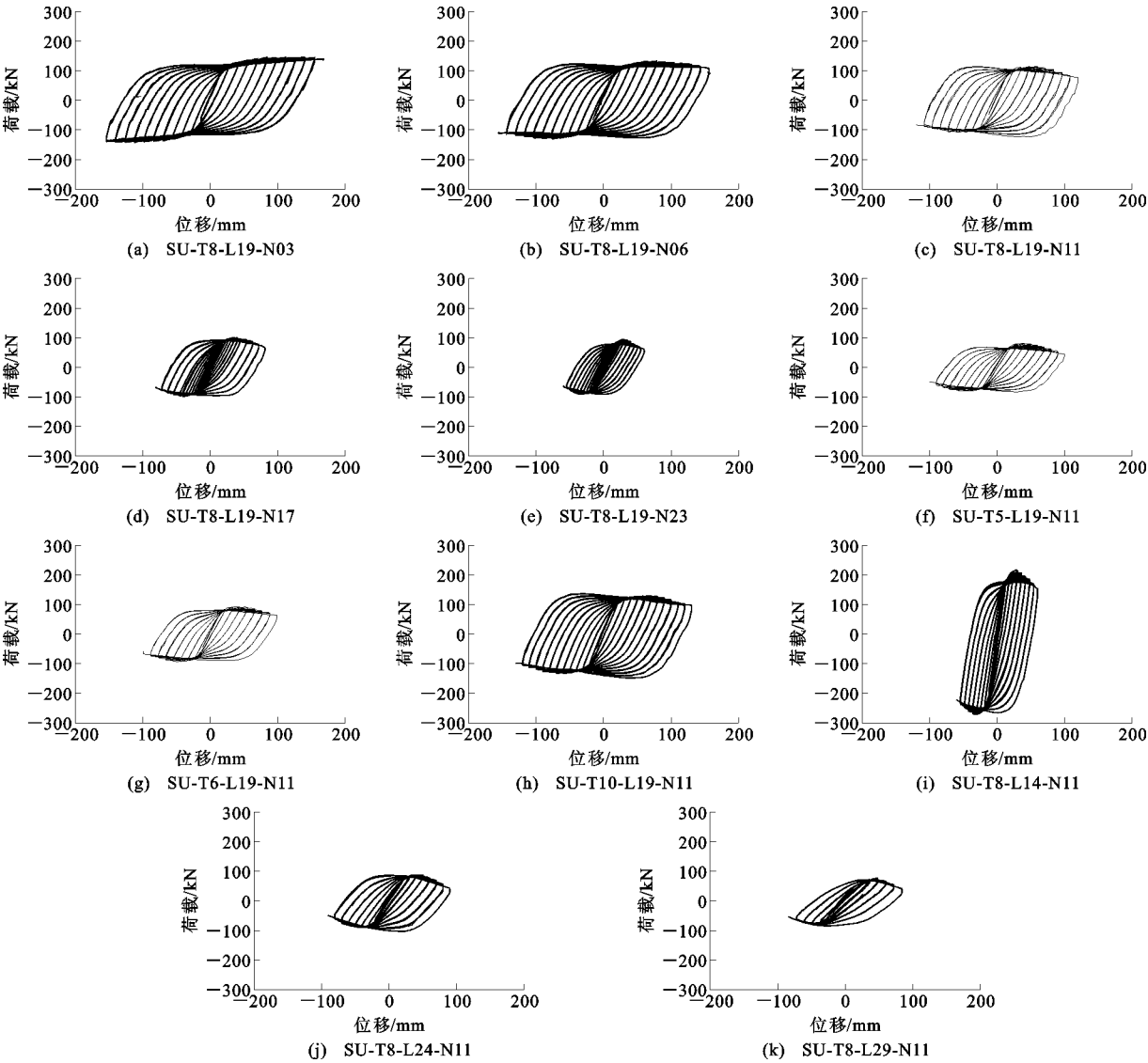


图 2 荷载-位移滞回曲线
Fig. 2 Load-displacement Hysteretic Curves

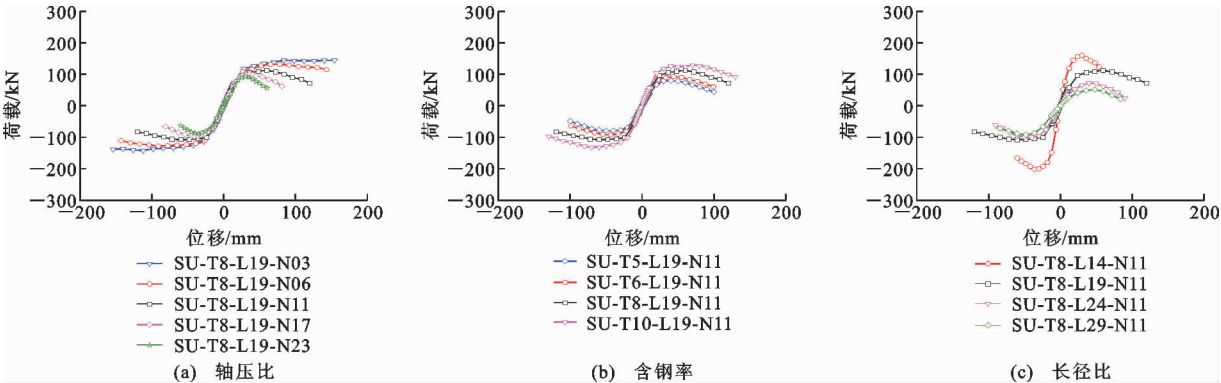


图 3 荷载-位移骨架曲线
Fig. 3 Load-displacement Skeleton Curves

水平线进行比较可知,试件在屈服后仍有较长水平段,表明其不会很快丧失承载能力,达到破坏荷载时仍能继续承载。试件强度退化程度随着轴压比和长径比的增大而增强,且轴压比小于等于 0.06 的试件总体强度退化较小。同时,试件强度退化程度随着含钢率增大而降低,且含钢率为 0.361 的试件强度

表 2 骨架曲线特征值

Tab. 2 Characteristic Values of Skeleton Curve

试件编号	$k_a/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$	P_y/kN	P_m/kN	P_u/kN	u_Δ
SU-T8-L19-N03	5.5	121.7	143.8	141.4	4.3
SU-T8-L19-N06	5.2	112.6	129.9	112.8	4.5
SU-T8-L19-N11	5.0	100.5	110.4	93.8	3.6
SU-T8-L19-N17	5.2	89.0	99.1	84.2	2.6
SU-T8-L19-N23	4.8	82.2	90.9	77.3	2.1
SU-T5-L19-N11	4.4	71.8	79.9	67.9	3.1
SU-T6-L19-N11	4.9	83.8	92.5	78.6	3.2
SU-T10-L19-N11	6.2	113.0	130.5	103.2	4.1
SU-T8-L14-N11	16.6	212.0	241.5	205.3	3.0
SU-T8-L24-N11	4.5	97.3	108.3	92.0	2.3
SU-T8-L29-N11	2.5	65.4	71.4	61.1	2.1

注： k_a 为弹性刚度； P_y 为屈服荷载； P_m 为峰值荷载； P_u 为极限荷载； u_Δ 为位移延性系数。

退化程度较低。

3.6 抗弯刚度和极限弯矩

图 7 为典型的 UCFST 柱(SU-T6-L19-N03)弯矩-曲率骨架曲线。由图 7 可知：在加载初期，曲线刚度变化较小，为弹性阶段；曲线刚度随着加载继续不断减小，直至达到试件极限弯矩 M_u 。同文献[12]，本文将 $0.2M_u$ 割线刚度定义为初始截面抗弯刚度 K_i ，将 $0.6M_u$ 割线刚度定义为使用阶段抗弯刚

度 K_s ，通过本文试验得到的初始阶段刚度试验值 K_{ic} 和使用阶段刚度试验值 K_{sc} 。采用 ACI^[18]，BS 5400^[19]，ANSI/AISC^[20] 以及 EC4^[21] 中的计算公式计算本文试件抗弯刚度，并将其结果与试验值比较，结果如表 3 所示。并采用上述规程以及 GB 50936—2014^[22] 中对极限弯矩的计算公式，对试件极限弯矩进行计算，与试验结果进行比较，如表 4 所示。由于截面抗弯刚度和弯矩与试件长度无关，因此以下对不同长径比的试件并未分析。

由表 3 可知，UCFST 柱抗弯刚度随着轴压比的增大呈先增大后减小趋势，但影响程度不大，这与 CFST 柱^[14]结果类似，主要是由于轴压比的增大使得核心 UHSC 初始应力增大，模量有所降低，且核心 UHSC 对截面抗弯刚度作用占比不大，因此核心 UHSC 受压面积增大对抗弯刚度影响不大。截面抗弯刚度随着含钢率的增大也呈增大趋势。此外，采用上述规程对 UCFST 柱截面抗弯刚度的计算结果都偏保守，分析其原因为本文采用的核心混凝土为超高强混凝土，而上述规程适用范围未将其含括进去，因此有必要对其进行适当修正，以期适用于高强材料组合结构抗弯刚度计算；对比 4 种规程，BS 5400 计算结果相对更接近试验结果，后面依次为 ANSI/AISC，EC4 和 ACI。

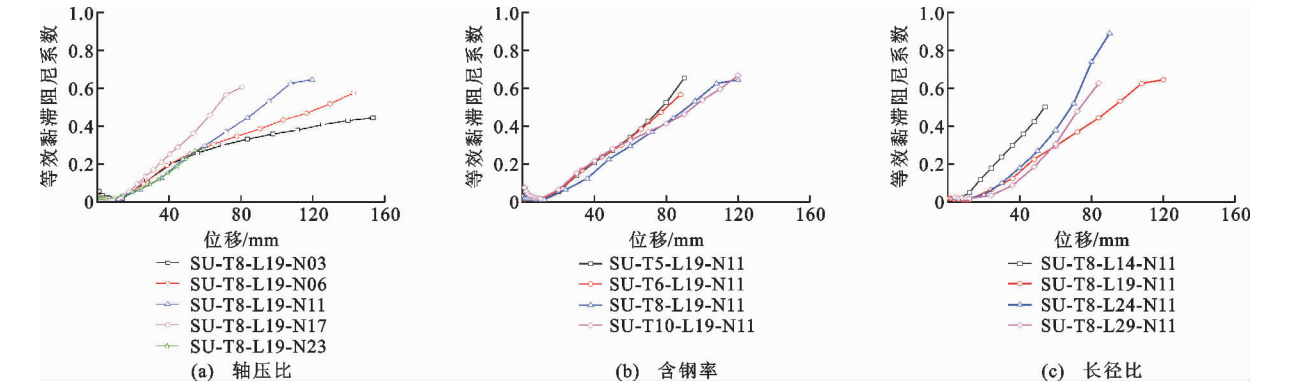


图 4 等效黏滞阻尼系数-位移曲线
Fig. 4 Equivalent Viscous Damping Coefficient-displacement Curves

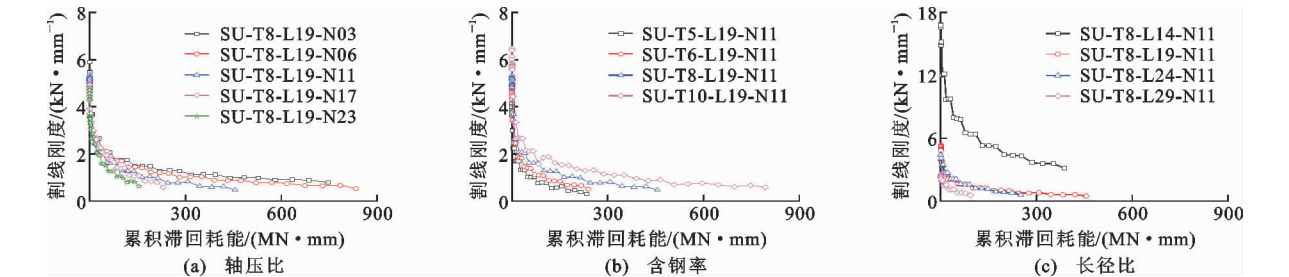


图 5 刚度退化曲线
Fig. 5 Stiffness Degradation Curves

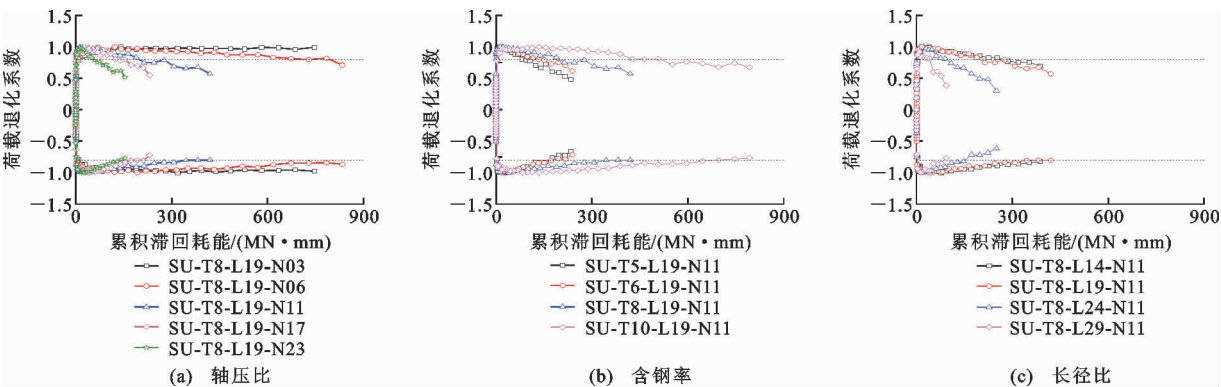


图 6 强度退化曲线

Fig. 6 Strength Degradation Curves

表 3 抗弯刚度规程计算值与试验值对比

试件编号	$K_{ie}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$K_{se}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	ACI 318-08		BS 5400:2005		ANSI/AISC 360-05		EC4	
			K_{ie}/K_{ic}	K_{ie}/K_{sc}	K_{ie}/K_{ic}	K_{ie}/K_{sc}	K_{ie}/K_{ic}	K_{ie}/K_{sc}	K_{ie}/K_{ic}	K_{ie}/K_{sc}
SU-T8-L19-N03	2 147	1 787	1.348	1.122	1.020	0.849	1.095	0.911	1.162	0.967
SU-T8-L19-N06	2 185	1 869	1.372	1.173	1.038	0.888	1.114	0.953	1.182	1.011
SU-T8-L19-N11	2 212	2 077	1.389	1.304	1.051	0.987	1.128	1.059	1.197	1.124
SU-T8-L19-N17	2 274	2 121	1.427	1.331	1.080	1.008	1.160	1.082	1.231	1.148
SU-T8-L19-N23	2 162	1 978	1.357	1.242	1.027	0.940	1.102	1.009	1.170	1.070
SU-T5-L19-N11	1 809	1 698	1.699	1.594	1.063	0.998	1.193	1.120	1.307	1.227
SU-T6-L19-N11	2 049	1 935	1.559	1.473	1.081	1.021	1.194	1.128	1.277	1.206
SU-T10-L19-N11	2 514	2 399	1.552	1.481	1.179	1.125	1.282	1.223	1.339	1.278
均值			1.463	1.340	1.067	0.977	1.159	1.061	1.233	1.129
标准差			0.118	0.154	0.059	0.095	0.063	0.108	0.063	0.101

注: K_{ic} 为初始截面抗弯刚度规程计算值; K_{sc} 为使用阶段抗弯刚度规程计算值。

表 4 极限弯矩规程计算值与试验值对比

Tab. 4 Ultimate Bending Moment Comparison Between Calculated Results in Codes and Test Results

试件编号	$M_{ue}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	ACI 318-08, ANSI/AISC 360-05		BS 5400:2005		GB 50936—2014		EC4	
		$M_{uc}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	M_{ue}/M_{uc}	$M_{uc}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	M_{ue}/M_{uc}	$M_{uc}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	M_{ue}/M_{uc}	$M_{uc}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	M_{ue}/M_{uc}
SU-T8-L19-N03	77.88	54.57	1.427	55.59	1.401	74.32	1.048	38.33	2.032
SU-T8-L19-N06	78.13	54.57	1.432	55.59	1.405	74.32	1.051	38.33	2.038
SU-T8-L19-N11	78.38	54.57	1.436	55.59	1.410	74.32	1.055	38.33	2.045
SU-T8-L19-N17	80.42	54.57	1.474	55.59	1.447	74.32	1.082	38.33	2.098
SU-T8-L19-N23	79.88	54.57	1.464	55.59	1.437	74.32	1.075	38.33	2.084
SU-T5-L19-N11	56.12	35.65	1.574	38.06	1.475	48.31	1.162	34.62	1.621
SU-T6-L19-N11	64.34	42.15	1.526	44.19	1.456	56.71	1.135	43.78	1.470
SU-T10-L19-N11	91.80	66.21	1.386	69.32	1.324	93.53	0.982	95.51	0.961
均值			1.465		1.419		1.074		1.794
标准差			0.060		0.046		0.055		0.411

注: M_{ue} 为极限弯矩试验值; M_{uc} 为极限弯矩规程计算值。

由表 4 可以看出,当轴压比较小时,极限弯矩随轴压比增大呈增大趋势,当轴压比较大时,则呈减小趋势。含钢率增大时,极限弯矩也随之增大。对比不同规范对极限弯矩的计算结果与试验结果可知,GB 50936—2014 计算结果与试验结果最为接近,BS 5400 次之,后面依次为 ACI,ANSI/AISC 以及

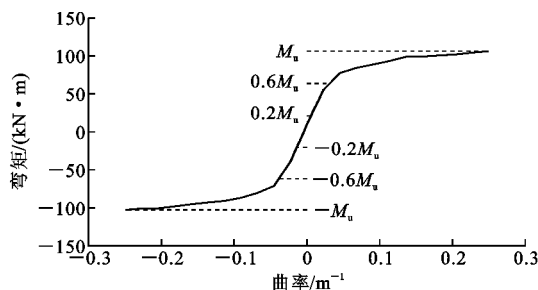


图7 典型弯矩-曲率骨架曲线

Fig. 7 Typical Moment-curvature Skeleton Curve

EC4.

4 结 语

(1)轴压比、含钢率和长径比对试件的承载力和延性影响较大。试件极限承载力随着轴压比和长径比增大而减小,随着含钢率增大而增大;延性系数随着轴压比和长径比增大呈先增大后减小趋势,随着含钢率增大而增大。

(2)轴压比、含钢率和长径比对试件的耗能及强度和刚度退化具有较大的影响。试件整体耗能能力随着轴压比和长径比增大而减弱,随着含钢率增大而提高;强度和刚度退化程度则随着轴压比和长径比增大而增强,随着含钢率增大而减弱。

(3)随着轴压比增大,试件抗弯刚度呈先增大后减小趋势,极限弯矩呈减小趋势;含钢率的增大,有利于截面抗弯刚度和极限弯矩的增大。由于受适用材料范围的限制,目前规程中的抗弯刚度和弯矩计算方法并不适用于钢管超高强混凝土柱,计算结果偏差较大。

参考文献:

References:

- [1] 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 Bao-chun,JI Tao,HUANG Qing-wei,et al. Review of Research on Ultra-high Performance Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2014,31(3):1-24.
- [2] ABBAS S,NEHDI M L,SALEEM M A. Ultra-high Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability,Sustainability and Implementation Challenges [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials,2016,10(3):271-295.
- [3] 陈宝春,黄卿维,王远洋,等.中国第一座超高性能混凝土(UHPC)拱桥的设计与施工[J].中外公路,2016,36(1):67-71.

CHEN Bao-chun,HUANG Qing-wei,WANG Yuan-yang,et al. Design and Construction of China's First Ultra-high Performance Concrete (UHPC) Arch Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016,36(1):67-71.

- [4] LOPEZ J A,SERNA P,CAMACHO E,et al. First Ultra-high-performance Fibre-reinforced Concrete Footbridge in Spain: Design and Construction [J]. Structural Engineering International, 2014, 24 (1): 101-104.
- [5] XUE J Q,BRISEGHELLA B,HUANG F Y,et al. Review of Ultra-high Performance Concrete and Its Application in Bridge Engineering [J]. Construction and Building Materials,2020,260:1-12.
- [6] 林震宇,吴炎海,沈祖炎.圆钢管活性粉末混凝土轴压力学性能研究[J].建筑结构学报,2005,26(4):52-57.
LIN Zhen-yu,WU Yan-hai,SHEN Zu-yan. Research on Behavior of RPC Filled Circular Steel Tube Column Subjected to Axial Compression[J]. Journal of Building Structures,2005,26(4):52-57.
- [7] XIONG M X,XIONG D X,LIEW J Y R. Axial Performance of Short Concrete Filled Steel Tubes with High- and Ultra-high-strength Materials [J]. Engineering Structures,2017,136:494-510.
- [8] 韦建刚,罗 霞,欧智菁,等.圆高强钢管超高性能混凝土短柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(11):16-28.
WEI Jian-gang,LUO Xia,OU Zhi-jing,et al. Experimental Study on Axial Compressive Behavior of Circular UHPC Filled High-strength Steel Tube Short Columns[J]. Journal of Building Structures,2020,41 (11):16-28.
- [9] 韦建刚,罗 霞,谢志涛.圆高强钢管超高性能混凝土轴压柱稳定性性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(增):200-206.
WEI Jian-gang,LUO Xia,XIE Zhi-tao. Stability of Ultra-high Performance Concrete Filled High-strength Steel Tube Columns Subjected to Axial Load [J]. Journal of Building Structures,2019,40(S):200-206.
- [10] WEI J G,ZHOU J,HUANG J N,et al. Experimental Study on the Cyclic Behavior of Ultra High Performance Concrete-filled Steel Tube Beam-columns [J]. Advances in Structural Engineering,2020,23(5):969-978.
- [11] WANG J T,SUN Q,LI J X. Experimental Study on Seismic Behavior of High-strength Circular Concrete-

- filled Thin-walled Steel Tubular Columns[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 403-415.
- [12] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, et al. Seismic Behavior and Modeling of High-strength Composite Concrete-filled Steel Tube (CFT) Beam-columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(5): 725-758.
- [13] MAO X Y, XIAO Y. Seismic Behavior of Confined Square CFT Columns[J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1378-1386.
- [14] HAN L H, YANG Y F, TAO Z. Concrete-filled Thin-walled Steel SHS and RHS Beam-columns Subjected to Cyclic Loading[J]. Thin-walled Structures, 2003, 41(9): 801-833.
- [15] HAN L H, YANG Y F. Cyclic Performance of Concrete-filled Steel CHS Columns Under Flexural Loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(4): 423-452.
- [16] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平级管式等截面钢管混凝土格构柱抗震性能试验与有限元分析[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 226-235.
- YUAN Hui-hui, WU Qing-xiong, CHEN Bao-chun, et al. Aseismic Performance Test and FEM Analysis of Uniform Sectional CFST Lattice Column with Flat Lacing Tubes[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 226-235.
- [17] 吕银花. 平级管式等截面钢管混凝土格构柱滞回性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2015.
- LV Yin-hua. Studies on Hysteretic Behavior of Uniform Section Concrete Filled Steel Tubular Laced Columns with Flat Lacing Tube[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2015.
- [18] ACI 318-08, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary[S].
- [19] BS 5400: 2005, Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 5: Code of Practice for Design of Composite Bridges[S].
- [20] ANSI/AISC 360-05, Specification for Structural Steel Buildings[S].
- [21] EN 1994-1-1: 2004, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1. 1: General Rules and Rules for Buildings[S].
- [22] GB 50936—2014, 钢管混凝土结构技术规范[S].
- GB 50936—2014, Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures[S].