

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.01.003

变截面平缀管式钢管混凝土格构柱的抗震性能

欧智菁¹, 陈盛富¹, 袁辉辉², 吴庆雄²

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要:应用 OpenSEES 通用程序建立变截面平缀管式钢管混凝土格构柱有限元模型, 试件的分析结果与拟静力试验结果吻合良好。以柱肢坡度为计算参数, 对四肢变截面平缀管式钢管混凝土格构柱开展抗震性能研究, 探讨了构件的耗能能力、骨架曲线、结构延性、刚度退化等方面的受力性能和规律, 并与等截面钢管混凝土格构柱进行对比研究。在此基础上进一步分析了轴压比、试件高度(长细比)、平缀管竖向间距、柱肢含钢率、支主管管径比、钢材屈服强度、混凝土强度等参数对变截面平缀管式钢管混凝土格构柱抗震性能的影响, 为钢管混凝土计算理论的进一步完善和变截面钢管混凝土格构式桥墩的工程应用提供参考。

关键词:变截面; 平缀管; 钢管混凝土; 格构柱; 抗震性能

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2018)01-017-13

Seismic performance of variable cross-sectional concrete filled steel tubular laced columns with flat lacing tubes

OU Zhijing¹, CHEN Shengfu¹, YUAN Huihui², WU Qingxiong²

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350116, P.R. China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350118, P.R. China)

Abstract: A finite element analysis model of variable cross-sectional concrete-filled steel tubular (CFST) laced column with flat lacing tubes is built with universal program of OpenSEES, and the calculating results of specimen obtained by OpenSEES agree well with the quasi-static test results. The seismic performance of four-element variable cross-sectional CFST laced columns with flat lacing tubes is researched with calculation parameter of column slope, including the rules on energy dissipation capacity, skeleton curve, structure ductility, and stiffness degradation of elements, and these calculation results are compared with the research results of uniform cross-sectional CFST laced columns. And the influence of axial compression ratio, column height (slenderness ratio), vertical spacing of flat lacing tubes, steel ratio of longitudinal element, diameter ratio of lacing tubes to longitudinal tubes, yield strength of steel, concrete strength and other structural parameters on seismic performance of variable cross-sectional CFST laced columns with flat lacing tubes are investigated. It's hoped that the results can provide reference for the improvement of CFST calculation theory and engineering application of variable cross-sectional CFST

收稿日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408128, 51508104); 福建省高校新世纪优秀人才支持计划资助项目(GY-Z15108)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51408128, 51508104) and Program for New Century Excellent Talents in Fujian Province University(GY-Z15108).

作者简介: 欧智菁(1975—), 女, 博士, 教授, 主要从事钢管混凝土组合结构的研究, (E-mail) sina99@163.com。

laced column piers.

Keywords: variable cross-section; flat lacing tube; concrete-filled steel tube (CFST); laced column; seismic performance

钢管混凝土格构柱式桥墩凭借其截面尺寸小、承压刚度大、变形能力和抗震性能好等特性,已成为颇具发展潜力的理想桥墩形式之一^[1-2]。其中变截面钢管混凝土格构柱(截面尺寸由柱顶至柱底按一定坡度逐渐增大)由于降低了柱身重心高度,与等截面格构柱相比,能更好地隔离吸收和耗散地震能量,同时,具有优美的立面造型,因此,在对抗震性能和外形美观要求高的山区高墩、超高墩桥梁和大跨度钢管混凝土桁肋拱中,具有广阔的应用前景^[3]。然而,对于工程应用日益广泛的变截面钢管混凝土格构柱,现行钢管混凝土设计规程^[4-5]中没有给出相关的计算方法,目前,研究主要集中在其静力性能和极限承载力方面^[6-8],对动力性能方面的研究鲜见报道,这导致变截面钢管混凝土格构柱的设计和工程应用受到一定限制。

近年来,国内外学者已开展了一系列等截面钢管混凝土格构柱的滞回性能研究。邓莹奕^[9]、罗瑶^[10]以轴压比、长细比、混凝土强度为控制参数,进行了四肢等截面斜缀管式格构柱的拟静力试验和有限元数值分析,在此基础上建立了等截面斜缀管式钢管混凝土格构柱水平荷载-位移恢复力函数。吕银花^[11]开展了四肢等截面平缀管式钢管混凝土格构柱的低周反复荷载试验,分析柱肢混凝土强度、柱肢纵向间距和缀管竖向间距等参数对构件滞回性能的影响规律,并结合有限元拓展参数分析结果,推导出平缀管式等截面钢管混凝土格构柱的水平荷载-位移骨架曲线特征值的简化计算公式。

笔者将借鉴上述等截面钢管混凝土格构柱的计算手段,以四川雅安干海子大桥的变截面平缀管式钢管混凝土格构墩为研究背景,对其开展抗震性能研究,分析构件的耗能能力、骨架曲线、结构延性、刚度退化等方面的受力性能和规律,并与等截面钢管混凝土格构柱进行对比研究,为其工程应用与推广提供参考和理论基础。

1 变截面钢管混凝土格构柱有限元计算方法

1.1 有限元计算方法

应用通用程序 OpenSEES,建立了变截面钢管混凝土格构柱有限元模型,进行四肢变截面平缀管式钢管混凝土格构柱抗震性能的数值分析。

有限元建模时采用纤维单元法,即钢管截面和管内混凝土截面划分为多个纤维单元。单元类型选取杆系模型中的非线性梁柱宏观单元,柱肢钢管、管内混凝土、缀管均采用 dispBeamColumn 梁柱单元模拟,端板则采用 elasticBeamColumn 单元模拟。

非线性材料本构关系采用一维的表达式。其中钢管本构关系采用文献[12]提出的 Giuffre-Menegotto-Pinto 双线性模型;对于管内核心混凝土,其材料本构关系选用文献[13]提出的钢管约束混凝土本构关系。杆件局部方向坐标,考虑 P-Delta 效应(二阶效应),以实现计及屈曲(长细比)对结构刚度的影响,考虑屈曲的弹塑性分析。

1.2 计算实例

以干海子大桥的四肢变截面钢管混凝土格构式桥墩为原型,缩尺比例为 1:8,制作了变截面钢管混凝土平缀管格构柱试件 BP-1,如图 1 所示。试件高 2.5 m,柱肢坡度 1:40。小头截面处面内柱肢间距为 0.5 m,大头截面处面内柱肢间距为 0.625 m,面外柱肢间距为 0.7 m。柱肢钢材弹性模量为 2.06×10^5 MPa,屈服强度为 345 MPa,极限抗拉强度为 444 MPa。缀管钢材弹性模量为 2.06×10^5 MPa,屈服强度为 374 MPa,极限抗拉强度为 488 MPa。C50 管内混凝土立方体抗压强度为 59.4 MPa,弹性模量为 34 500 MPa,轴压比为 0.15。以钢管混凝土四肢格构柱试件为计算实例,根据试件的几何尺寸建立有限元计算模型,其中柱肢钢管单元外径为 114 mm,钢管壁厚为 2 mm,缀管单元外径为 48 mm,钢管壁厚为 2 mm,混凝土单元外径为 110 mm。

变截面钢管混凝土格构柱柱底固结,采用位移控制模拟静力试验加载,在保证竖向轴力恒定的情况下,在柱顶施加反复水平位移。在试件屈服前,每级位移循环 1 次,在试件达到屈服后,以屈服位移的倍数进行反复加载,每级位移循环 3 次。



图 1 平级管式钢管混凝土格构柱拟静力试验 (BP-1)

Fig.1 Quasi-static testing of variable cross-sectional CFST laced columns with flat lacing tubes (BP-1)

1.3 计算结果比较

图 2 为 BP-1 试件的荷载-位移滞回曲线的有限元计算结果与试验结果比较。由图 2 可以看出, BP-1 试件滞回曲线的有限元计算结果与试验结果吻合较好, 曲线的饱满程度(捏缩程度)、弹性刚度、水平峰值荷载等骨架特征值的计算值较为接近, 说明采用文中建立的有限元模型, 能较准确模拟变截面平级管式钢管混凝土格构柱的滞回曲线。

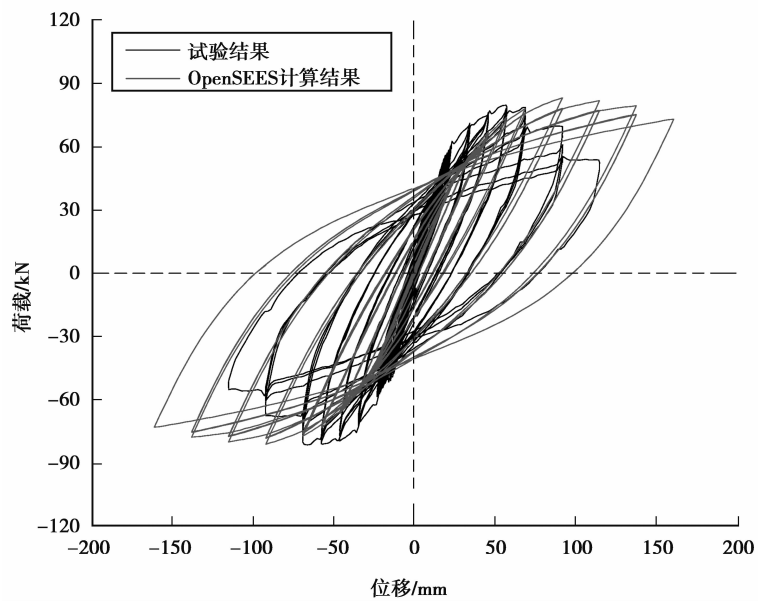


图 2 BP-1 试件滞回曲线比较图

Fig.2 Comparison of hysteresis loops (BP-1)

2 变截面平缀管式钢管混凝土格构柱抗震性能分析

2.1 变截面钢管混凝土格构柱计算对象

首批计算模型总数为 7 个,均为平缀管式钢管混凝土格构柱,包括 6 个变截面试件和 1 个等截面试件。计算参数为柱肢坡度,详见表 1。各计算模型柱高 2.5 m,小头截面尺寸均相同,面内柱肢间距 a 为 0.5 m,面外柱肢间距 c 为 0.7 m。大头截面处面内柱肢间距 b 依放坡确定,其余参数与 BP-1 试件相同,试件具体构造如图 3 所示。

表 1 变截面钢管混凝土格构柱计算试件参数一览表

Table.1 Parameter of specimens				
序号	试件编号	试件高度 l/m	柱肢坡度 $1:n$	λ
1	S-0	—	—	10.0
2	S-1	—	1:70	9.3
3	S-2	—	1:60	9.2
4	S-3	2.5	1:50	9.1
5	S-4	—	1:40	8.9
6	S-5	—	1:30	8.6
7	S-6	—	1:20	8.0

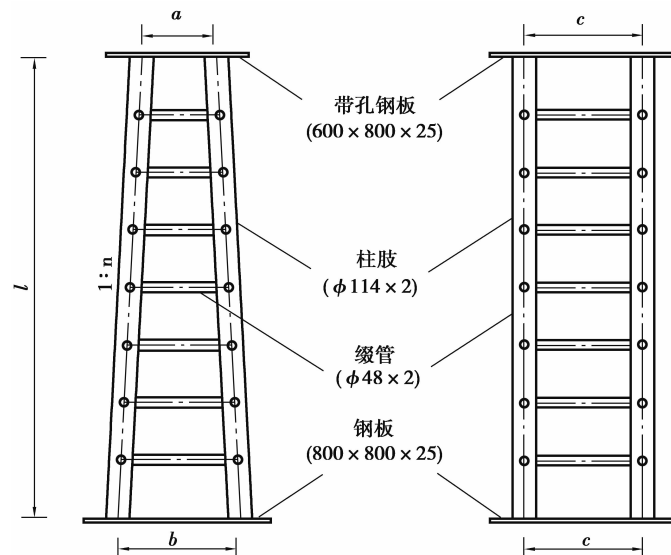


图 3 试件构造图(单位:mm)

Fig.3 Configuration of specimens

2.2 耗能能力

能量耗散能力是评价变截面平缀管式钢管混凝土格构柱抗震性能的重要依据之一,文中采用能力耗散系数 E 和等效粘滞阻尼系数 h_e 来衡量格构柱试件的耗能能力,滞回曲线计算如图 4 所示。

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (1)$$

$$h_e = \frac{1}{2\pi} E \tag{2}$$

取加载每一级最后一个滞回环面积,求得各试件在每一级循环位移下对应的能力耗散系数 E 和等效粘滞阻尼系数 h_e ,如表 2 所示。根据 h_e 随位移的变化情况,绘制各曲线对比,如图 5 所示。

表 2 构件的耗能能力指标计算值

Table.2 Calculation values of energy dissipation capacity index

试件	柱肢坡度 1:n	E	h_e
S-0	—	2.475	0.394
S-1	1:70	2.431	0.387
S-2	1:60	2.424	0.386
S-3	1:50	2.413	0.384
S-4	1:40	2.397	0.382
S-5	1:30	2.368	0.377
S-6	1:20	2.299	0.366

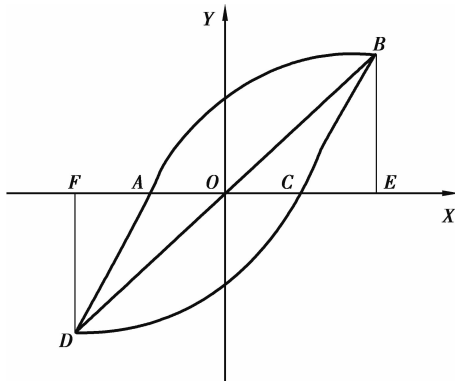


图 4 滞回曲线计算简图

Fig.4 Calculation diagram of the hysteresis curve

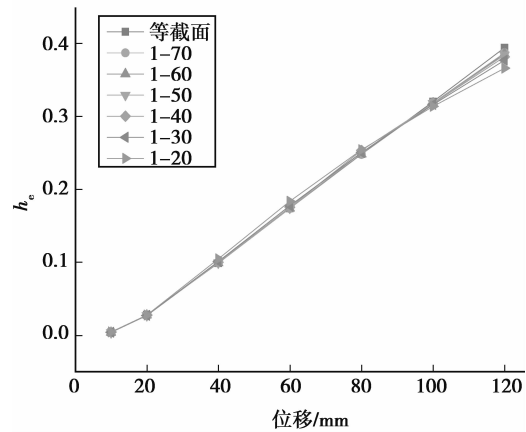


图 5 各构件的等效粘滞阻尼系数-位移曲线比较图

Fig.5 Comparison of h_e (equivalent viscous damping coefficient)

由图 5 可见,各构件曲线基本重合,表现出相近的规律:随着水平位移的逐级加载,格构柱能力耗散系数 E 和等效粘滞阻尼系数 h_e 数值逐渐增大,即滞回环愈加饱满,构件吸收更多能量,耗能能力逐渐增强。试件最后一级加载时, E 和 h_e 的平均值分别为 2.401 和 0.382,由此可知,变截面平级管式钢管混凝土格构柱具有良好的耗能能力及抗震性能。

对比图 5 各曲线以及表 2 数值可知,柱肢坡度对变截面钢管混凝土格构柱的耗能能力有一定影响。当柱肢坡度 1:n 由 1:70 增大到 1:20 时,试件最后一级加载对应的 E 和 h_e 值均降低了 5.4% 左右,即变截面平级管式钢管混凝土格构柱的耗能能力随着柱肢坡度的增大而逐渐降低。

2.3 骨架曲线

表 3 列出了有限元计算分析得到的各试件骨架曲线的特征值。其中, P_y 为屈服荷载; Δ_y 为屈服位移; P_{max} 为水平峰值荷载; P_u 为极限荷载; Δ_u 为极限位移; μ_u 为位移延性系数。从表 3 可以看出,变截面平级管式钢管混凝土格构柱的延性系数 μ_u 均大于 4,具有良好的延性性能。

表 3 构件的骨架曲线特征值列表

Table.3 Calculation results of characteristic value on skeleton curve

试件	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	P_u/kN	Δ_u/mm	μ_u
S-0	31.83	21.50	50.75	43.14	103.48	4.81
S-1	32.60	20.06	55.37	47.06	102.86	5.13
S-2	33.63	20.06	55.92	47.53	103.24	5.15
S-3	36.51	20.15	56.43	47.97	103.97	5.16
S-4	38.03	20.11	58.25	49.51	104.23	5.18
S-5	38.57	20.09	61.08	51.92	104.45	5.20
S-6	40.10	20.08	66.25	56.31	105.21	5.24

各构件低周反复荷载作用下骨架曲线如图 6 所示。与等截面钢管混凝土格构柱一样,变截面平缀管式钢管混凝土格构柱构件的骨架曲线也分为 3 个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。

图 6 比较了不同柱肢坡度对变截面平缀管式钢管混凝土格构柱骨架曲线的影响。结合表 3 可知,随着柱肢坡度的增大,构件的弹性刚度逐渐增大,峰值荷载从 50.75 kN 增加到 66.25 kN,提高了 31%;位移延性系数从 4.81 提高到 5.24,增加了 9%。

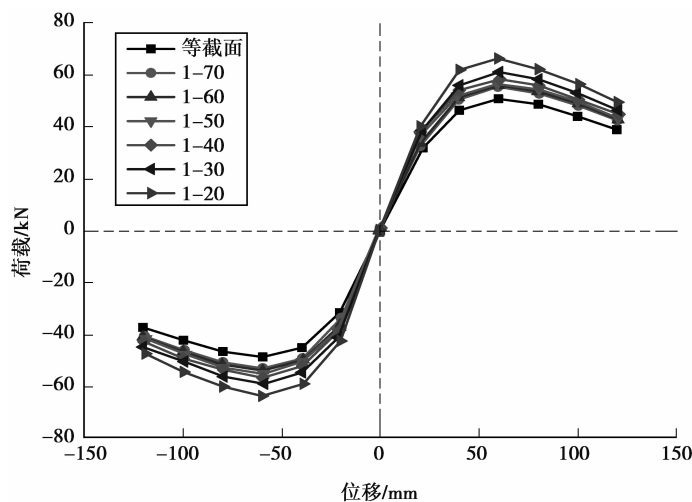


图 6 各构件的骨架曲线比较图

Fig.6 Comparison of skeleton curves

由此可见,在其他参数条件相同的情况下,变截面平缀管式钢管混凝土格构柱表现出比等截面钢管混凝土格构柱更优越的抗震性能,且柱肢坡度越大,变截面钢管混凝土格构柱的水平极限承载力越高,延性越好。

2.4 刚度退化

在低周反复荷载作用下,构件的刚度值逐渐减小的性能称为刚度退化。文中采用割线刚度 K_i 表示格构柱每半个周期的刚度值,各试件的刚度退化曲线如图 7 所示,刚度特性值计算结果如表 4 所示。

从图 7 可以看出,在加载初期格构柱的刚度退化均较明显,曲线下落速率较快;在加载后期构件的刚度退化趋于平缓,各曲线基本重合。结合图 7 和表 4 可知,柱肢坡度对变截面平缀管式钢管混凝土格构柱的刚度退化有一定影响:柱肢坡度越大,变截面格构柱的起始刚度越大,刚度下降曲线越陡,总的刚度退化率略有增加。

表 4 各构件的刚度特征值列表

Table4 Comparison of calculation results of stiffness

试件	起始刚度/ (kN·mm ⁻¹)	最终刚度/ (kN·mm ⁻¹)	刚度退化/ %
S-0	1.69	0.29	0.827
S-1	1.85	0.32	0.827
S-2	1.88	0.33	0.827
S-3	1.92	0.33	0.828
S-4	1.98	0.34	0.829
S-5	2.09	0.35	0.831
S-6	2.32	0.38	0.838

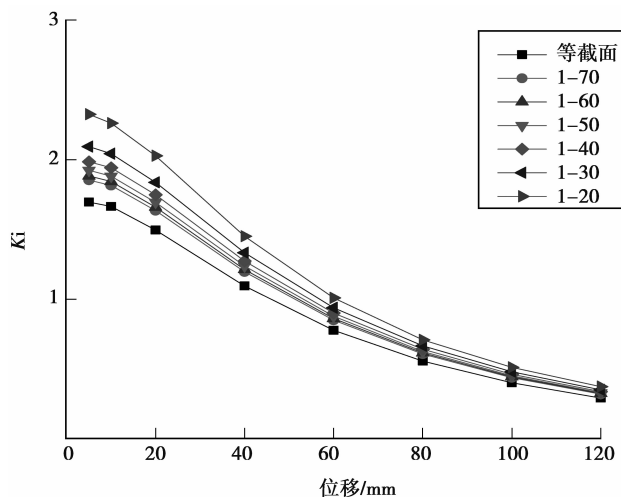


图 7 刚度退化曲线对比图

Fig.7 Comparison of stiffness degradation curves

3 拓展参数分析

为全面了解变截面平级管式钢管混凝土格构柱的抗震性能,以轴压比、试件高度、平级管竖向间距、支主管管径比、柱肢含钢率、混凝土强度、钢材屈服强度为拓展参数,对变截面平级管式钢管混凝土格构柱进行有限元参数分析。骨架曲线是直观体现钢管混凝土格构柱抗震性能的重要指标,反映了构件受力与变形的各个不同阶段及特性(强度、刚度、延性、耗能等),也是确定恢复力模型中特征点的重要依据。为节省篇幅,主要对不同参数条件下变截面平级管式钢管混凝土格构柱的骨架曲线进行比较。

3.1 轴压比

试件的轴压比(n)分别设为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5,其余参数均与标准模型 S-4(柱肢坡度为 1:40)相同。将不同轴压比下变截面格构柱的骨架曲线对比如图 8 所示,骨架曲线特征值如表 5 所示。

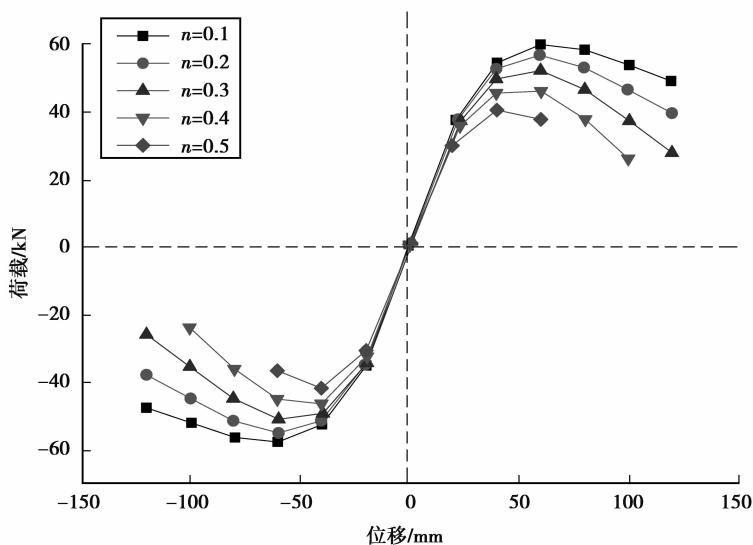


图 8 不同轴压比下骨架曲线对比图

Fig.8 Skeleton curves under different axial compression ratio

表 5 不同轴压比下骨架曲线主要参数对比表
Table.5 Comparison of main parameters of skeleton curves

n	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{\max}/kN	P_u/kN	Δ_u/mm	μ_u
0.1	37.60	21.22	60.01	51.01	111.63	5.26
0.2	37.84	22.29	56.87	48.34	94.45	4.24
0.3	37.40	23.42	52.33	44.48	85.17	3.64
0.4	35.91	23.12	46.22	39.29	76.20	3.30
0.5	30.09	19.50	40.62	34.53	63.23	3.24

由图 8 可以看出,试件进入弹塑性阶段后,曲线的偏差较大。结合表 5 数据可知,轴压比 n 从 0.1 增大到 0.5,试件的峰值荷载 P_{\max} 降低了 32.3%,极限位移 Δ_u 减小了 43.4%,位移延性系数 μ_u 降低了 38.4%。因此,轴压比是影响变截面平缀管式钢管混凝土格构柱抗震性能的关键参数。建议在工程实际应用中,轴压比取值不宜过大。

3.2 试件高度(长细比)

试件高度(l)分别设为 1.25、2.5、5、10、15 m,不同试件高度下变截面格构柱的骨架曲线对比如图 9 所示,骨架曲线特征值如表 6 所示。

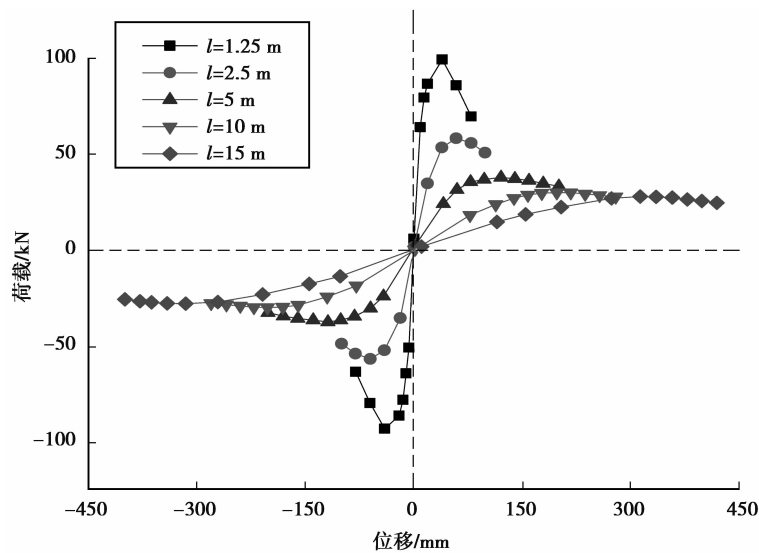


图 9 不同试件高度下骨架曲线对比图

Fig.9 Skeleton curves under different column height

表 6 不同试件高度下骨架曲线主要参数对比表
Table.6 Comparison of main parameters of skeleton curves

l/m	λ	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{\max}/kN	P_u/kN	Δ_u/mm	μ_u
1.25	4.7	64.07	9.60	99.32	84.42	61.24	6.38
2.50	8.9	38.03	20.11	58.25	49.51	104.23	5.18
5.00	16.0	24.24	41.58	37.96	32.27	203.53	4.89
10.00	26.7	18.28	78.23	30.07	25.56	314.89	4.03
15.00	34.3	14.77	115.70	28.04	23.83	435.56	3.76

由图 9 和表 6 可知,随着试件高度的增加(长细比 λ 从 4.7 增大到 34.3),骨架曲线的弹性刚度显著减小,峰值荷载降低了 71.8%,极限位移大幅增加,位移延性降低 41.1%。建议变截面平缀管式钢管混凝土格构柱长细比的适用范围在 9~16 之间,因为 $\lambda < 9$ 时,试件在达到水平峰值荷载后刚度值急剧下降,而 $\lambda > 16$ 时,试件的弹性刚度、承载力和位移延性均有较大幅度的降低。

3.3 平缀管竖向间距

试件的平缀管竖向间距(d)分别设为 0.125、0.25、0.375、0.5,不同缀管布置下格构柱的骨架曲线如图 10 所示,骨架曲线特征值如表 7 所示。

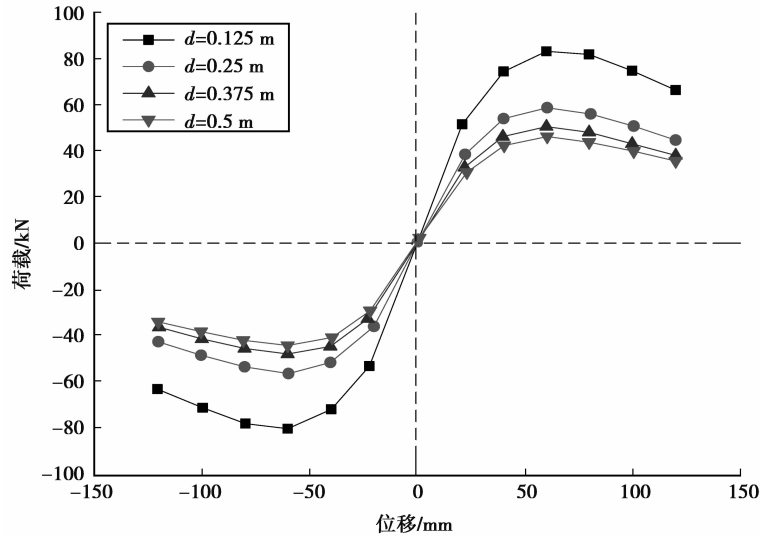


图 10 不同平缀管竖向间距下骨架曲线对比图

Fig.10 Skeleton curves under different vertical spacing of lacing tubes

表 7 不同平缀管竖向间距下骨架曲线主要参数对比表

Table.7 Comparison of main parameters of skeleton curves

d/m	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	P_u/kN	Δ_u/mm	μ_u
0.125	51.47	20.85	83.15	70.68	108.52	5.2
0.250	37.68	20.12	58.25	49.51	102.22	5.08
0.375	32.81	21.97	50.46	42.89	100.96	4.6
0.500	30.68	23.04	46.22	39.29	103.6	4.5

由图 10 和表 7 可知,随着平缀管竖向间距 d 从 0.125 m 增大到 0.5 m,试件的弹性刚度逐渐减小,其峰值荷载降低了 44.4%,位移延性系数降低了 13.5%。因此,为提高变截面格构柱的承载力和抗震性能,建议采用较小的平缀管布置间距。

3.4 支主管管径比

试件柱肢管径保持与标准试件 S-4 一致,改变平缀管管径,将支主管管径比(b)分别设为 0.2、0.4、0.6、0.8,变截面格构柱各试件的骨架曲线如图 11 所示,骨架曲线特征值如表 8 所示。

由图 11 和表 8 可知,随着支主管管径比从 0.2 增大到 0.8(平缀管管径逐渐增大),试件的弹性刚度逐渐增大,其峰值荷载 P_{max} 增加了 2.27 倍,位移延性系数 μ_u 增大了 51.3%。因此,为提高变截面平缀管式钢管混凝土格构柱的抗震性能,建议试件的支主管管径比 $b \geq 0.4$ 。

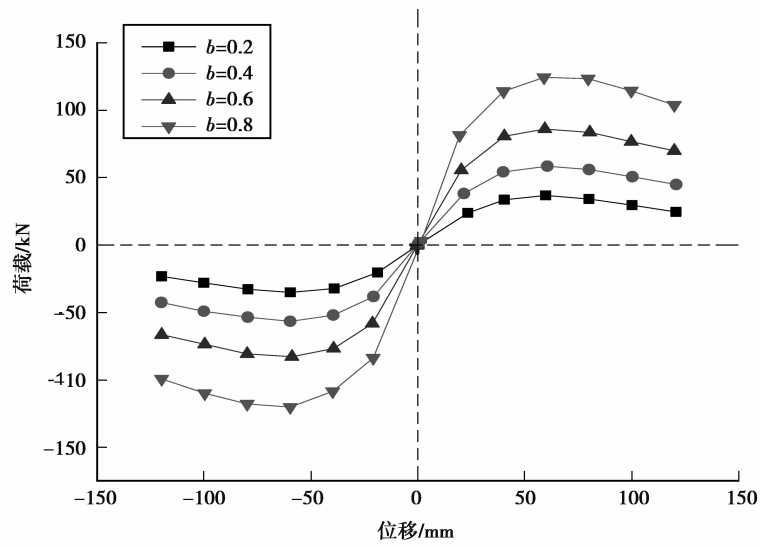


图 11 不同支主管管径比下骨架曲线对比图

Fig.11 Skeleton curves under different diameter ratio of tubes

表 8 不同支主管管径比下骨架曲线主要参数对比表

Table.8 Comparison of main parameters of skeleton curves

b	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	P_u/kN	Δ_u/mm	μ_u
0.2	23.66	23.33	36.79	31.27	91.87	3.94
0.4	38.03	20.11	58.25	49.51	104.23	5.18
0.6	55.41	20.27	85.90	73.02	109.2	5.39
0.8	81.31	19.47	124.1	105.5	116	5.96

3.5 柱肢含钢率

通过变化柱肢钢管的壁厚(管径不变)来分析柱肢含钢率(a)对变截面平缀管式钢管混凝土格构柱抗震性能的影响。不同含钢率下试件的骨架曲线如图 12 所示,骨架曲线特征值如表 9 所示。

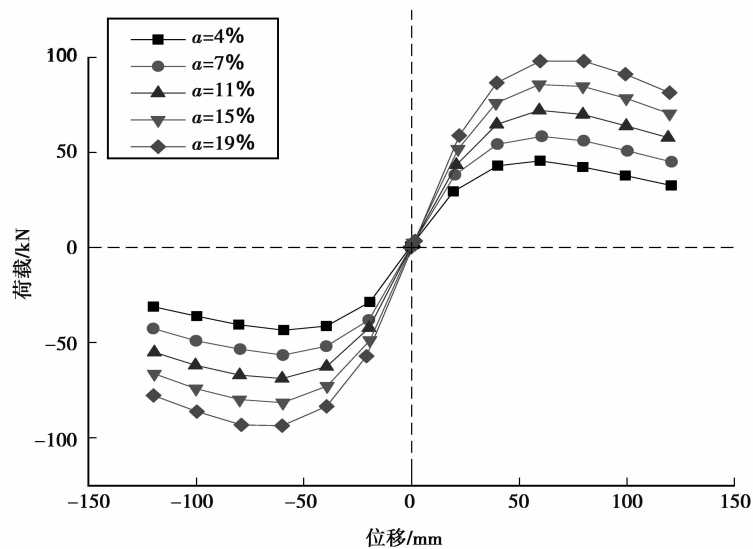


图 12 不同含钢率下骨架曲线对比图

Fig.12 Skeleton curves under different steel ratios

表 9 不同含钢率下骨架曲线主要参数对比表

Table.9 Comparison of main parameters of steel ratios

$a/\%$	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{\max}/kN	P_u/kN	Δ_u/mm	μ_u
4	29.18	19.46	45.38	38.57	96.23	4.95
7	38.03	20.11	58.25	49.51	104.23	5.18
11	43.12	20.85	71.80	61.03	109.13	5.23
15	51.68	21.56	85.36	72.55	114.53	5.31
19	58.56	22.09	97.68	83.03	117.86	5.34

由图 12 和表 9 可知,随着含钢率从 4%变化到 19%,试件的弹性刚度逐渐增大,峰值荷载增大 1.15 倍,延性系数提高了 7.9%。因此,增大柱肢含钢率可显著提高变截面平级管式钢管混凝土格构柱的水平承载力,而对于试件的延性性能影响较小。

3.6 材料参数

试件的材料参数主要考虑混凝土强度、柱肢钢材强度和缀管钢材强度。各参数下试件骨架曲线的对比,如图 13~图 15 所示。

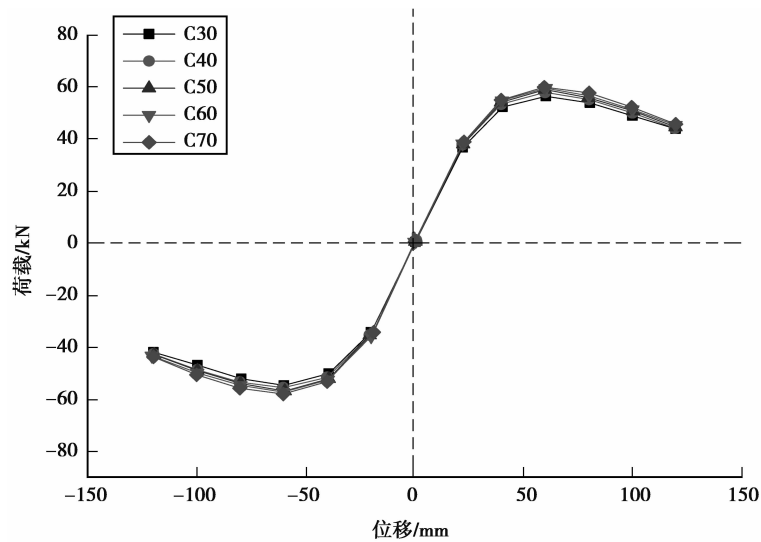


图 13 不同混凝土强度下骨架曲线对比图

Fig.13 Skeleton curves under different concrete strength

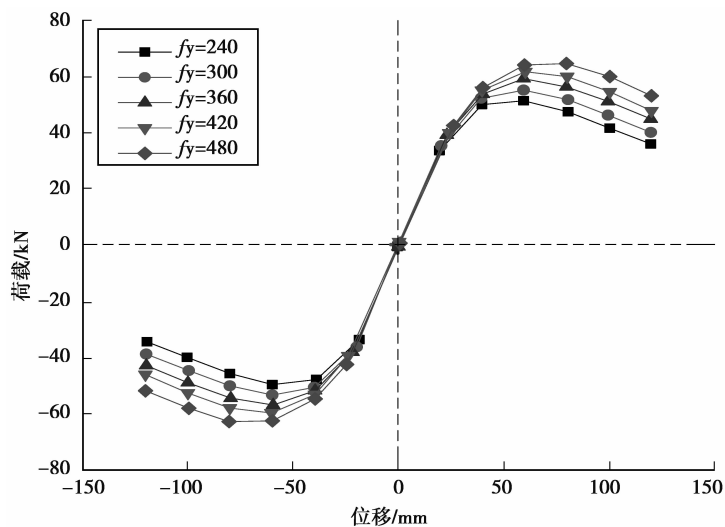


图 14 不同柱肢钢材屈服强度下骨架曲线对比图

Fig.14 Skeleton curves under different f_y of longitudinal element tube

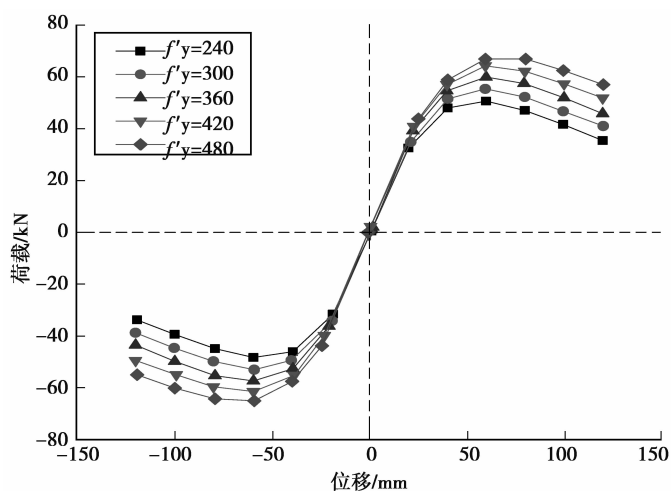


图 15 不同缀管钢材屈服强度下骨架曲线对比图

Fig.15 Skeleton curves under different f_y of lacing tube

由图 13 可以看出,混凝土强度对变截面平缀管式钢管混凝土格构柱的抗震性能基本无影响,分析其原因主要是由于混凝土自身强度增加有利影响与钢管套箍作用削减的不利影响接近相等。由图 14 和图 15 可见,柱肢和缀管钢材的屈服强度对骨架曲线有着相近的影响规律。随着钢材屈服强度从 240 kPa 增大到 480 kPa,2 组试件骨架曲线的峰值荷载分别增大了 25.7% 和 32.2%,延性系数均在 4.23~4.83 范围内变动,无明显规律。因此,在实际工程中,建议采用屈服强度较大的优质钢。

4 结 论

1) 根据有限元分析结果可知,变截面平缀管式钢管混凝土格构柱构件的滞回曲线饱满无捏缩,骨架曲线的下降段坡度较小,位移延性系数均大于 4,具有良好的耗能性能。

2) 与等截面钢管混凝土格构柱相比,变截面钢管混凝土格构柱的水平峰值荷载提高,延性改善,能量耗散能力增强,表现出更优越的抗震性能。

3) 随着柱肢坡度的增大,变截面平缀管式钢管混凝土格构柱的水平承载力逐渐提高,延性系数增大,耗能性能改善,刚度退化略有增加。

4) 拓展参数分析结果表明,轴压比是影响变截面平缀管式钢管混凝土格构柱抗震性能的关键参数;建议采用较小的平缀管竖向间距,变截面格构柱长细比 λ 的适用范围为 $9 < \lambda < 16$,支主管管径比 $b \geq 0.4$;混凝土强度对试件的抗震性能影响很小,柱肢含钢率和钢材屈服强度的增加可适当提高变截面格构柱的水平峰值荷载。

5) 研究结果主要适用于变截面平缀管式钢管混凝土格构式桥墩,大跨度钢管混凝土拱桥中的变截面桁式拱肋以及工业厂房中的变截面钢管混凝土格构柱的抗震性能还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] Zhijing O. The Practice of Concrete Filled Steel Tube Piers to Bridges; A review [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405-408; 1602-1604.
- [2] 臧华, 刘钊. 钢管混凝土桥墩的应用与研究[J]. 中国工程科学, 2007, 9(7): 71-75.
ZANG Hua, LIU Zhao. Application and research on concrete-filled steel bridge piers[J]. Engineering Science, 2007, 9(7): 71-75. (in Chinese).
- [3] 陈盛富, 欧智菁. 钢管混凝土格构柱墩抗震性能研究综述[J]. 福建建筑, 2016, 199(2): 48-52.
CHEN Shengfu, OU Zhijing. The research summary of seismic performance on concrete filled steel tubular laced columns [J]. Fujian Architecture & Construction, 2016, 199(2): 48-52. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国住建部. 钢管混凝土拱桥技术规范: GB 50923-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures;GB 50923-2013[S].Beijing: China Planing Press, 2013.(in Chinese)
- [5] 中国工程建设标准化协会.钢管混凝土结构设计及施工规程:CECS 28:2012[S].北京:中国计划出版社,2012.
China Association for Engineering Construction Standardization. Specification for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures;CECS 28:2012[S].Beijing: China Planing Press, 2012. (in Chinese)
- [6] Zhijing O,Lei H,Qiaoling Y.Research on calculation method of the stability factor of variable cross-sectional concrete filled steel tubular laced columns[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(5):1420-1423.
- [7] 黄蕾.变截面钢管混凝土格构柱极限承载力研究[D].福州:福州大学,2015.
HUANG Lei. Research on ultimate load-carrying capacity of concrete filled steel tubular battened columns with variable cross-section[D].Fuzhou ;Fuzhou University,2015. (in Chinese)
- [8] 欧智菁,晏巧玲,薛建阳,等.变截面钢管混凝土格构柱轴压极限承载力研究[J].重庆大学学报,2016,39(5):114-120.
OU Zhijing, YAN Qiaoling, XUE Jianyang, et al. The ultimate load carring capacity of variable cross-sectional concrete filled steel tubular laced columns on axial load[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(5): 114-120. (in Chinese)
- [9] 邓萱奕.钢管混凝土格构柱抗震性能试验研究[D].长沙:中南大学硕士学位论文,2012.
DENG Xuanyi. Study on the seismic performance of concrete filled steel tubular lattice column [D]. Changsha;Central South University, 2012.(in Chinese)
- [10] 罗瑶.四肢钢管混凝土格构柱抗震性能试验研究[D].长沙:中南大学硕士学位论文,2013.
LUO Yao. Studies on the seismic performance of four-tube concrete filled steel tubular laced columns[D]. Changsha; Central South University, 2013.(in Chinese)
- [11] 吕银花.平缀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 Yinhua.Studies on hysteretic behavior of uniform section concrete filled steel tubular laced columns with flat lacing tube[D]. Fuzhou ;Fuzhou University, 2015.(in Chinese)
- [12] Menegotto M,Pinto P E.Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames Including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]. Proceedings, IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structural Acted on by Well-Defined Repeated Loads,Lisbon, 1973;15-22.
- [13] 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. The concrete filled steel tubular structures from theory to practice [M]. Beijing; Science Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住建部.建筑抗震试验规程:JGJ/T 101-2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings;JGJ/T 101-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)