

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202202006



环向均匀脱空对圆钢管超高强混凝土柱 偏压受力性能的影响

邓杨鹏¹, 胡红松^{1,2}, 梅真^{1,2}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为研究环向均匀脱空对圆钢管超高强混凝土柱偏压受力性能的影响,通过环向均匀脱空圆钢管超高强混凝土柱的偏压试验,研究环向均匀脱空圆钢管超高强混凝土柱的承载能力、延性和破坏模式.结果表明:随着偏心率的减小,钢管局部屈曲的发生时刻提前,试件的延性减小;环向均匀脱空试件的初始刚度与无脱空试件的初始刚度基本相同;混凝土压溃位置与钢管局部屈曲位置基本一致,压溃程度随偏心率的减小而增大,与无脱空试件相比,环向均匀脱空试件的混凝土破碎更加严重;偏压试件的受拉裂缝近似沿中截面对称分布,裂缝长度和宽度随偏心率的减小而减小;无脱空和环向均匀脱空对圆钢管超高强混凝土柱承载力计算公式与实测结果吻合良好.

关键词: 圆钢管混凝土柱; 超高强混凝土; 环向均匀脱空; 偏压试验; 极限承载力

中图分类号: TU 398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)05-0579-08

Effect of Circumferential Uniform Gap on Eccentric Compressive Behavior of Circular Concrete-Filled Steel Ultra-High-Strength Tube Columns

DENG Yangpeng¹, HU Hongsong^{1,2}, MEI Zhen^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to investigate the effect of circumferential uniform gap on the eccentric compression behavior of circular ultra-high-strength concrete-filled steel tube columns, through the eccentric compression test of circular ultra-high-strength concrete-filled steel tube columns with circumferential uniform gap, the bearing capacity, ductility and failure mode of circular ultra-high-strength concrete-filled steel tube columns with circumferential uniform gap are studied. The results show that, as the eccentricity ratios decrease, the happening time of local buckling of the steel tube is advanced, and the ductility of the specimen decreases. The initial stiffness of the specimens with circumferential uniform gap is basically the same as that of the specimens without gap. The crushing regions of concrete are basically consistent with the local buckling regions of steel tube, and the degree of crushing increases with the decrease of the eccentricity ratio; compared with the specimens

without gap, the concrete of the specimens with circumferential uniform gap is more seriously broken. Tensile cracks of the specimens under eccentric compression are distributed symmetrically along the middle section, and the crack length and width decrease with the decrease of the eccentricity ratio. The results of formula calculating the bearing capacity of circular ultra-high-strength concrete-filled steel tube columns without gap and with circumferential uniform gap agree well with the measured results.

Keywords: circular concrete-filled steel tube column; ultra-high-strength concrete; circumferential uniform gap; eccentric compression test; ultimate bearing capacity

钢管混凝土柱具有承载力高、抗震性能好、易于施工等优点,在超高层建筑中得到广泛应用.随着建筑高度的增加,试件的截面尺寸明显增大,降低了建筑的有效使用面积,同时,也增加了结构自质量和地震荷载.采用超高强混凝土(轴心抗压强度不小于 85.0 MPa 的混凝土,对应立方体抗压强度的下限约为 100.0 MPa)是减小试件截面尺寸的有效手段,但超高强混凝土的脆性较大,需要为其提供足够约束来满足变形能力的要求.相比其他截面形状的钢管,圆钢管能更有效地约束管内混凝土,因此,超高强混凝土更适宜在圆钢管混凝土柱中应用.文献[1-2]分别对圆钢管混凝土柱的轴压和压弯受力性能开展系统研究,采用的混凝土轴心抗压强度最高为 85.1 MPa.文献[3-15]充分证明了圆钢管超高强混凝土柱具有良好的力学性能.

由于混凝土的收缩、温差或施工不当,实际工程中的圆钢管超高强混凝土柱可能会存在环向均匀脱空缺陷^[11].环向均匀脱空缺陷示意图,如图 1 所示.图 1 中: d_c 为脱空厚度.李永进等^[12]对环向均匀脱空圆钢管混凝土柱进行了轴压试验研究,采用的荷载为长期荷载.文献[13-15]对环向均匀脱空圆钢管混凝土柱进行了轴压和偏压试验研究,这些试验的混凝土均含有粗骨料,混凝土轴心抗压强度均低于 85.0 MPa,主要变化参数脱空率、偏心率(除轴压外)不作为主要试验研究参数.

到目前为止,环向均匀脱空圆钢管超高强混凝土柱的偏压试验未见报道.此外,也没有考虑环向均匀脱空缺陷对圆钢管混凝土柱极限承载力影响的相关规范.为了填补这一试验研究空白,本文对环向均匀脱空圆钢管超高强混凝土柱开展了偏压试验研究.

1 试验方案

1.1 试件设计

设计的 8 个试件钢管均为无缝管,钢管长度为钢管直径的 3 倍,钢管上、下端焊接有端板,端板上的浇筑孔直径均设为 120 mm.试件共有 4 种偏心率 e/D (e 为偏心距, D 为钢管直径),分别为 0, 0.2, 0.4 和 0.6.偏心率为 0 的试件为轴压试件,轴压试件的端板尺寸(长×宽×高)为 267 mm×267 mm×30 mm;偏心率不为 0 的试件为偏压试件,偏压试件端板尺寸(长×宽×高)为 320 mm×190 mm×30 mm,端板上设有螺栓孔,用于与刀铰连接.由于刀铰处的轴力导致应力集中产生在偏压试件端部,为了消除应力集中带来的影响,在偏压试件的钢管两端 100 mm 范围内设置了相同厚度的套管.每种偏心率含有 1 个无脱空试件和 1 个环向均匀脱空试件.

环向均匀脱空试件构造,如图 2 所示.与无脱空试件相比,环向均匀脱空试件构造除了有用模拟缺陷的乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)泡膜外,两种试件的构造保持一致.

试件参数,如表 1 所示.表 1 中: χ 为脱空率; f_{c0} 为混凝土轴心抗压强度;试件编号的第 1 个数值代表径厚比(D/t , t 为钢管厚度),第 2 个数值代表偏心率,字母 G 代表环向均匀脱空缺陷.所有试件的直径 D 为 219 mm,径厚比 D/t 为 27,钢管屈服强度 f_y 为 359 MPa,套箍指标 θ 为 0.54^[16], θ 表达式为

$$\theta=\frac{f_yA_s}{f_{c0}A_c}.$$

上式中: A_s 和 A_c 分别为钢管和混凝土的截面积.

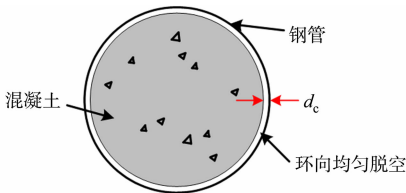
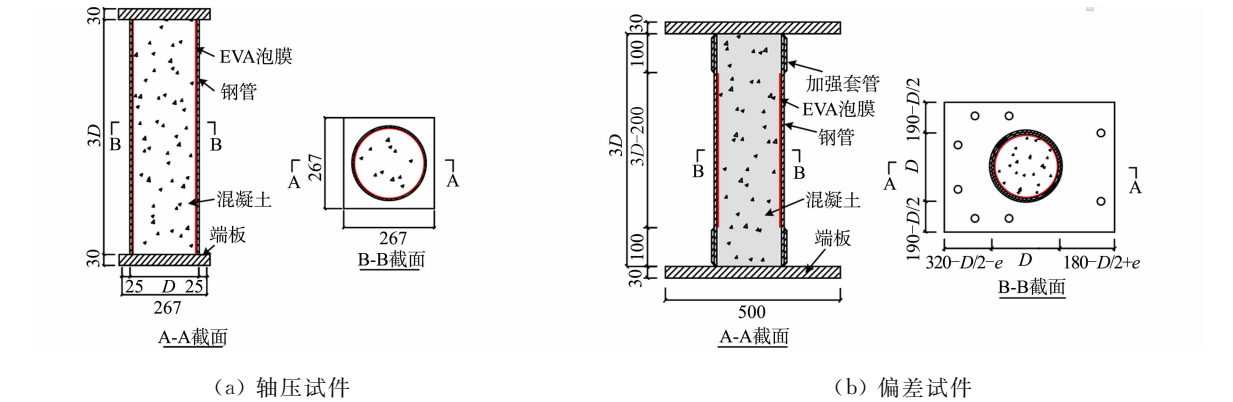


图 1 环向均匀脱空缺陷示意图
Fig.1 Schematic diagram of circumferential uniform gap



(a) 轴压试件 (b) 偏差试件

图 2 环向均匀脱空试件构造(单位:mm)

Fig. 2 Structure of the specimens with circumferential uniform gap (unit: mm)

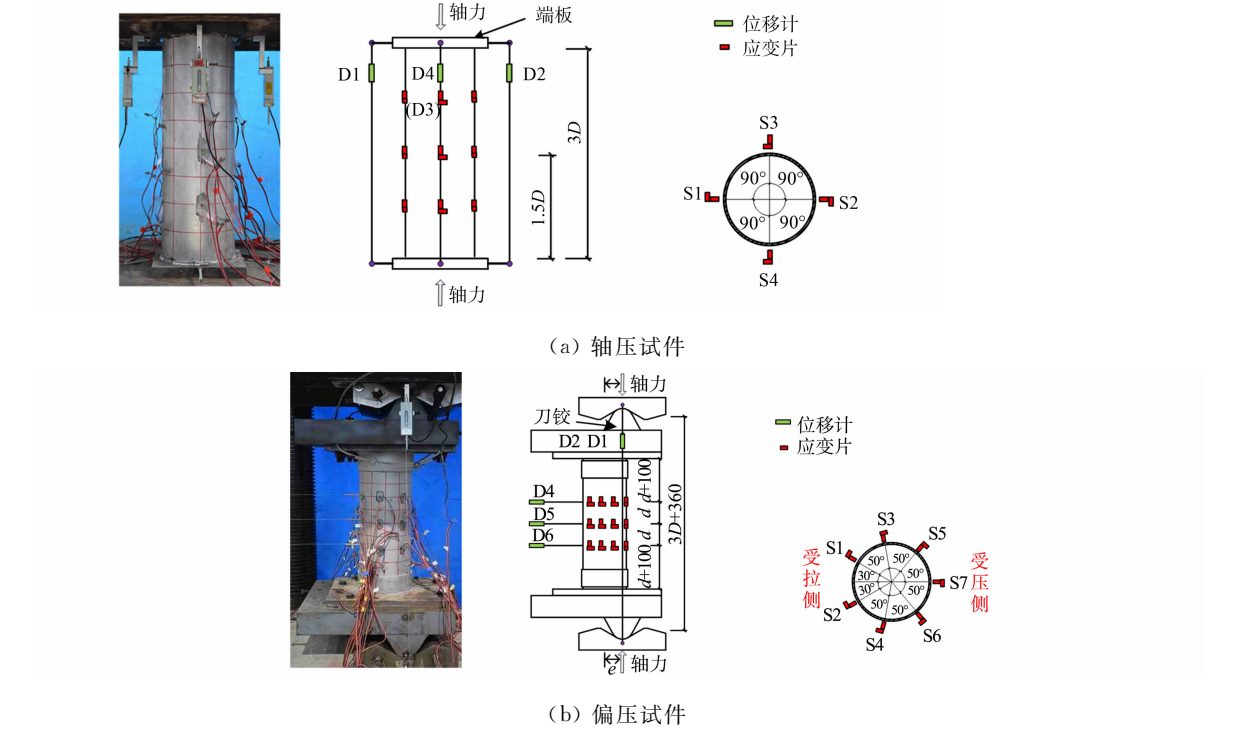
表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of the specimens

试件编号	e/mm	e/D	d_c	$\chi/\%$	f_{c0}/MPa	试件编号	e/mm	e/D	d_c	$\chi/\%$	f_{c0}/MPa
CC-27-0	0	0	0	0	109	CC-27-0-G	0	0	0.5	0.5	114
CC-27-0.2	44	0.20	0	0	109	CC-27-0.2-G	44	0.20	0.5	0.5	114
CC-27-0.4	88	0.40	0	0	109	CC-27-0.4-G	88	0.40	0.5	0.5	114
CC-27-0.6	132	0.60	0	0	109	CC-27-0.6-G	132	0.60	0.5	0.5	114

1.2 加载方案和量测方案

加载方案和量测方案,如图 3 所示.图 3 中:D1~D6 为位移计;S1~S7 为应变片; d 为同列相邻量测截面的轴向应变片间距, $d=3D/4-50$.



(a) 轴压试件 (b) 偏压试件

图 3 加载方案和量测方案

Fig. 3 Loading schemes and measurement schemes

试验在 10 MN 轴压试验机下进行,整个加载过程采用位移控制,加载速率为 $0.02\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,当试件轴向承载力下降到峰值承载力的 50% 以下或试件中部的水平位移超过 40 mm 时,终止试验.对于轴压试件,分别将 4 个竖向位移计设置在端板的 4 个侧面,用于量测加载点之间的相对竖向位移 δ_v ;在试件半高界面处,沿钢管环向布置 4 对轴向和环向应变片.对于偏压试件,其偏心荷载通过刀铰装置施加;

分别将 2 个竖向位移计设置在端板前后两个侧面,用于量测加载点之间的相对竖向位移;分别将 3 个水平位移计设置在试件半高处和钢管未加强段 4 分点处,用于量测水平位移 δ_h ;在每个量测水平位移的截面,沿钢管环向布置了 7 对轴向和环向应变片。

2 试验结果与分析

2.1 荷载-位移曲线和破坏过程

试件的轴力-竖向位移曲线,如图 4 所示。图 4 中: N 为轴力。由图 4 可得出以下 4 点结论。

- 1) 所有试件的钢管初始屈服都发生在峰值承载力(N_m , 试件第一次达到峰值时的承载力)之前,偏压试件的钢管受压侧先于钢管受拉侧屈服。
- 2) 对于无脱空试件,在轴力即将达到峰值承载力时,所有试件开始出现混凝土压溃声。在承载力下降阶段,轴压试件的钢管和偏压试件的未加强段钢管开始出现局部屈曲,屈曲发生时刻随着偏心率的增大而延后。随着竖向位移的增加,屈曲程度不断增加,轴压试件在轴力迅速下降后将基本保持不变,偏压试件的轴力将持续下降。
- 3) 对于环向均匀脱空试件,在达到峰值承载力后,所有试件的轴力迅速下降,下降速度随着偏心率的减小而增大。轴力的迅速下降说明当脱空率为 0.5% 的试件达到峰值承载力时,钢管对混凝土的约束作用很小,继续增加竖向位移,钢管对混凝土的约束作用明显增加,试件轴力随着竖向位移的增大而再次增大,当试件轴力增大到第 2 个峰值承载力后,试件轴力会再次下降,下降速度随偏心率的减小而增大。
- 4) 与无脱空试件相比,环向均匀脱空试件更早达到峰值承载力,两者的初始刚度基本保持一致。

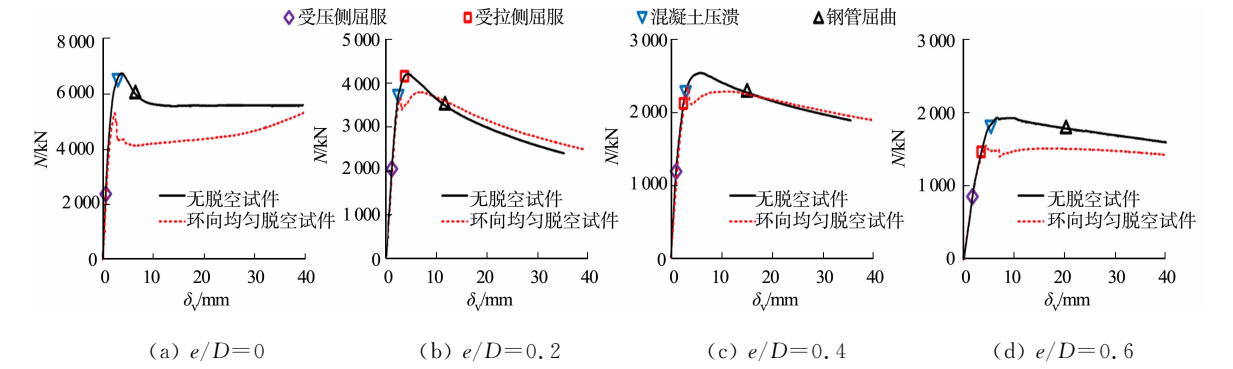


图 4 试件的轴力-竖向位移曲线
Fig. 4 Axial load-versus vertical displacement curves of specimens

以偏压试件的量测截面中应变发展最快的截面为控制截面,试件控制截面的轴力-水平位移曲线,如图 5 所示。

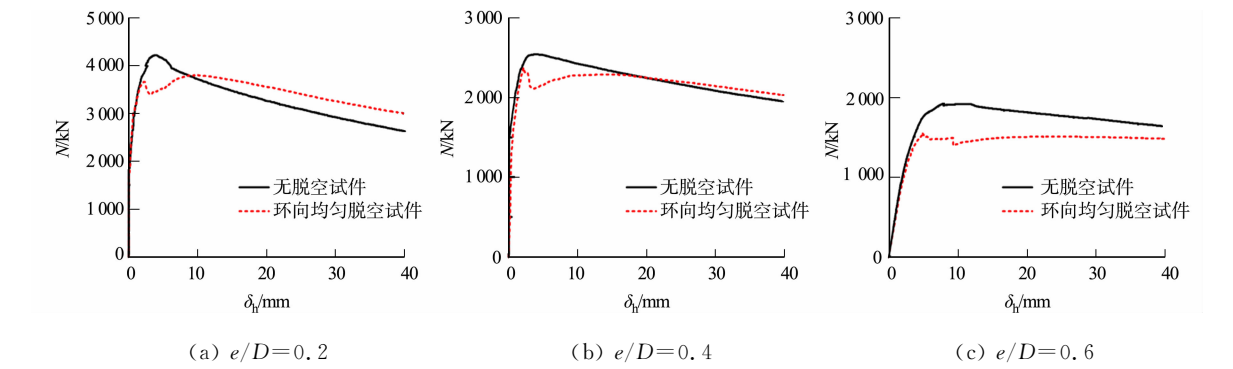


图 5 试件控制截面的轴力-水平位移曲线

Fig. 5 Axial load-horizontal displacement curves of specimen control sections

由图 5 可知:在轴力增大至约 $2/3N_m$ 前,所有试件水平位移发展速度相对缓慢,随后,试件水平位移发展速度持续加快,随偏心率的增大而增大;相较于无脱空试件,环向均匀脱空试件的水平位移发展速度较快,但在达到峰值承载力前,两者的水平位移发展速度相差不大;与竖向位移相比,在试件达到峰

值承载力前,水平位移发展速度相对缓慢,随后,水平位移发展速度相对较快。

试件控制截面的弯矩-竖向位移曲线,如图 6 所示。图 6 中: M 为弯矩, $M=N(e+\Delta)$, Δ 为控制截面的水平位移。

由图 6 可知:对于无脱空试件,轴力的下降没有使弯矩下降,而是减小了弯矩增大速度;对于环向均匀脱空试件,在轴力快速下降阶段,弯矩也呈下降趋势,但在轴力缓慢下降阶段,弯矩呈上升趋势,且上升速度比无脱空试件更快;相较于无脱空试件,在环向均匀脱空试件达到弯矩承载力前,两者的抗弯刚度基本保持一致。

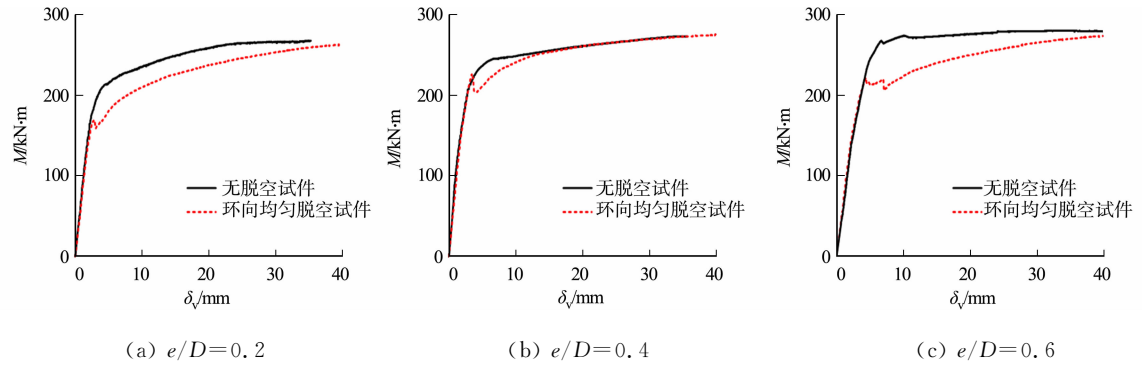


图 6 试件控制截面的弯矩-竖向位移曲线

Fig. 6 Bending moment-vertical displacement curves of specimens control section

试件的最终破坏形态,如图 7 所示。由图 7 可得出以下 4 点结论。

- 1) 混凝土压溃位置与钢管局部屈曲位置基本一致,压溃程度随偏心率的减小而增大。
- 2) 对于无脱空轴压试件,混凝土的破坏区域为一条明显的斜裂缝,该斜裂缝将混凝土剪切成两半,形成一个剪切面,该剪切面与外钢管屈曲位置形成的剪切面保持一致,与文献[17]得到的结论一致。
- 3) 对于环向均匀脱空轴压试件,混凝土破坏区域形成的剪切面不明显。对于偏压试件,混凝土压碎主要集中在中截面附近;受拉侧的裂缝也主要分布于中截面,并近似沿中截面对称,随着偏心率的增大,裂缝长度和宽度逐渐增大,这是由于偏心率的提升导致受拉侧钢管轴向变形增大,开裂更严重。
- 4) 相较于无脱空试件,由于环向均匀脱空试件钢管对混凝土的约束相对减小,所以环向均匀脱空试件的混凝土破碎更加严重。对于偏心率为 0.2 的无脱空偏压试件,受拉区钢管断裂是由于试验结束后的过度加载。

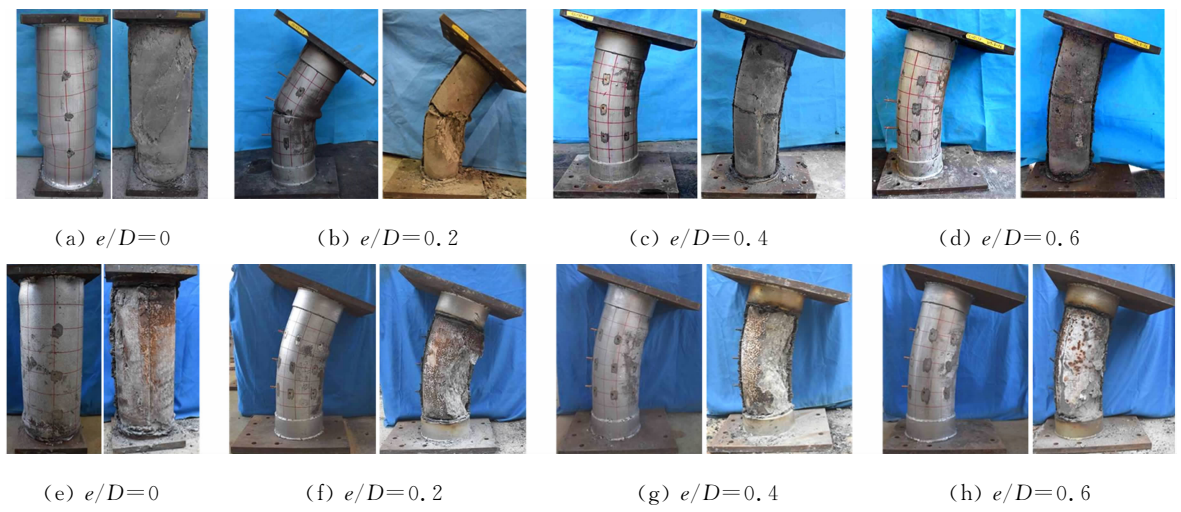


图 7 试件的最终破坏形态

Fig. 7 Final failure modes of specimens

2.2 承载力和延性

基于轴力-屈服位移(δ_y)曲线确定的主要试验结果,如表 2 所示。表 2 中:屈服位移定义为曲线上升段 $0.75N_m$ 对应的竖向位移的 $4/3$ 倍,极限位移 δ_u 定义为承载力下降到 $0.85N_m$ 时的竖向位移; δ_m 为

峰值承载力对应的竖向位移; μ 为延性; M_{cm} 为 N_m 对应的试件控制界面弯矩值. 由表 2 可知:随着偏心率的增大,试件峰值承载力降低,延性增大;与无脱空轴压试件相比,环向均匀脱空轴压试件的延性更差;与无脱空偏压试件相比,环向均匀脱空偏压试件的延性更好.

表 2 主要试验结果
Tab. 2 Primary test results

试件编号	$N_m /$ kN	$\delta_y /$ mm	$\delta_m /$ mm	$\delta_u /$ mm	μ	$M_{cm} /$ kN · m	试件编号	$N_m /$ kN	$\delta_y /$ mm	$\delta_m /$ mm	$\delta_u /$ mm	μ	$M_{cm} /$ kN · m
CC-27-0	6 751	1.96	3.65	8.25	4.21	—	CC-27-0-G	5 317	1.69	2.26	2.75	1.63	—
CC-27-0.2	4 214	2.43	4.30	10.62	4.37	212	CC-27-0.2-G	3 799	2.22	2.82	20.99	9.45	171
CC-27-0.4	2 541	2.81	5.88	20.01	7.12	244	CC-27-0.4-G	2 375	2.78	3.41	30.66	11.03	215
CC-27-0.6	1 922	4.66	6.68	35.14	7.54	266	CC-27-0.6-G	1 552	3.54	4.46	—	—	209

2.3 钢管应变发展过程

两个典型试件的环向-轴向应变曲线,如图 8 所示. 图 8 中: ϵ_{sh} 为环向应变; ϵ_{ah} 为轴向应变;应变片 S1 和 S7 分别位于受拉和受压边缘区域,应变较大,能更多地反映应变发展过程,所以对应变片 S1 和 S7 的数据进行分析. 由图 8 可得出以下 2 点结论.

- 1) 对于无脱空试件,在加载初期,钢管受压侧一点的环向-轴向应变曲线的切线斜率绝对值 $|r_e|$ 保持恒定,当该点接近屈服时,切线斜率绝对值开始逐步增大,当轴向应变达到一定值后,切线斜率的绝对值不再增大,环向-轴向应变曲线近似为直线. 钢管受拉侧一点的环向-轴向应变曲线的切线斜率绝对值 $|r_e|$ 也经历恒定、逐步变化和恒定 3 个阶段. 与受压侧不同的是,切线斜率绝对值在第 2 阶段是逐步减小的. 部分试件的切线斜率绝对值在轴向应变很小时(远未屈服)就开始逐步减小了.
- 2) 与无脱空试件相比,环向均匀脱空试件的环向-轴向应变曲线的发展情况与上述情况基本一致,但由于环向均匀脱空试件存在轴力快速下降的情况,所以曲线斜率在屈服之后还可能会出现突变.

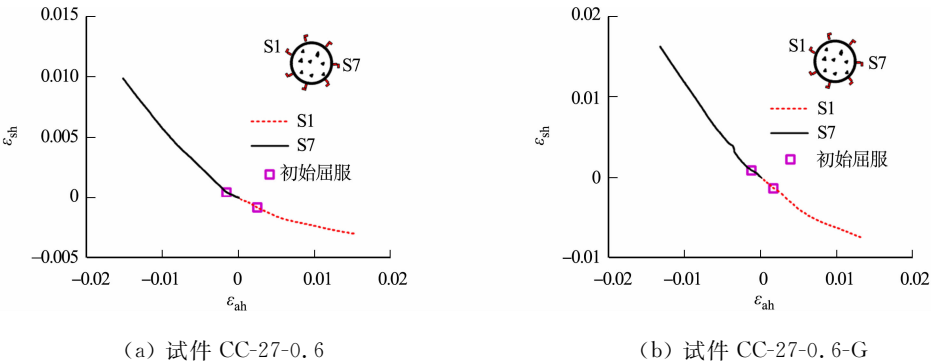


图 8 两个典型试件的环向-轴向应变曲线
Fig. 8 Circumferential-axial strain curves of two typical specimens

3 极限承载力分析

3.1 无脱空圆钢管超高强混凝土柱

从我国工程角度出发,仅对 JGJ 138—2016《组合结构设计规范》^[14] 中圆钢管混凝土柱极限承载力计算方法进行分析. 由于钢管混凝土柱的 e/r_c (r_c 为混凝土横截面的半径) 不大于 1.55, 所以无脱空试件的承载力计算式为

$$N_c = \begin{cases} \varphi_e f_{c0} A_c (1 + \alpha \theta), & \theta \leq [\theta], \\ \varphi_e f_{c0} A_c (1 + \sqrt{\theta} + \theta), & \theta > [\theta]. \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中: N_c 为无脱空试件极限承载力计算值; α 为与混凝土强度等级有关的系数, $[\theta]$ 为与混凝土强度等级有关的套箍指标界限值.

当偏心率为 0 时, φ_e 为考虑偏心率影响的系数,其计算公式为

$$\varphi_e = (1 + 1.85e/r_c)^{-1}.$$

当偏心率为 0 时, φ_e 为 1,式(1)将退化为轴压试件的极限承载力计算公式. 由于规范中最高的混凝土

土强度低于文中混凝土强度,所以无法通过规范对参数 α 进行取值.为了扩大规范的极限承载力计算公式的适用范围,基于式(1),通过 Matlab 软件对试件承载力进行拟合,以获得参数 α 的适宜取值(针对混凝土轴心抗压强度为 109 MPa 的无脱空圆钢管混凝土柱).

参数 α 的适宜取值为 1.76,试件极限承载力计算结果和试验结果的对比,如图 9 所示.由图 9 可知:拟合结果和试验结果吻合良好.因此,当参数 α 为 1.76 时,规范公式可用于计算混凝土强度约为 109 MPa 的圆钢管混凝土柱轴压和偏压极限承载力.

3.2 环向均匀脱空圆钢管超高强混凝土柱

由于规范中没有环向均匀脱空圆钢管混凝土柱极限承载力计算公式,环向均匀脱空试件与无脱空试件的极限承载力计算原理实质上是一样的,所以,环向均匀脱空试件的极限承载力计算公式依然可采用式(1).与无脱空试件相比,环向均匀脱空试件的极限承载力受偏心率的影响不同,当环向均匀脱空试件达到极限承载力时,钢管对混凝土的约束力更小,所以,与偏心率和钢管对混凝土约束力有关的公式参数与式(1)不同.由此得到环向均匀脱空圆钢管混凝土柱试件极限承载力计算式为

$$N_G = \varphi_G f_{co} A_c (1 + \alpha_G \theta).$$

上式中: N_G 为环向均匀脱空试件极限承载力计算值; α_G 为与钢管对混凝土约束程度相关的系数, $\varphi_G = (1 + ce/r_c)^{-1}$, c 为考虑偏心率影响的系数.

规范没有考虑参数 α 对参数 φ_e 的影响,因此文中也不考虑参数 α_G 对参数 φ_G 的影响,即不考虑参数 α_G 对参数 c 的影响,将参数 α_G 和 c 作为两个独立的参数进行拟合.为了获得系数 α_G (α_G 不小于 1)和 c ,通过 Matlab 对环向均匀脱空试件的极限承载力试验值进行拟合,由此得到 α_G 为 1, c 为 1.54.试件极限承载力计算结果与试验结果的对比,如图 10 所示.

由图 10 可知:公式计算结果与试验结果吻合良好.因此,对于脱空率为 0.5% 的圆钢管混凝土柱,在达到构件极限承载力时,钢管对混凝土基本没有约束作用;当参数 α_G 为 1, c 为 1.54 时,规范公式可用于计算混凝土强度约为 114 MPa 的圆钢管混凝土柱轴压和偏压极限承载力.

4 结论

- 1) 随着偏心率的减小,钢管局部屈曲发生时刻提前,试件的延性减小.在达到峰值承载力前,无脱空试件与环向均匀脱空试件的初始刚度基本保持一致.
- 2) 在轴力增大至约峰值承载力的 2/3 前,试件的水平位移发展速度相对缓慢,随后,试件水平位移发展速度持续加快,并随偏心率的增大而增大.与无脱空试件相比,环向均匀脱空试件的水平位移发展速度相对较快.
- 3) 混凝土压溃位置与钢管局部屈曲位置基本一致,压溃程度随偏心率的减小而增大.偏压试件的受拉裂缝近似沿中截面对称分布,裂缝长度和宽度随偏心率的减小而减小.与无脱空试件相比,环向均匀脱空试件的混凝土破碎更加严重.
- 4) 钢管受压侧和受拉侧边缘的环向应变-轴向应变曲线的切线斜率绝对值会经历恒定、逐步变化和恒定 3 个阶段,逐步变化的开始时刻与钢管初始屈服时刻基本一致.
- 5) 对于脱空率为 0.5% 的试件,在达到峰值承载力时,钢管对混凝土基本没有约束作用,建议的无

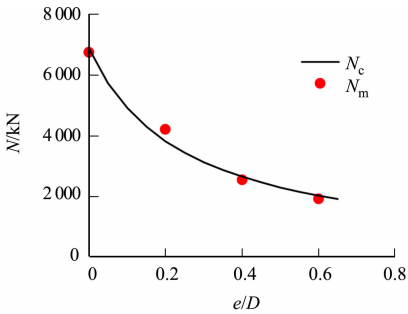


图 9 计算结果和试验结果对比(无脱空试件)

Fig. 9 Comparison between calculation results and test results (specimens without gap)

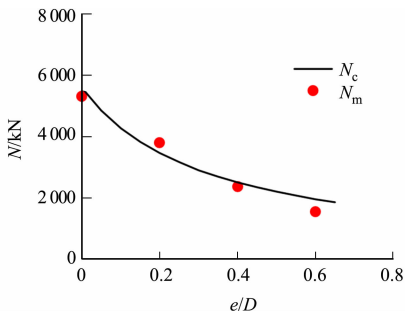


图 10 计算结果与试验结果的对比(环向均匀脱空试件)

Fig. 10 Comparison between calculation results and test results (specimens with circumferential uniform gap)

脱空和环向均匀脱空圆钢管超高强混凝土柱承载力计算公式的承载力与实测承载力吻合良好。

参考文献：

[1] SAKINO K, NAKAHARA H, MORINO S, *et al.* Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2 (180).

[2] FUJIMOTO T, MUKAI A, NISHIYAMA I, *et al.* Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 203-212. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2 (203).

[3] GIAKOUMELIS G, LAM D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(7): 1049-1068. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2003. 10. 001.

[4] GULER S, ÇOPUR A, AYDOĞAN M. Axial capacity and ductility of circular UHPC-filled steel tube columns[J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(15): 898-905. DOI: 10. 1680/mac. 12. 00211.

[5] XIONG Mingxiang, XIONG Dexin, 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. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2017. 01. 037.

[6] CHEN Shiming, ZHANG Rui, JIA Liangjiu, *et al.* Structural behavior of UHPC filled steel tube columns under axial loading[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130: 550-563. DOI: 10. 1016/j. tws. 2018. 06. 016.

[7] 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. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2019. 0337.

[8] YU Qing, TAO Zhong, WU Yingxing. Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns[J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(4): 362-370. DOI: 10. 1016/j. tws. 2007. 10. 001.

[9] PORTOLÉS J M, ROMERO M L, BONET J L, *et al.* Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(4): 623-633. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2010. 11. 017.

[10] ZHANG Rui, CHEN Shiming, GU Ping, *et al.* Structural behavior of UHPC filled steel tubular columns under eccentric loading[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 156: 106959. DOI: 10. 1016/j. tws. 2020. 106959.

[11] LIAO Feiyu, HAN Linhai, HE Shanhu. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1922-1935. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2011. 06. 009.

[12] 李永进, 王志滨, 李东升. 长期荷载作用下带脱空缺陷钢管混凝土柱的受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(10): 112-120. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2018. 0589.

[13] HAN Linhai, YE Yong, LIAO Feiyu. Effects of core concrete initial imperfection on performance of eccentrically loaded CFST columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): 04016132.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[15] 张素梅, 王玉银. 圆钢管高强混凝土轴压短柱的破坏模式[J]. 土木工程学报, 2004(9): 1-10. DOI: 10. 15951/j. tmgcxb. 2004. 09. 001.

[16] PAULAY T, PRIESTLEY M N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings[M]. New York: Wiley-Interscience, 1992.

[17] 康洪震, 钱稼茹. 钢管高强混凝土组合柱轴压承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(6): 64-67. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2011. 06. 013.

(责任编辑：陈志贤 英文审校：方德平)