

空腔对钢管混凝土柱轴压整体稳定性影响的有限元分析

王晨洁¹, 郁有升^{1,*}, 刘作岩², 杨怡亭¹, 安琦¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛中建联合集团有限公司, 青岛 266061)

摘要: 为研究空腔对钢管混凝土柱轴压整体稳定性的影响, 设计了 35 个试件, 利用有限元软件 ABAQUS 对试件建立模型并进行轴压整体稳定性有限元分析, 研究空腔位置(柱高方向)、空腔截面尺寸和空腔高度对钢管混凝土柱破坏模式以及轴压稳定极限承载力的影响。结果表明: 改变空腔位置对钢管混凝土柱轴压整体稳定性有显著影响, 在空腔截面尺寸和高度相同的条件下, 空腔位于柱高中部位置对钢管混凝土柱轴压稳定极限承载力影响最大, 且破坏模式为整体弯曲失稳破坏; 空腔截面尺寸对钢管混凝土柱轴压稳定极限承载力影响较大, 空腔位置和空腔率相同时, 空腔截面尺寸从 0 增大至 80 mm×80 mm, 试件稳定极限承载力下降 14.58%; 空腔高度对钢管混凝土柱轴压稳定极限承载力影响不明显。

关键词: 钢管混凝土柱; 空腔位置; 空腔截面尺寸; 整体稳定性

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)06-0027-10

Finite element analysis of the effect of cavities on the overall stability of axial compression of steel-tube concrete columns

WANG Chenjie¹, YU Yousheng^{1,*}, LIU Zuoyan², YANG Yiting¹, AN Qi¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Zhongjian Joint Construction Engineering Co., Ltd., Qingdao 266061, China)

Abstract: In order to study the effect of cavity on the overall stability of axial compression of steel-tube concrete columns, 35 specimens were designed, and the finite element software ABAQUS was used to establish the model of the specimens and carry out the finite element analysis of the overall stability of axial compression. The effect of the location of the cavity (in the direction of the height of the column), the cavity cross-section dimensions and the height of the cavity on the damage mode of the steel-tube concrete columns as well as the axial compression stability ultimate bearing capacity was investigated. The results show that changing the cavity location has a significant effect on the overall stability of the axial compression of steel-tube concrete columns. Under the condition that the cavity cross-section dimensions and height are the same, the cavity located in the middle of the column height has the greatest influence on the axial compression stability ultimate bearing capacity of steel-tube concrete columns, and the damage mode is the overall bending instability damage; the cavity cross-section size has a greater influence on the axial compression stability ultimate

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE243)

作者简介: 王晨洁(1999—), 女, 山西临汾人。硕士, 研究方向为钢结构。E-mail: 1041637189@qq.com。

* 通信作者: 郁有升(1976—), 男, 山东临沂人。博士, 教授, 主要从事钢结构方面的研究。E-mail: yuyousheng@126.com。

bearing capacity of steel-tube concrete columns; under the condition that the cavity location and the cavity rate are the same, when the cavity section size increases from 0 to 80 mm × 80 mm, the stability ultimate bearing capacity of the specimen decreases by 14.58%; the effect of cavity height on the axial compression stability ultimate bearing capacity of steel-tube concrete columns was not significant.

Key words: steel-tube concrete columns; cavity location; cavity cross-section dimensions; overall stability

近年来我国经济与科技正在高速发展,城市化进程也在不断加速,建筑形式逐渐向高层、超高层、大跨度等方向扩展,钢管混凝土因具有承载力高、塑性韧性好、耐火性强、抗震性能好以及施工方便等优点^[1-4]被广泛地应用于工程领域。然而,在实际工程浇筑混凝土时,由于内部气泡不能充分溢出、振捣不密实,加上钢管内部存在加劲肋、内隔板以及混凝土后期养护不合理等因素,会不可避免地导致钢管混凝土内部产生空腔^[5-6],从而影响构件的受力性能。

近年来,许多国内外学者研究了空腔对钢管混凝土柱受力性能的影响,并取得了丰富成果。HAN等^[7]通过试验和有限元软件研究了混凝土环向均匀脱空和球冠脱空对偏心受压钢管混凝土柱性能的影响,结果表明环向脱空对偏心荷载下的钢管混凝土柱承载力影响较大。李永进等^[8]研究了在长期荷载作用下环向均匀脱空与球冠脱空缺陷的圆形钢管混凝土柱的变形特性和承载力,结果表明两种脱空降低了构件在长期荷载作用下的承载力。叶勇等^[9]研究了四周均匀脱空的方钢管混凝土柱,主要分析了脱空率对其受力性能的影响,脱空率超过 0.4% 时,钢管与核心混凝土在试件达到轴压极限承载力前的相互作用基本丧失,两者各自受力、破坏。刘开^[10]通过试验和有限元模拟对带柱角部空腔、边部空腔、中央长方体或中央圆柱体空腔的方钢管混凝土短柱进行了受压性能分析。郝兆峰等^[11-12]通过试验和有限元模拟的方法研究了空腔位置和空腔率对钢管混凝土柱承载能力的影响,结果表明边缘空腔引起的承载力损失大于中心空腔。

目前国内外对核心混凝土空腔的研究主要集中在空腔位置(柱横截面方向)和空腔率(同时改变空腔截面尺寸和高度),缺少对柱高方向空腔位置、空腔截面尺寸和空腔高度的数值分析,因此有必要对空腔展开深入研究,探讨柱高方向空腔位置、空腔截面尺寸以及空腔高度对钢管混凝土柱轴压稳定性能的影响。

1 有限元分析模型

1.1 模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 对钢管混凝土柱建立三维模型。由于模型中试件的整体尺寸较大而钢管壁厚尺寸相较于整体尺寸很小,为了得到准确的计算结果,钢管在厚度方向采用壳单元(S4R),内部混凝土采用三维实体单元(C3D8R)进行模拟。

1.2 材料模型

本文所建模型中试件的钢材为 Q355B,其应力-应变关系采用二次塑流模型^[13],如图 1 所示。钢材的弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比 $\nu_s = 0.3$,比例极限 $f_p = 288 \text{ N/mm}^2$,屈服强度 $f_y = 360 \text{ N/mm}^2$,极限抗拉强度 $f_u = 576 \text{ N/mm}^2$, $\epsilon_e = 0.8f_y/E_s = 0.14\%$, $\epsilon_{e1} = 1.5\epsilon_e = 0.21\%$, $\epsilon_{e2} = 10\epsilon_{e1} = 2.1\%$, $\epsilon_{e3} = 100\epsilon_{e1} = 21\%$ 。

混凝土采用强度等级为 C45 的混凝土,其密度 $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E_c = 2.82 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比 $\nu_c = 0.2$;混凝土材料的模型采用韩林海混凝土塑性损伤模型^[13],此模型模拟混凝土

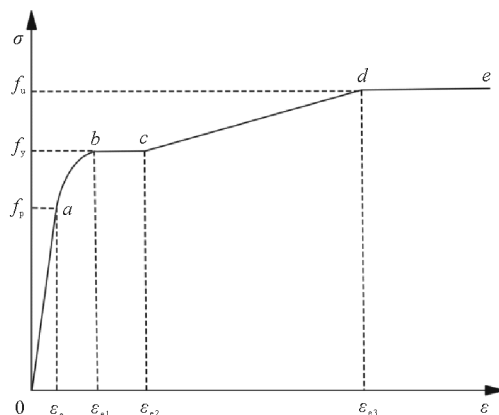


图1 钢材应力-应变曲线关系

构件的塑性变形与材料非线性特性较为良好,假设材料是各向同性和线性的弹性行为。在 ABAQUS 软件中内部混凝土塑性损伤模型参数主要包括膨胀角、偏心率、混凝土双轴受压与单轴受压极限强度比 f_{bo}/f_{co} 、不变量应力比 K 以及黏滞系数;根据《混凝土结构设计规范》^[14] 中有关公式和参数得出表 1 中数据。

1.3 界面接触与网格划分

钢管和内部混凝土之间采用面-面接触,定义其接触属性时,要从法线和切线 2 个方向进行定义,界面法线方向的接触采用“硬”接触^[9];切线方向的接触采用“罚摩擦”模型

模拟界面剪应力传递^[5],钢管与混凝土界面摩擦系数取 0.6^[13]。为了更好地得到较为精确的分析结果,考虑到在分析混凝土与钢管内侧管壁接触时,主表面为钢管,从表面为混凝土,从表面的网格密度要高于或等于主表面^[15],进而划分尺寸一样的网格。为确定模型网格对计算结果的准确性的影响,先采用较宽疏的网格进行模拟,然后再采用精细的网格。

1.4 边界条件与加载方式

在柱顶端约束沿 X 、 Y 方向的位移,施加沿 Z 轴的竖向位移荷载;柱底端约束 X 、 Y 、 Z 方向的位移。柱的初始缺陷对构件的力学性能有显著影响,取 $H/1000$ ^[16-17] (H 为柱高度)的初弯曲作为轴压柱的初始几何缺陷。根据文献^[11-12]的结论:边缘空腔引起的承载力损失大于中心空腔,且空腔位于初弯曲受压一侧引起的承载力损失也是最大的,本文将空腔设置在靠近初弯曲受压一侧的柱边缘处(沿柱高度上下移动),试件示意图 2 所示。

表 1 C45 混凝土塑性损伤参数模型

膨胀角/(°)	偏心率	f_{bo}/f_{co}	K	黏滞系数
36	0.1	1.16	0.6667	0.0005

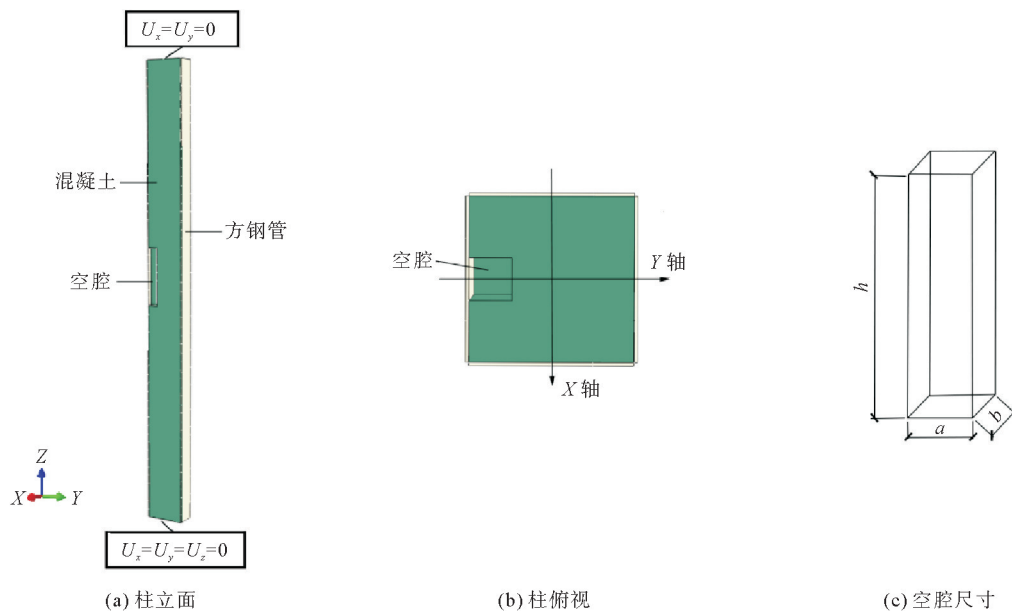


图 2 带空腔的钢管混凝土柱试件示意

1.5 有限元模型验证

为验证本文有限元模型分析的正确性,选取参考文献^[18]中的 A2 试件的数据建立了有限元模型,图 3 展示了试验与有限元模拟结果。可以看出,试验曲线与有限元模拟曲线整体较为吻合,初始刚度和极限承载力相近,两者破坏形态一致,表明本文采用的有限元建模方法、本构关系等是合理的。

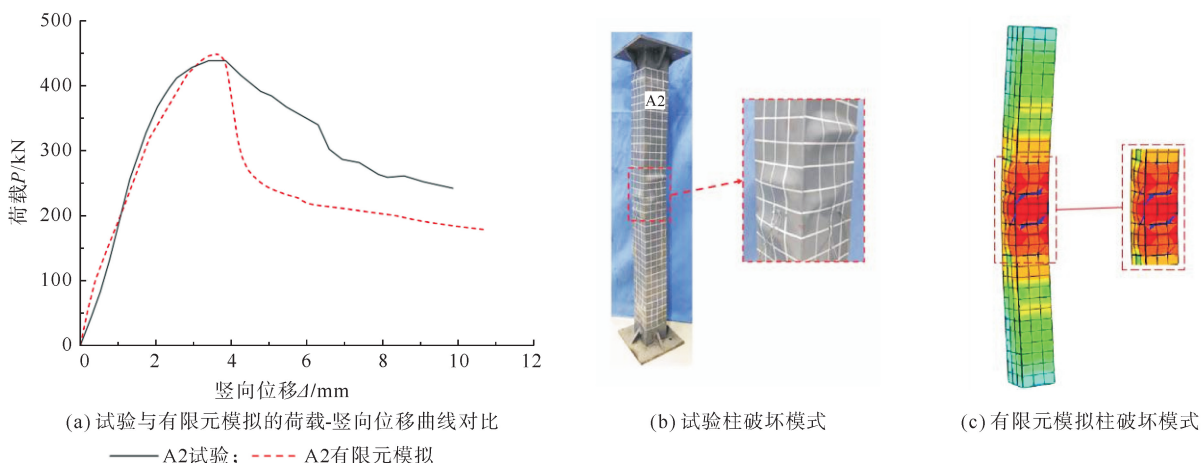


图3 试验结果^[18]与有限元结果比较

2 有限元参数分析

2.1 空腔位置

本文研究空腔位置对钢管混凝土柱轴压稳定承载力的影响,根据《钢管混凝土结构技术规范》^[19]设计了表2中2组共30个试件研究在不同的长细比、宽厚比下,空腔对试件的最不利位置。表2中不呈现带空腔试件的编号,具体以表3中base1—base5为例(试件FSCZ-1800、FSCZ-3000、FSCZ-6、FSCZ-8中的相关试件的空腔尺寸和位置均与base相关试件一致)。表3以base试件为例设计了5个带空腔的试件,这5个试件内部的空腔设置在按照柱高度划分的5个部分之中。

表2 有限元计算试件参数

参数	试件编号	钢管截面尺寸	空腔尺寸	无空腔轴压稳定承载力/kN	空腔最不利位置及轴压稳定承载力/kN
		$B \times t \times H/\text{mm}$	$a \times b \times h/\text{mm}$		
长细比	FSCZ-1800	$200 \times 4 \times 1800$	$50 \times 50 \times 300$	2276.48	柱高中部, 2123.51
	base	$200 \times 4 \times 2400$	$50 \times 50 \times 300$	2119.33	柱高中部, 2007.58
	FSCZ-3000	$200 \times 4 \times 3000$	$50 \times 50 \times 300$	1921.62	柱高中部, 1866.30
宽厚比	FSCZ-6	$200 \times 6 \times 2400$	$50 \times 50 \times 300$	2548.80	柱高中部, 2407.04
	FSCZ-8	$200 \times 8 \times 2400$	$50 \times 50 \times 300$	2952.23	柱高中部, 2837.28

注: B 为钢管的边长; t 为钢管的厚度; H 为柱的高度; a 、 b 为空腔截面边长; h 为空腔高度。

表3 base组试件参数和空腔位置

试件编号	钢管截面尺寸 $B \times t \times H/\text{mm}$	空腔尺寸 $a \times b \times h/\text{mm}$	空腔在柱中位置/mm	空腔率 $\chi/\%$
base	$200 \times 4 \times 2400$	—	—	—
base-1	$200 \times 4 \times 2400$	$50 \times 50 \times 300$	0~480	0.85
base-2	$200 \times 4 \times 2400$	$50 \times 50 \times 300$	480~920	0.85
base-3	$200 \times 4 \times 2400$	$50 \times 50 \times 300$	920~1440	0.85
base-4	$200 \times 4 \times 2400$	$50 \times 50 \times 300$	1440~1920	0.85
base-5	$200 \times 4 \times 2400$	$50 \times 50 \times 300$	1920~2400	0.85

注: χ 为空腔率, $\chi = \text{空腔体积} / \text{无空腔混凝土体积}$ 。

2.1.1 破坏模式

图 4 为 base 系列试件的破坏模式。

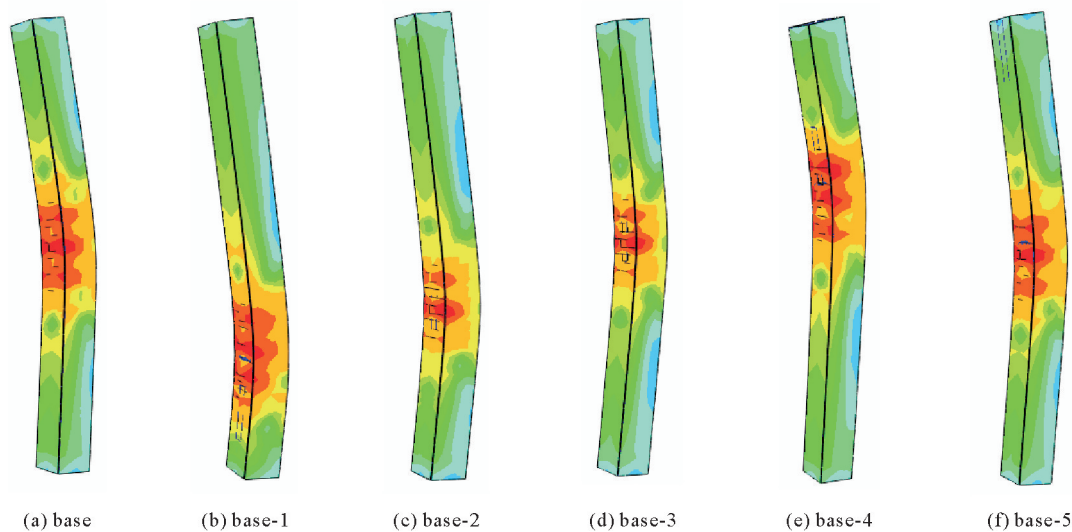


图 4 base 组试件整体破坏形态

从图 4 中可以看出, 试件 base 在加载初期无明显变形; 随着荷载进一步增加, 试件在柱高中部的受压侧出现局部轻微鼓曲变形, 鼓曲程度随着荷载的增加不断延伸形成波浪形, 试件最终发生绕 X 轴整体弯曲失稳。试件 base-1、base-2、base-3、base-4、base-5 在加载初期, 均未出现变形现象; 随着荷载增加, 试件开始产生侧向位移, 且在混凝土空腔位置处出现了不同程度的鼓曲, 这是因为空腔的存在导致该处混凝土缺少约束, 使得该处钢管受力增大至极限强度后开始屈服; 荷载持续增加至峰值后, 试件会因侧向位移过大而发生整体弯曲失稳破坏。

图 5 呈现了 FSCZ-1800、FSCZ-1800-3、FSCZ-3000、FSCZ-3000-3、FSCZ-6、FSCZ-6-3、FSCZ-8 和 FSCZ-8-3 的破坏云图。

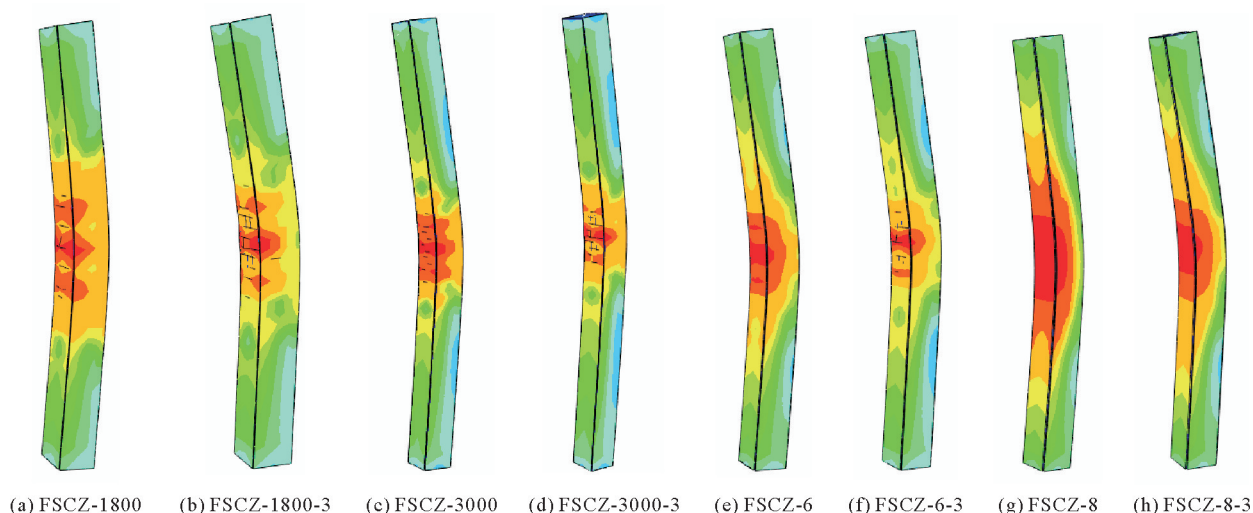


图 5 不同试件参数下无空腔和中部位置空腔试件整体破坏形态

从图 4(a)(d)、图 5 中可以看出, 不同长细比下, 试件在柱高中部位置处首先发生局部鼓曲, 之后出现整体弯曲失稳破坏, 空腔的存在会使试件局部鼓曲集中在空腔位置处且鼓曲程度明显; 随着钢管壁厚增加到 6 mm, FSCZ-6 试件发生了整体弯曲失稳破坏, 而 FSCZ-6-3 试件在空腔位置处发生微小局部鼓曲; 当

钢管壁厚度为 8 mm 时, FSCZ-8 和 FSCZ-8-3 试件发生了整体弯曲失稳破坏, 未出现局部钢管鼓曲。由此可知, 当钢管壁厚达到一定时, 空腔位置不再发生局部鼓曲, 而试件发生整体弯曲失稳破坏。

2.1.2 荷载-竖向位移曲线

图 6 为不同长细比、宽厚比下无空腔试件和有空腔试件的荷载-竖向位移曲线。从图中可以看出有无空腔的钢管混凝土柱荷载-竖向位移曲线都可划分为 3 个阶段: ①弹性阶段: 加载初期竖向位移与荷载呈线性增长; ②弹塑性阶段: 随着竖向位移的增加, 荷载的增长趋势放慢; ③下降阶段: 继续加载至各试件的稳定极限承载力(极值点)后, 竖向位移继续增大而承载力开始下降, 此时构件发生整体弯曲失稳破坏。从图中可知在不同长细比、宽厚比下, 核心混凝土空腔位于柱高中部位置(即柱反弯点)^[20-21]处对试件稳定极限承载力的影响最大, 且该处稳定极限承载力最低。

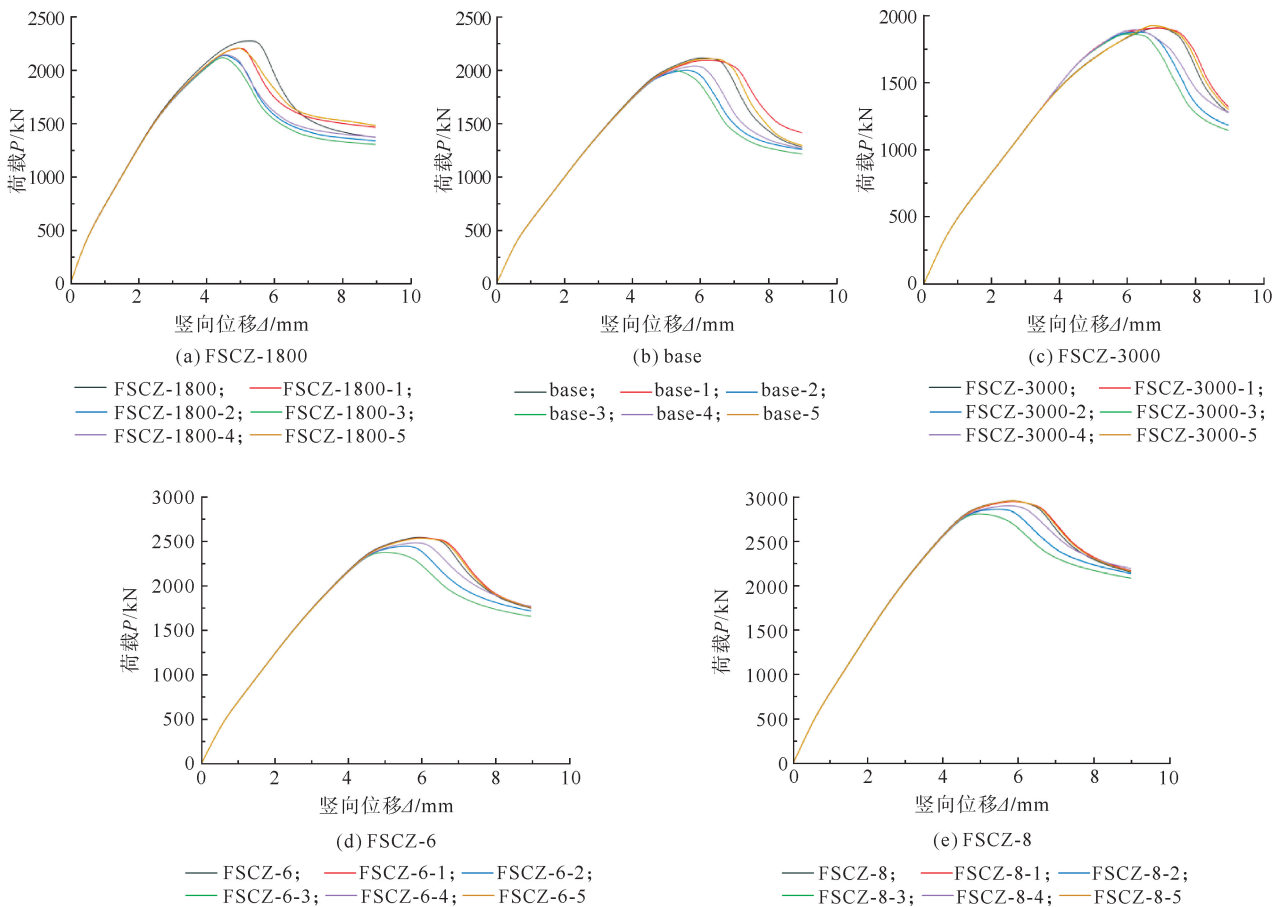


图 6 荷载-竖向位移曲线

2.1.3 荷载-侧向挠度曲线

图 7 为 1/2 柱高处荷载-侧向挠度曲线, 由于试件是绕 X 轴逆时针弯曲, 所以侧向挠度为正值。从图中可以看出, 在到达峰值侧向挠度之前, 荷载随侧向挠度的增加呈线性增加, 且增长速率较快; 达到挠度峰值时, 荷载达到最大; 随着侧向挠度的进一步增加, 荷载开始急速下降后趋于平缓, 此时试件丧失承载能力。从图中还可以看出, 当荷载加载至有空腔的试件稳定极限承载力时, 无空腔试件的侧向挠度很小, 且不同长细比、宽厚比试件中位于柱高中部的空腔试件曲线都比其他位置空腔试件的曲线低。

图 8 为不同长细比、宽厚比试件的侧向挠度沿试件高度 H 的分布图。从图中可以看出, 试件的弯曲程度与正弦半波曲线基本吻合, 与图 4、图 5 中表现出的破坏模式一致, 且试件破坏时的最大挠度发生在柱高中部的位置。

由此可知, 空腔位于柱高中部位置处对钢管混凝土柱的整体稳定承载影响最不利。

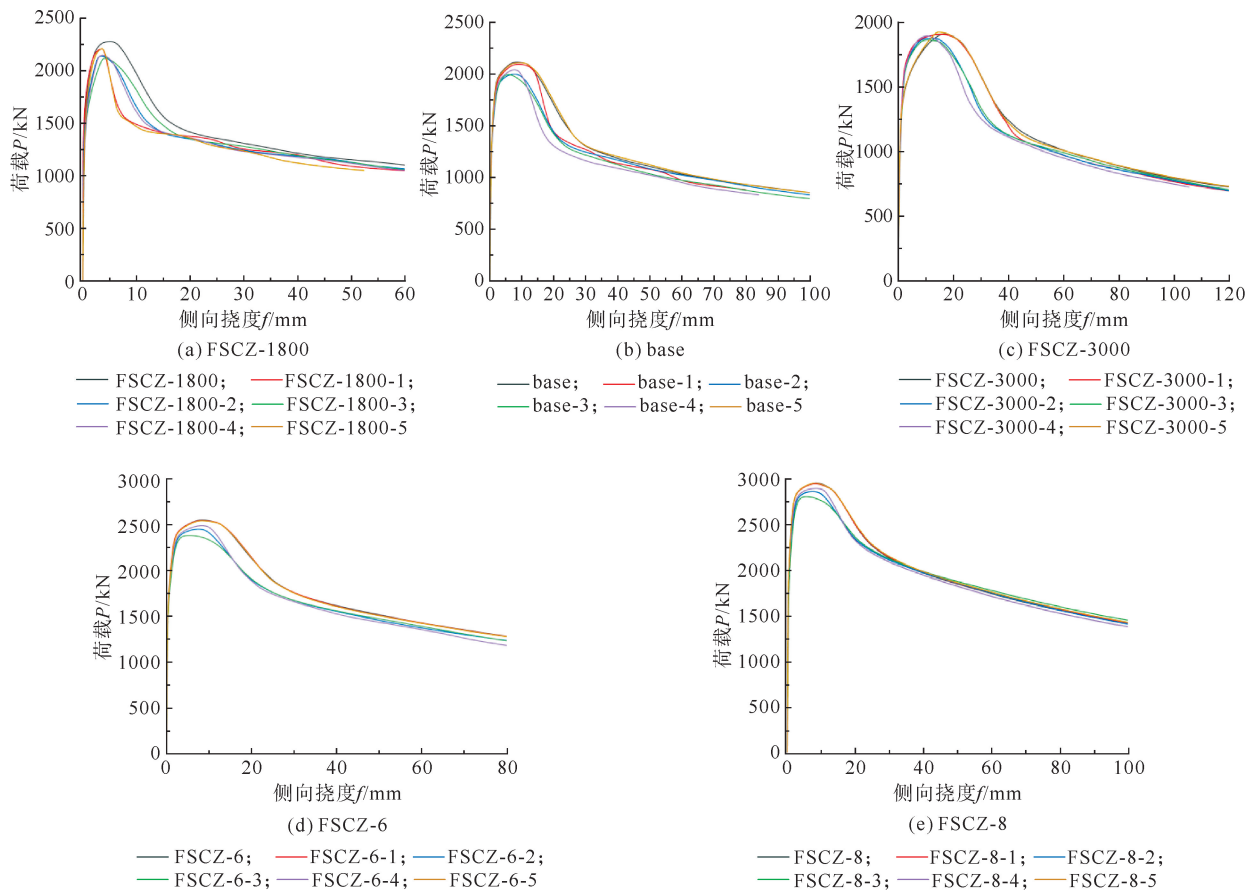


图 7 1/2 柱高处荷载-侧向挠度曲线

2.2 空腔参数

本节研究的空腔参数分别为空腔截面尺寸和空腔高度,根据表 4 中的 base-3 试件(空腔的最不利位置)设计了 5 个试件研究空腔截面尺寸和空腔高度对钢管混凝土柱整体稳定性的影响。

2.2.1 破坏模式

图 9、图 10 是 A、B 组试件的破坏云图,base-3 试件破坏云图见图 4(d)。由图可知,在弹性阶段,由于核心混凝土存在空腔,所以最大应力出现在空腔位置附近,当加载到一定程度,空腔位置处钢管出现局部鼓曲变形,后试件发生整体弯曲失稳破坏。由图 9 可知,增大空腔截面尺寸,试件的侧向挠曲也在增大;从图 10 可知,增大空腔高度,试件的局部波浪鼓曲范围在扩大,但其侧向挠曲无明显变化。

2.2.2 荷载-竖向位移曲线

由图 11 可知,A 组试件仅空腔截面尺寸在变化,钢管混凝土柱稳定极限承载力随着空腔截面尺寸的增大而减小。空腔截面尺寸由 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 减小到 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,空腔率由 0.85% 减小到 0.31%,试件 A-1 稳定极限承载力较 base-3 试件提高了 4.37%;空腔截面尺寸由 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 增大到 $80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$,空腔率由 0.85% 增大到 2.17%,试件 A-2 稳定极限承载力较 base-3 试件降低了 9.83%。由图 12 可知,B 组试件仅空腔高度在变化,空腔高度由 300 mm 减小到 200 mm,空腔率由 0.85% 减小到 0.57%,试件 B-1 稳定极限承载力较 base-3 试件提高了 0.94%;空腔高度由 300 mm 增大到 768 mm,空腔率由

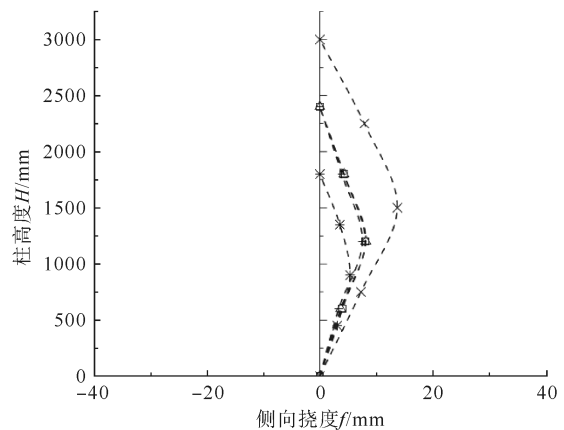


图 8 不同试件侧向挠度分布

*- FSCZ-1800; -□- base; -×- FSCZ-3000; -△- FSCZ-6; -+- FSCZ-8

0.85%增大到2.17%，试件B-2、B-3的稳定极限承载力较base-3试件分别降低了1.79%、2.48%，降低幅度未见明显差异。由图13可知，空腔率相同为2.17%时，改变空腔截面尺寸的试件较无空腔base试件极限承载力下降了14.58%，而改变空腔高度的试件极限承载力下降了7.62%。这表明，较大的空腔截面尺寸会使空腔率升高，进而降低了试件的轴压稳定性能。

表4 base-3组试件参数

试件编号	钢管截面尺寸	空腔尺寸	空腔在柱中位置/mm	空腔率 $\chi/\%$
	$B \times t \times H/\text{mm}$	$a \times b \times h/\text{mm}$		
A-1	200×4×2400	30×30×300	920~1440	0.31
base-3	200×4×2400	50×50×300		0.85
A-2	200×4×2400	80×80×300		2.17
B-1	200×4×2400	50×50×200		0.57
B-2	200×4×2400	50×50×480		1.36
B-3	200×4×2400	50×50×768		2.17

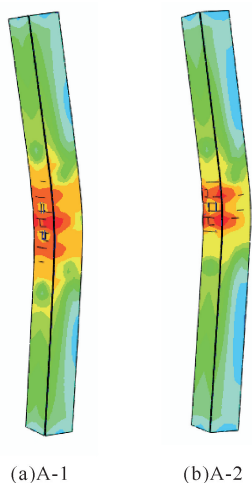


图9 A组试件整体破坏形态

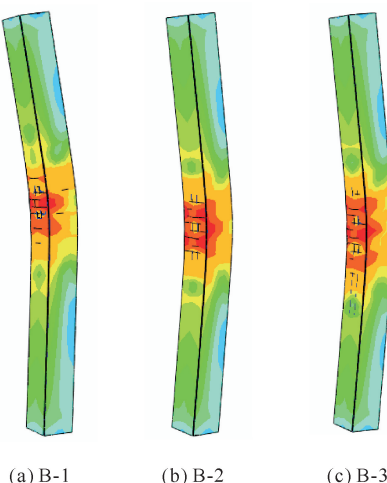


图10 B组试件整体破坏形态

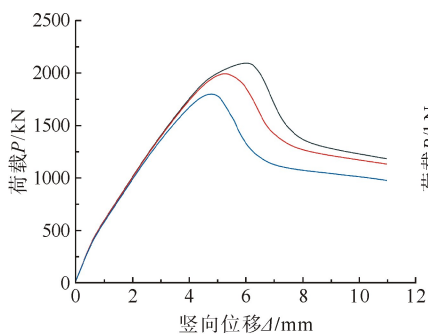


图11 A组试件荷载-竖向位移曲线
—A-1; —base-3; —A-2

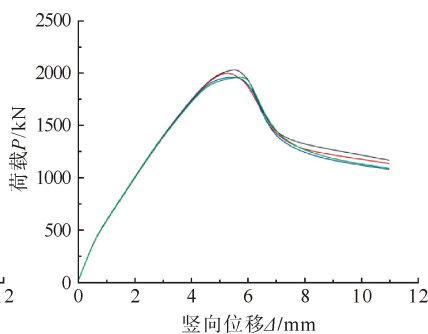


图12 B组试件荷载-竖向位移曲线
—B-1; —base-3;
—B-2; —B-3

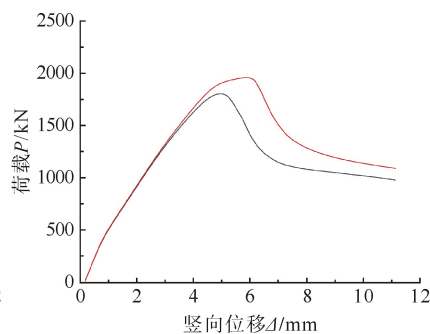


图13 2.17%空腔率试件
荷载-竖向位移曲线
—A-2; —B-3

综上所述，空腔截面尺寸相较于空腔高度对钢管混凝土柱的稳定极限承载力及破坏模式影响更加明显。

2.2.3 荷载-侧向挠度曲线

将表4中的6个试件加载相同的荷载(A-2的极限承载力)，可以得到图14侧向挠度 f 沿柱高度 H 的分布曲线。从图中可以看出，加载相同的荷载，空腔截面尺寸大的侧向挠度大。

从图15可以看出，当荷载加载至A-2极限承载力前时，空腔截面尺寸越大，柱中侧向挠度越大，柱整

体弯曲失稳程度越明显。从图 16 中可以看出,当荷载达到 B-3 稳定极限承载力前时,B-1、base-3、B-2 的侧向挠度接近,柱的整体弯曲失稳程度相似。从图 17 中可知,空腔率相同时,加载至 A-2 稳定极限承载力前时,空腔截面为 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 时侧向挠度大,空腔高度为 768 mm 时侧向挠度小。由此可知,空腔截面尺寸对钢管混凝土柱的侧向挠度有较明显的影响。

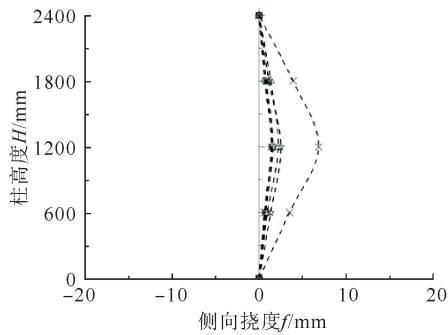


图 14 相同荷载下侧向挠度曲线分布

-*·A-1; -□·base-3; -×·A-2;
-○·B-1; -△·B-2; -☆·B-3

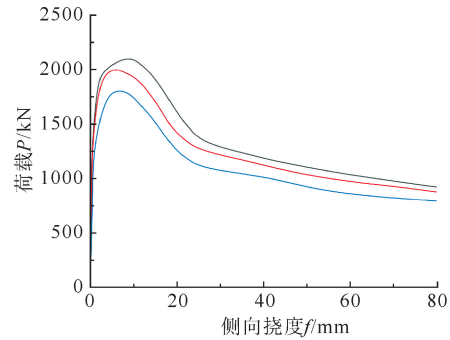


图 15 A组试件1/2柱高荷载-侧向挠度曲线

— A-1; — base-3; — A-2

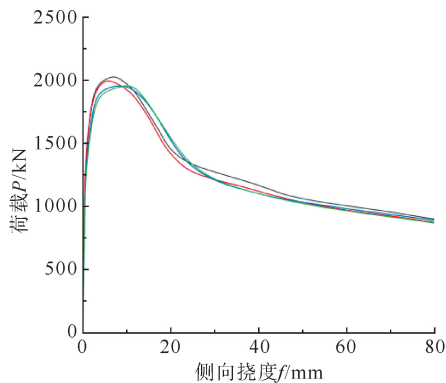


图 16 B组试件1/2柱高荷载-侧向挠度曲线

— B-1; — base-3;
— B-2; — B-3

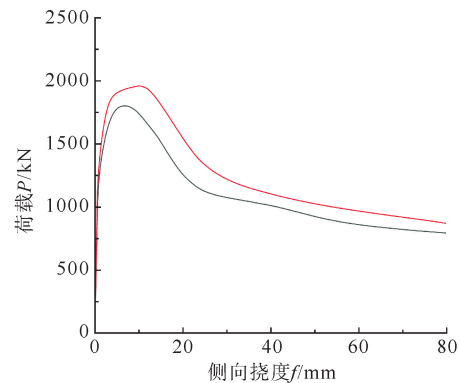


图 17 2.17%空腔率试件1/2柱高荷载-侧向挠度曲线

— A-2; — B-3

3 结论

本文通过有限元软件 ABAQUS 研究了柱高方向核心混凝土空腔位置、空腔截面尺寸和空腔高度对钢管混凝土柱整体稳定性能的影响,得出以下结论:

1) 空腔位于柱高中部位置对钢管混凝土柱的轴压整体稳定性能影响最大,轴压稳定极限承载力最低,试件易发生整体弯曲失稳破坏。

2) 钢管混凝土柱的稳定极限承载力会随着空腔截面尺寸和空腔高度的增大而减小,空腔截面尺寸对承载力的影响尤为显著。

3) 在空腔位置相同条件下,保持空腔高度为 300 mm 不变,空腔截面尺寸由 0 增加至 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$,空腔率从 0 增加至 2.17% 时,试件稳定极限承载力下降了 14.58% ;而保持空腔截面尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 不变,空腔高度由 0 增大至 768 mm ,空腔率从 0 增加至 2.17% 时,试件稳定极限承载力下降了 7.62% 。这表明空腔率相同时,改变空腔截面尺寸比改变空腔高度对试件轴压稳定极限承载力的影响明显。

参考文献 (References):

- [1] HAN L H, LI Y J, LIAO F Y. Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns subjected to long-term sustained loading[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(12): 1534-1543.
- [2] 门有冬. 核心混凝土缺陷对钢管混凝土短柱轴压力学性能的影响分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
MEN Youdong. Analysis of the influence of core concrete defects on the mechanical performances of axially loaded concrete filled steel

- tubular short columns[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.
- [3] CHANG L G, YI D C, JIE L S. Finite element analysis of middle long columns of high-strength concrete filled square steel tube with inner CFRP circular tube under axial load[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 163-167: 2199-2202.
- [4] 张斌, 胡红松, 杨朱金. 方钢管超高强钢纤维混凝土柱轴压性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(5): 547-554.
ZHANG Bin, HU Hongsong, YANG Zhujin. Axial compressive behavior of ultra-high-strength steel fiber-reinforced concrete-filled square steel columns[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(5): 547-554.
- [5] 韩浩, 廖飞宇, 林挺伟, 等. 脱空缺陷对钢管混凝土拉弯构件性能的影响分析[J]. *工业建筑*, 2018, 48(3): 170-175.
HAN Hao, LIAO Feiyu, LIN Tingwei, et al. Effects of concrete gap on the mechanical properties of CFST members subjected to bending and tension[J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(3): 170-175.
- [6] 张传钦, 廖飞宇, 王静峰, 等. 脱空缺陷对钢管混凝土压弯扭构件力学性能的影响研究[J]. *工业建筑*, 2019, 49(10): 19-24.
ZHANG Chuanqin, LIAO Feiyu, WANG Jingfeng, et al. Research on the effect of de-hollowing defects on the mechanical properties of steel pipe concrete compression bending and torsion members[J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(10): 19-24.
- [7] HAN L H, YE Y, LIAO F Y. Effects of core concrete initial imperfection on performance of eccentrically loaded CFST columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(12): 04016132.
- [8] 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.
LI Yongjin, WANG Zhibin, LI Dongsheng. Mechanical behavior of concrete-filled steel tubular columns with initial concrete imperfection under long-term sustained load[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(10): 112-120.
- [9] 叶勇, 李威, 陈锦阳. 考虑脱空的方钢管混凝土短柱轴压性能有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(S1): 324-329.
YE Yong, LI Wei, CHEN Jinyang. Fea on compressive behavior of square cfst short columns with circumferential gap between concrete and tube[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(S1): 324-329.
- [10] 刘开. 核心砼带缺陷方钢管混凝土短柱受压性能试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
LIU Kai. Experimental study on performance of concrete filled square steel tubular short column with core defect[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [11] 郝兆峰, 张戎令, 马丽娜, 等. 钢管混凝土缺陷构件承载能力试验研究及数值分析计算[J]. *工业建筑*, 2020, 50(8): 138-144.
HAO Zhaofeng, ZHANG Rongling, MA Lina, et al. Experimental research and numerical analysis of the bearing capacity of concrete-filled steel tube (CFST) with defects[J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(8): 138-144.
- [12] 张戎令, 郝兆峰, 马丽娜, 等. 核心混凝土缺陷率与缺陷位置对钢管混凝土承载力的影响[J]. *建筑结构*, 2021, 51(2): 78-84.
ZHANG Rongling, HAO Zhaofeng, MA Lina, et al. Influence of defect rate and location of core concrete on the bearing capacity of concrete-filled steel tubular[J]. *Building Structure*, 2021, 51(2): 78-84.
- [13] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016.
HAN Linhai. Steel pipe concrete structures: Theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [14] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for the design of concrete structures[S].
- [15] 杨磊, 薛晓宏, 姜继果, 等. 矩形钢管混凝土柱初始缺陷随机有限元分析[J]. *施工技术(中英文)*, 2022, 51(22): 103-108.
YANG Lei, XUE Xiaohong, JIANG Jiguo, et al. Stochastic finite element analysis of initial defects of concrete-filled rectangular steel tubular columns[J]. *Construction Technology (in Chinese and English)*, 2022, 51(22): 103-108.
- [16] 张涛, 张拓, 薛茹, 等. 矩形钢管混凝土中长柱轴压性能研究[J]. *郑州航空工业管理学院学报*, 2023, 41(4): 96-103.
ZHANG Tao, ZHANG Tuo, XUE Ru, et al. A study on axial compressive behavior of concrete-filled rectangular steel tube mid-long columns[J]. *Journal of Zhengzhou University of Aeronautics*, 2023, 41(4): 96-103.
- [17] 任志刚, 张铭, 刘闯, 等. 圆端形钢管混凝土中长柱轴心受压承载性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(14): 62-68.
REN Zhigang, ZHANG Ming, LIU Chuang, et al. Experimental study on behavior of intermediate long RCFST columns under axial loads[J]. *Building Structure*, 2021, 51(14): 62-68.
- [18] 郝文秀, 崔博云, 徐晓. 薄壁方钢管混凝土柱轴压承载力试验研究[J]. *工业建筑*, 2023, 53(7): 109-115.
HAO Wenxiu, CUI Boyun, XU Xiao. Experimental research on the axial compressive capacity of thin-walled concrete-filled square steel tubular columns[J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(7): 109-115.
- [19] GB 50936—2014, 钢管混凝土结构技术规范[S].
GB 50936—2014, Technical specification for steel pipe concrete structures[S].
- [20] JAMALUDDIN N, LAM D, DAI X H, et al. An experimental study on elliptical concrete filled columns under axial compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 87: 6-16.
- [21] REN Q X, HAN L H, LAM D, et al. Tests on elliptical concrete filled steel tubular (CFST) beams and columns[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 99: 149-160.