

预制拼装钢管混凝土柱偏压性能有限元分析

刘 莉¹,赵延吉²,杨 阳¹,张 婷¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 同圆设计集团股份有限公司,山东 济南 250000)

摘 要 目的 提出一种新型预制拼装钢管混凝土柱,研究不同参数对其力学性能的影响,为该类构件设计提供依据。方法 通过 ABAQUS 有限元软件建立试件模型,选取合理的材料本构关系验证模型可行。建立预制拼装钢管混凝土柱有限元模型,分析长细比、含钢率、偏心距、预制连接件内套管长度、内套管壁厚对其偏压力学性能影响。结果 预制连接件内套管长度增加、内套管壁厚增加对模型极限承载力的提高具有一定作用;长细比增大,模型极限承载力降低,初始刚度降低;含钢率增大,模型极限承载力增大,初始刚度增大;偏心距增大,模型极限承载力降低,初始刚度降低,截面上压应变与拉应变的比值降低。结论 预制连接件内套管长度、内套管壁厚对模型极限承载力影响不大,长细比、含钢率、偏心距对模型受力性能影响较大。

关键词 钢管混凝土;预制拼装;偏压性能;有限元模拟

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Eccentric Compression Performance of Precast Assembled Concrete-Filled Steel Tube Columns

LIU Li¹, ZHAO Yanji², YANG Yang¹, ZHANG Ting¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Tongyuan Design Group Co. Ltd., Ji'nan, China, 250000)

Abstract: A precast assembled concrete-filled steel tube column is proposed to study the influence of different parameters on its mechanical properties, and provide a basis for the design of the component. A test model with ABAQUS finite element software is established, and a reasonable material constitutive relationship is selected to verify that the model is feasible. A finite element model of precast assembled concrete-filled steel tube column is established to analyze the influence of slenderness ratio, steel ratio, eccentricity, length of inner sleeve of precast connectors, and wall thickness of inner sleeve on its mechanical property of eccentric compression. With the increase of the length of the inner sleeve and the wall thickness of the inner sleeve, the ultimate bearing capacity of the model has a certain increased effect. With the increase of the slenderness ratio, the

收稿日期:2021-01-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703703)

作者简介:刘莉(1971—),女,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构等方面研究。

ultimate bearing capacity of the model decreases, and the initial stiffness decreases. As the steel ratio increases, the ultimate bearing capacity of the model increases, and the initial stiffness increases. As the eccentricity increases, the ultimate bearing capacity of the model decreases, the initial stiffness decreases, and the ratio of compressive strain to tensile strain on the section decreases. The length of the inner sleeve of the precast connector and the wall thickness of the inner sleeve have little effect on the ultimate bearing capacity of the model. The slenderness ratio, steel ratio, and eccentricity have a greater influence on the mechanical property of the model.

Key words: concrete-filled steel tube; precast assembled; eccentric compression performance; finite element simulation

随着装配式建筑的不断推广,建筑中各类构件的生产正在逐渐走向工业化。为满足施工生产需要,钢管混凝土柱通常被分为若干个节段进行预制,将节段运送到施工现场后进行拼装,这样可以减少现浇混凝土工序,降低对环境的污染,缩短工期。研究预制钢管混凝土柱的节段拼装具有较好的工程意义。

节段拼装钢管混凝土柱主要应用于桥梁工程。国内外学者对预制节段拼装桥墩进行了许多研究^[1-5]。何通^[6]采用纤维模型法,研究了预制节段拼装混凝土桥墩的抗震性能。布占宇等^[7]研究了整体现浇桥墩与预制拼装桥墩抗震性能的差异。张强^[8]提出后张预应力节段预制拼装钢管混凝土和高强螺栓连接钢管混凝土桥墩两种构造,并对其拟静力对比分析。孔兰兰^[9]针对节段拼装钢管混凝土桥墩抗震性能及其基于位移的抗震设计方法进行了研究。翟帅帅^[10]提出了两种内套管连接钢管混凝土柱拼接方式,并对螺栓连接钢管混凝土柱的轴压力学性能进行了研究。余琼等^[11]针对新型套筒灌浆搭接连接的预制柱进行了抗震性能研究。Ou Yuchen 等^[12]通过试验研究了耗能钢筋对节段拼装桥墩自复位性能的影响。C. S. Shim 等^[13]针对预应力筋连接的节段拼装桥墩进行抗震性能研究。目前,针对全预制节段拼装柱的研究较少,基于此,笔者提出一种新型预制拼装钢管混凝土柱,并利用 ABAQUS 有限元软件分析其偏压受力性能,研究表明预制连接件内套管长度、内套管壁

厚对该柱极限承载力影响不大,长细比、含钢率、偏心距对该柱受力性能影响较大。

1 内套管连接钢管混凝土柱有限元模型

1.1 材料本构关系

笔者选取韩林海^[14]提出的钢管混凝土构件中核心混凝土本构关系模型,在 ABAQUS 软件的材料库中,选取混凝土的塑性损伤模型来进行分析。采用应力-断裂能 (GFI) 来定义混凝土受拉性能。钢管采用五阶段二次塑流模型^[15-16]。

1.2 单元类型选取

内套管连接的钢管混凝土柱模型主要由上下两端端板、钢管、内套管、核心混凝土、螺栓五部分组成。在 ABAQUS 软件中,端板、钢管、内套管、核心混凝土、螺栓均采用 8 节点减缩积分格式的三维实体单元 (C3D8R)。

1.3 模型接触与边界条件

内套管连接的钢管混凝土柱模型在承受外荷载时,核心混凝土、内套管、钢管、端板、螺栓之间会产生相互作用。内套管与核心混凝土采用绑定接触 (Tie) 进行约束;钢管与混凝土之间的界面关系由两个方向决定,法线方向采用硬接触 (Hard contact),切线方向采用罚函数 (Penalty),摩擦系数为 0.3;滑移模式采用有限滑移 (Finite sliding);钢管与端板之间采用绑定接触;端板与核心混凝土之间采用硬接触。

约束柱上表面 x 、 y 方向位移以及沿 x 、 y 、

z 轴的转角,将柱下表面设置为完全固定。

1.4 模型有效性验证

根据文献[10]中编号为 LZ-1、LZ-2、LZ-3、LZ-4 试件,在 ABAQUS 中建立相对应有限元模型,模型编号与试件编号相同。以试件 LZ-1 为例,荷载-位移曲线(纵向)对比结果见图 1。

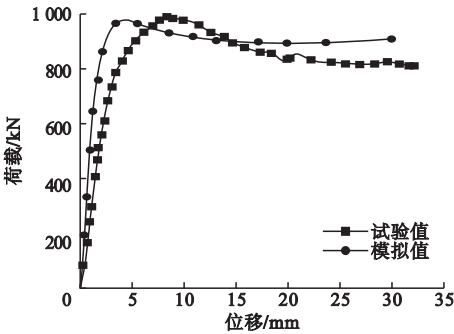


图1 试件 LZ-1 荷载-位移曲线对比

Fig. 1 Comparison of load-displacement curves

从图 1 中可以看出,荷载-位移曲线与试验结果吻合较好,验证了有限元模型的有效性。由于有限元计算是在相对理想状态下进行的,排除了试验过程中的各种不利因素,所以有限元计算出的数值略大于试验数值。

2 预制拼装钢管混凝土柱

2.1 预制拼装钢管混凝土柱构造

笔者提出的预制拼装钢管混凝土柱构造如图 2 所示。

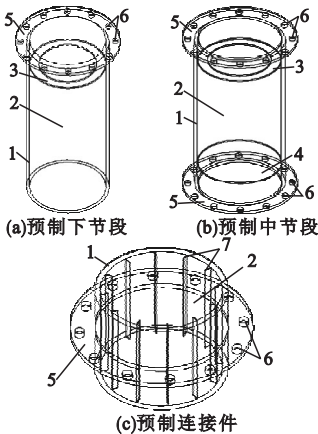


图2 预制拼装钢管混凝土柱节段构造

Fig. 2 Segment structure of precast assembled concrete filled steel tube column

图中 1 为圆钢管,2 为混凝土,3 为环形挡片,4 为圆钢片,5 为圆形钢片环,6 为螺栓孔,7 为加劲肋板。与上述试验中内套管连接钢管混凝土柱相比,各组成部分完全预制,没有现场浇筑过程。

2.2 轴压下预制拼装钢管混凝土柱破坏分析

预制拼装钢管混凝土柱模型尺寸与文献[10]中试验试件 LZ-1、LZ-2、LZ-3、LZ-4 相同,编号分别为 LS-1、LS-2、LS-3、LS-4。模型计算设有两个分析步:①对螺栓施加 125 kN 的螺栓荷载;②对模型施加与内套管连接钢管混凝土柱相同的荷载。预制上节段中的核心混凝土、预制连接件中的核心混凝土、预制下节段中的核心混凝土的界面接触关系采用罚函数。

将 LS-1、LS-2、LS-3、LS-4 承载力与内套管连接钢管混凝土柱的极限承载力相比较,结果见表 1。以 LS-1、LS-2 为例,荷载-位移曲线(纵向)见图 3。从图中可以看出,加载初期,预制节段外钢管与核心混凝土均处于弹性工作阶段,荷载-位移曲线呈线性增长。随着荷载增加,荷载-位移曲线由线性增长转为非线性增长,预制节段外钢管逐渐达到屈服强度,此时外荷载再继续增加,受压钢管逐渐产生塑性变形,受压混凝土会产生微小裂缝,直到模型达到极限承载力。继续施加荷载,混凝土内部微小裂缝快速发展,荷载-位移曲线呈下降趋势,随后模型承载力下降至趋于平缓,由于预制节段外钢管和预制连接件钢管的双重套箍作用,荷载-位移曲线出现小幅度回升现象。从表 1 可以看出,试验值与模拟值的比值为 1.018、1.006、0.999、1.005,误差较小。从图 3 可以看出,荷载-位移曲线走势基本吻合,说明所建立的预制拼装钢管混凝土柱模型在轴压荷载下,其受力过程同内套管连接钢管混凝土柱基本相同。由此表明,在轴压荷载下,预制拼装钢管混凝土柱可以替换同条件下内套管连

接的钢管混凝土柱,同时在工程中构件全装配、减少工人工作量、减少施工现场湿作业量、缩短工期、节约成本等优点。

表 1 极限承载力有限元结果与试验结果对比

模型编号	极限承载力	极限承载力	试验值/ 模拟值
	试验值/kN	模拟值/kN	
LZ-1 (LS-1)	983	966	1.018
LZ-2 (LS-2)	966	960	1.006
LZ-3 (LS-3)	941	942	0.999
LZ-4 (LS-4)	889	885	1.005

下产生了较大的侧向变形。

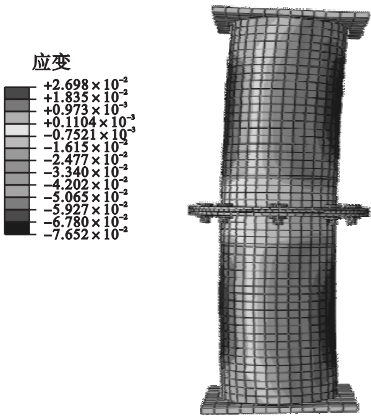


图 4 最终应变云图

Fig. 4 Final strain contour plot

图 5 为模型截面宽度变化量,初始截面宽度为 140 mm。从图 5 可知,在整个偏压加载过程中,模型的截面宽度始终在变化,加载最终阶段,在高度为 100 mm 和 600 mm 左右处,模型的截面宽度产生较大的变化量,即模型在偏压加载过程中会发生鼓曲膨胀现象,并在高度为 100 mm 和 600 mm 左右处时,鼓曲膨胀最大,且在 100 mm 的位置处最大,模型截面宽度增大了约 0.9 mm。

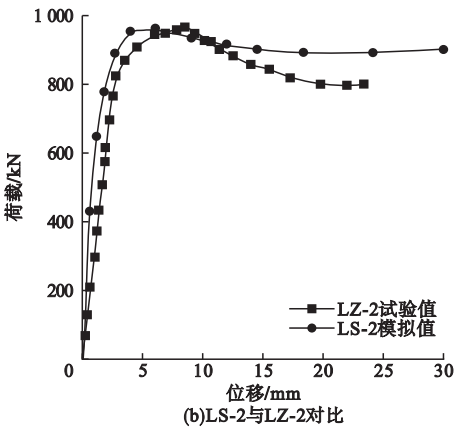
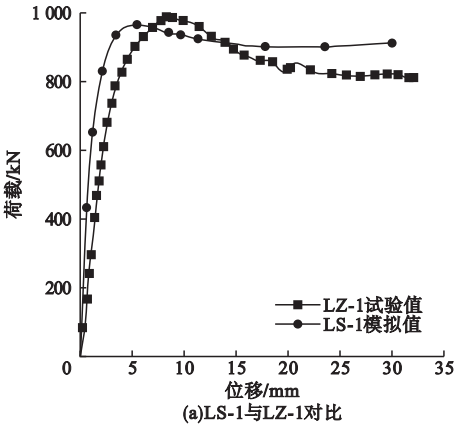


图 3 荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves

2.3 偏压下预制拼装钢管混凝土柱破坏分析

以模型 LS-2 为例,偏压下预制拼装钢管混凝土柱最终应变云图如图 4 所示。可以看出,预制拼装钢管混凝土柱在偏压荷载作用

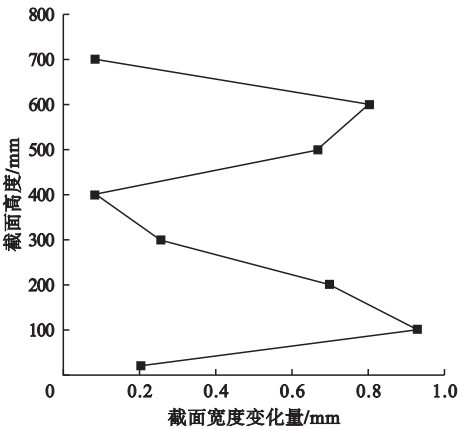


图 5 模型截面宽度变化曲线

Fig. 5 Model section width change curves

3 偏压下预制拼装钢管混凝土柱参数分析

笔者建立 15 个预制拼装钢管混凝土柱模型,分析预制连接件内套管长度、内套管壁厚

以及长细比、含钢率、偏心距对预制拼装钢管混凝土柱受力性能的影响,模型参数见表2。

表2 偏压模型参数

Table 2 Eccentric compression model parameters

编号	$L/$ mm	$L_1/$ mm	$L_2/$ mm	$D_1/$ mm	$D_2/$ mm	$T_1/$ mm	$T_2/$ mm	$e/$ mm	λ	$Q/\%$
LSP-1	700	347.5	120	140	135	2.5	2.75	20	20	7.54
LSP-2	700	347.5	120	140	135	2.5	2.75	40	20	7.54
LSP-3	700	347.5	120	140	135	2.5	2.75	60	20	7.54
LSP-4	700	347.5	100	140	135	2.5	2.75	40	20	7.54
LSP-5	700	347.5	80	140	135	2.5	2.75	40	20	7.54
LSP-6	700	347.5	60	140	135	2.5	2.75	40	20	7.54
LSP-7	700	347.5	120	140	135	2.5	1.75	40	20	7.54
LSP-8	700	347.5	120	140	135	2.5	3.75	40	20	7.54
LSP-9	700	347.5	120	140	135	2.5	4.75	40	20	7.54
LSP-10	440	207.5	120	140	135	2.5	2.75	40	12	7.54
LSP-11	1 000	487.5	120	140	135	2.5	2.75	40	28	7.54
LSP-12	1 280	627.5	120	140	135	2.5	2.75	40	36	7.54
LSP-13	700	347.5	120	140	137	1.5	2.75	40	20	4.42
LSP-14	700	347.5	120	140	133	3.5	2.75	40	20	10.80
LSP-15	700	347.5	120	140	131	4.5	2.75	40	20	14.21

注: L 为模型总高度; L_1 为上下预制节段高度; L_2 为预制连接件内套管长度; D_1 为钢管直径; D_2 为预制连接件内套管直径; T_1 为钢管厚度; T_2 为预制连接件内套管厚度; e 为偏心距; λ 为长细比; Q 为含钢率。

3.1 预制连接件内套管长度

不同预制连接件内套管长度下对应的模型极限承载力见表3。

表3 偏压下内套管长度对模型极限承载力的影响

Table 3 The influence of the inner sleeve length on the ultimate bearing capacity of the model under eccentric compression

模型编号	L_2/mm	P_1/kN	$M_1/\%$
LSP-1	120	626.62	1.71
LSP-4	100	619.27	0.51
LSP-5	80	617.67	0.25
LSP-6	60	616.10	0

注: P_1 为模型极限承载力; M_1 为其他模型极限承载力相对于模型LSP-6极限承载力的增长百分比。

由表3可以看出,预制连接件的内套管长度对模型极限承载力的影响并不大,内套管长度从60 mm增加到120 mm时,模型的极限承载力仅仅增加了1.71%,但是增加的幅度逐渐增大。预制连接件的内套管越长,

模型预制连接件区域就越大,对预制连接件核心混凝土约束越强,导致模型的承载能力略有增大。

3.2 预制连接件内套管壁厚

不同预制连接件内套管壁厚对应的模型极限承载力见表4。从表可知,内套管壁厚从1.75 mm增加到4.75 mm时,模型的极限承载力仅仅增加了1.54%,即内套管壁厚增大,模型的极限承载力幅度提高较小。

表4 偏压下内套管壁厚对模型极限承载力的影响

Table 4 The influence of the inner sleeve thickness on the ultimate bearing capacity of the model under eccentric compression

模型编号	T_2/mm	P_1/kN	$M_2/\%$
LSP-7	1.75	618.55	0
LSP-1	2.75	626.62	1.30
LSP-8	3.75	627.48	1.44
LSP-9	4.75	628.05	1.54

注: M_2 为其他模型极限承载力相对于模型LSP-7极限承载力的增长百分比。

3.3 长细比

以模型 LSP-2、LSP-10、LSP-11、LSP-12 为例,绘制预制拼装钢管混凝土柱在不同长细比下的荷载-跨中挠度曲线如图 6 所示,初始刚度如图 7 所示。

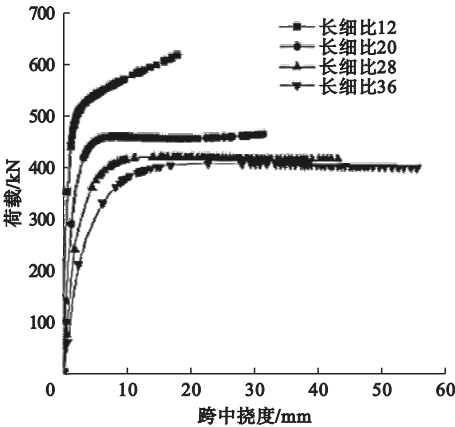


图 6 不同长细比下的荷载-跨中挠度曲线
Fig. 6 Load-midspan deflection curves at different slenderness ratios

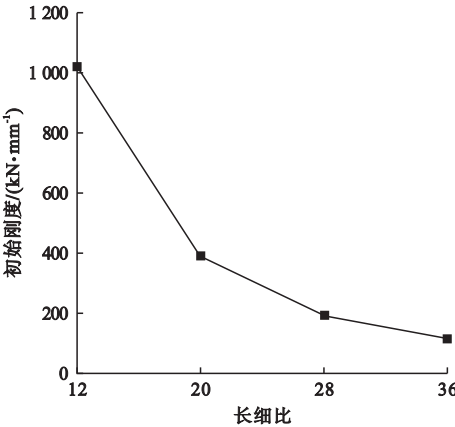


图 7 不同长细比下的初始刚度

Fig. 7 Initial stiffness at different slenderness ratios

从图 6 可以看出,当长细比为 12 时,荷载-跨中挠度曲线始终呈上升趋势,当模型达到屈服强度后,模型始终处于强化阶段,承担的外荷载始终增大。当长细比为 20 及以上时,模型达到屈服强度后,荷载变化较小。这是由于长细比越小,模型的预制连接件区域面积所占整体的比例就越大,抗横向变形能力就越强。长细比为 12、20、28、36 时,预制柱极限荷载分别为 510.37 kN、

460.34 kN、421.17 kN、408.00 kN,此时跨中挠度分别为 2.42 mm、8.46 mm、16.31 mm、22.63 mm。以长细比 12 为参考值,长细比增加 66.67%、133.33%、200%,极限荷载值分别降低 9.80%、17.48%、20.06%,此时跨中挠度值分别增加 249.59%、573.97%、835.12%,对应的初始刚度减小 61.57%、81.00%、88.56%。可见,预制拼装钢管混凝土柱长细比越大,其极限承载能力越低,跨中挠度值越大,初始刚度越低。

3.4 含钢率

以模型 LSP-2、LSP-13、LSP-14、LSP-15 为例,绘制预制拼装钢管混凝土柱在不同含钢率下的荷载-跨中挠度曲线如图 8 所示,初始刚度如图 9 所示。

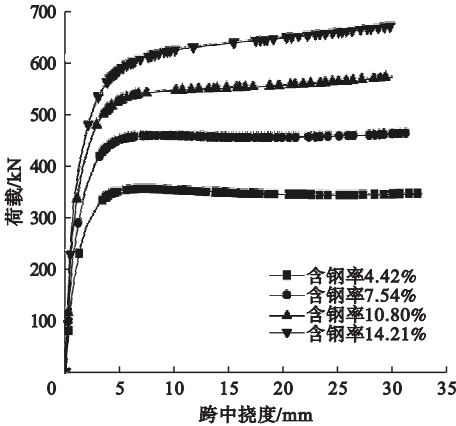


图 8 不同含钢率下的荷载-跨中挠度曲线
Fig. 8 Load-midspan deflection curves at different steel ratios

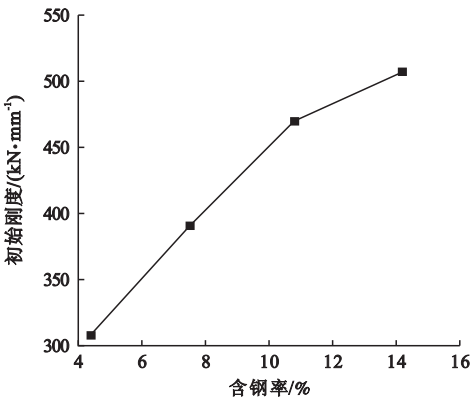


图 9 不同含钢率下的初始刚度

Fig. 9 Initial stiffness at different steel ratios

从图8可以看出,当含钢率为10.80%、14.21%时,荷载-跨中挠度曲线始终呈上升趋势,当模型达到屈服强度后,模型始终处于强化阶段,承担的外荷载始终增大。这是由于含钢率越大,即钢管越厚,套箍系数越大,抗横向变形能力越强。当含钢率为4.42%、7.54%时,模型达到屈服强度后,极限承载力变化较小。含钢率为4.42%、7.54%、10.80%、14.21%时,预制柱的极限荷载分别为356.24 kN、460.34 kN、548.47 kN、629.11 kN。以含钢率4.42%为参考值,含钢率增加70.59%、144.34%、221.49%,极限荷载值增加29.22%、53.96%、76.60%,初始刚度增大27.12%、52.65%、64.77%。可见,预制拼装钢管混凝土柱含钢率越大,模型极限承载力、初始刚度越大。

3.5 偏心距

以模型编号LSP-1、LSP-2、LSP-3为例,绘制预制拼装钢管混凝土柱在不同偏心距下的荷载-跨中挠度曲线如图10所示,初始刚度如图11所示。偏心距为20 mm、40 mm、60 mm时,预制柱的极限荷载分别为626.62 kN、460.34 kN、321.19 kN。以偏心距20 mm为参考值,即偏心距增加100%、200%,极限荷载值减少26.54%、48.74%,初始刚度减小41.90%、62.82%,可见,偏心距越大,模型的极限承载力、初始刚度越低。

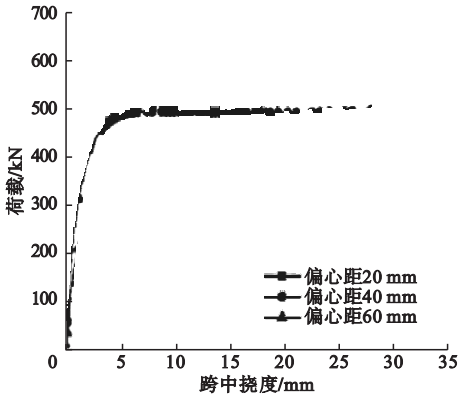


图10 不同偏心距下的荷载-跨中挠度曲线
Fig. 10 Load-midspan deflection curves at different eccentricity

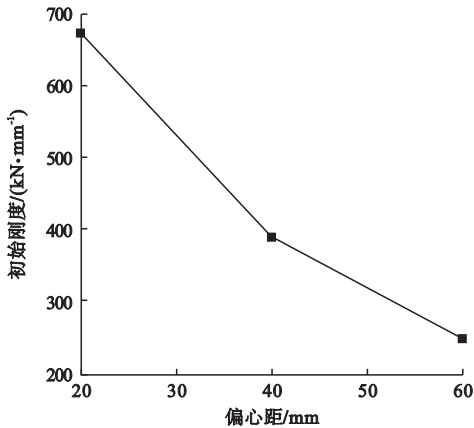


图11 不同偏心距下的初始刚度
Fig. 11 Initial stiffness at different eccentricity

不同偏心距下的荷载-纵向应变曲线如图12所示。从图中可以看出,不同偏心距下的模型在加载初期,荷载-纵向应变曲线均呈线性增长,同时在模型的全截面上始终存在受压区和受拉区。当偏心距为20 mm、40 mm、60 mm时,压应变分别约为拉应变的6倍、4倍、2倍。可见,随着偏心距的增大,模型截面上的压应变与拉应变的比值降低。模型在达到极限承载力之前,受压区的应变增长速率低于受拉区。

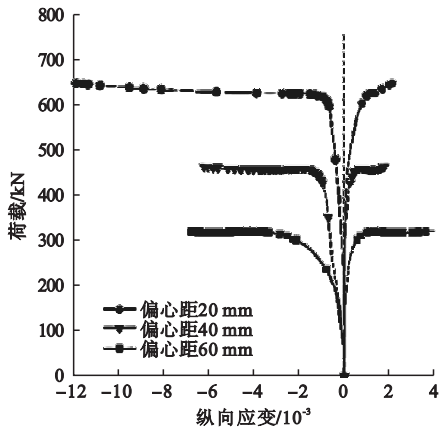


图12 不同偏心距下的荷载-纵向应变曲线
Fig. 12 Load-longitudinal strain curves under different eccentricity

4 结论

(1)预制连接件内套管长度、内套管壁厚对预制拼装钢管混凝土柱承载力影响

较小。

(2) 预制拼装钢管混凝土柱长细比越大, 极限承载力越低, 跨中挠度值越大, 初始刚度越低; 含钢率增大, 极限承载力提高, 初始刚度增大; 偏心距增大, 极限承载力降低, 初始刚度降低, 截面上的压应变与拉应变的比值会降低。

参考文献

- [1] 宋凯, 张剑英. 预制节段拼装桥墩研究进展[J]. 城市道桥与防洪, 2014(6): 282-285.
(SONG Kai, ZHANG Jianying. Study of prefabricated segmental assembled bridge pier [J]. Urban roads bridges & flood control, 2014 (6): 282-285.)
- [2] 张发飞. 预制拼装钢管混凝土桥墩构造改进与抗震性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2019.
(ZHANG Fafei. Structural improvement and seismic performance analysis of precast-assembled concrete-filled steel tube pier [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.)
- [3] BILLINGTON S L, BARNES R W, BREEN J E. A precast segmental substructure system for standard bridges [J]. PCI journal, 1999, 44 (4): 56-73.
- [4] KIM D H, MOON D Y, KIM M K, et al. Experimental test and seismic performance of partial precast concrete segmental bridge column with cast-in-place base [J]. Engineering structures, 2015, 100: 178-188.
- [5] OU Yuchen, CHIEWANICHAKORN M, AREF A J, et al. Seismic performance of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge columns [J]. Journal of structural engineering, 2007, 133 (11): 1636-1647.
- [6] 何通. 预制节段拼装混凝土桥墩抗震性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
(HE Tong. The study of the seismic performance of the precast segmental concrete bridge columns [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.)
- [7] 布占宇, 吴威业. 预制拼装混凝土桥墩抗震性能拟静力循环加载试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1): 42-50.
(BU Zhanyu, WU Weiye. Experiment on seismic behavior of precast segmental concrete bridge piers under quasi static cyclic loading [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2015, 32(1): 42-50.)
- [8] 张强. 节段预制拼装钢管混凝土桥墩抗震性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
(ZHANG Qiang. Research on seismic performance of precast segmental concrete filled steel tube column [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.)
- [9] 孔兰兰. 节段拼装钢管混凝土桥墩抗震性能与设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
(KONG Lanlan. Study on seismic performance and design method for segmental concrete-filled steel tubular piers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.)
- [10] 翟帅帅. 内套管连接钢管混凝土柱轴压力学性能研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2018.
(ZHAI Shuaishuai. Study on axial compression performance of concrete filled steel tubular columns with inner casing connections [D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2018.)
- [11] 余琼, 匡轩, 方永青. 钢筋套筒灌浆搭接连接的预制框架柱抗震试验[J]. 同济大学学报, 2019, 47(1): 18-28.
(YU Qiong, KUANG Xuan, FANG Yongqing. Experimental study on seismic behavior of precast frame column with vertical reinforcement spliced by grouted sleeve lapping connector [J]. Journal of tongji university, 2019, 47(1): 18-28.)
- [12] OU Yuchen, TSAI M S, CHANG K C, et al. Cycle behavior of precast segmental concrete bridge columns with high performance or conventional steel reinforcing bars as energy dissipation bars [J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2010, 39 (11): 1181-1198.
- [13] SHIM C S, CHUNG C H, KIM H H. Experimental evaluation of seismic performance of precast segmental bridge piers with a circular solid section [J]. Engineering structures, 2008, 30(12): 3782-3792.
- [14] 韩林海, 陶忠, 刘威. 钢管混凝土结构-理论与实践[J]. 福州大学学报, 2001, 29(6): 24-34.
(HAN Linhai, TAO Zhong, LIU Wei. Concrete filled steel tubular structures from theory to practice [J]. Journal of Fuzhou university, 2001, 29(6): 24-34.)
- [15] 方映平. 圆钢管再生混凝土偏压短柱及轴压长柱受力性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
(FANG Yingping. Research of mechanical behavior on eccentric compressive short columns and axial compressive long columns with recycled aggregate concrete filled circular steel tube [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.)
- [16] 向星赞, 赵人达, 贾毅, 等. 方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的力学行为[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 420-428.
(XIANG Xingyun, ZHAO Renda, JIA Yi, et al. Mechanical behavior of the eccentric loaded square self-compacting recycled aggregate concrete filled steel tube stub columns [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(3): 420-428.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)