

文章编号:1673-9469(2021)04-0001-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.04.001

钢管再生混凝土短柱承载性能有限元分析

沈金生^{1,2}, 彭宁宁², 安新正², 聂千朋², 李世悦², 郭子毅²

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300000; 2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为了分析钢管再生混凝土短柱承载性能的影响因素, 试验设计了3个不同偏心距的方套方中空夹层钢管再生混凝土短柱进行单调加载, 用于验证所建立有限元模型的正确性; 并利用得到验证的有限元模型设计了三种截面类型(方套方中空截面、方套圆中空截面、方实心截面)共7个钢管再生混凝土短柱试件, 并以偏心距及外钢管壁厚为变化参数, 运用 ABAQUS 建立有限元模型进行静力加载分析。得到了不同偏心距及外钢管壁厚下钢管再生混凝土柱的荷载-轴向位移曲线, 分析了偏心距及外钢管壁厚对钢管再生混凝土短柱承载性能的影响。分析结果表明: 三种类型中方钢管中空夹层再生混凝土短柱随偏心距减小或外钢管壁厚的增加, 其承载性能均有所提高; 三种截面类型中, 方套方中空夹层试件初期刚度最大, 极限承载力最高。

关键词: 钢管再生混凝土短柱; 含砖粒再生混凝土; 承载性能; 有限元分析

中图分类号: TU398.9

文献标识码: A

Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Recycled Concrete Filled Square Steel Tubular Stub Columns

SHEN Jinsheng^{1,2}, PENG Ningning², AN Xinzheng², NIE Qianpeng², LI Shiyue², GUO Ziyi²

(1. School of Architectural Engineering, Tianjin University, Tianjin 300000, China;

2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to analyze the factors affecting the bearing performance of recycled concrete-filled steel tubular short columns, three square hollow sandwich recycled concrete-filled steel tubular short columns with different eccentricities were designed for monotonic loading to verify the applicability of the established finite element model; Using the verified finite element model, seven specimens of recycled concrete-filled steel tubular short columns with three section types (square sleeve, square hollow section, square sleeve circular hollow section and square solid section) are designed. Taking eccentricity and outer steel tube wall thickness as variable parameters, the finite element analysis model was established by using ABAQUS finite element software for static loading analysis. The load axial displacement curves of recycled concrete filled steel tubular columns with different eccentricities and external steel tube wall thickness were obtained, and the influence of eccentricities and external steel tube wall thickness on the bearing capacity of recycled concrete filled steel tubular short columns was analyzed. The results show that the bearing capacity of three types of recycled concrete short columns with hollow intercalation of square steel tube increases with the decrease of eccentricity or the increase of wall thickness of outer steel tube; Among the three cross-section types, the square hollow sandwich specimen has the highest initial stiffness and ultimate bearing capacity.

Key words: recycled concrete filled steel tubular stub columns; recycled concrete with brick particles; bearing capacity; finite element analysis

收稿日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378169)

作者简介: 沈金生(1979-), 男, 河北邯郸人, 博士, 讲师, 研究方向为混凝土结构与抗震。

随着经济的发展,我国建筑固体废弃物排放量日益增加。2018年建筑垃圾产量近 3×10^9 t,其中废弃碎砖砌块占比可达50%以上^[1-2],给环境造成了严重污染。再生混凝土技术不仅节约天然骨料,缓解砂石肆意开采的压力,而且减轻建筑垃圾处理困难对环境造成的污染^[3]。再生骨料中存在原始微裂缝或裂纹,初始损伤较大,与天然骨料拌合的普通混凝土相比再生混凝土耐久性、强度均较差,限制了其在实际工程中的应用^[4]。再生混凝土与钢管相结合,钢管的约束使核心混凝土处于三向受力状态,提高再生混凝土变形能力,使其在工程中运用更广泛;同时再生混凝土的支撑提高了薄壁型钢管的稳定性。二者的组合,具有极限强度高、经济效益好、变形能力强以及便于施工等优点。国内外许多学者对此做了相应研究,杨有福等^[5-8]对再生集料取代率、钢管壁厚为主要参数的再生混凝土短柱进行了承载力试验,分析了构件破坏形态以及荷载-应变全过程曲线;国外学者Konno^[9]进行了钢管再生混凝土柱的力学性能试验,分析得到:钢管再生混凝土柱刚度、强度和延性与普通混凝土相比较差,但其仍然能够满足实际工程需求;Uenaka^[10]以内外钢管径比和径厚比为变化参数,研究了12个中空夹层钢管混凝土轴压受力情况下的力学性能;Mohanraj^[11]研究了钢管尺寸、形状、再生粗骨料取代率对钢管再生混凝土柱性能的影响。结果表明,随再生骨料取代率的增大,钢管混凝土柱承载力降低。

本文利用有限元分析软件,设计了方套方中空夹层、方套圆中空夹层、方实心三种不同截面形式的方钢管再生混凝土短柱,通过非线性分析得到试件的荷载-轴向位移关系曲线,同时分析了偏心距、外钢管壁厚等变化对方钢管再生混凝土短柱承载性能影响,旨在做出一些有益于方钢管再生混凝土结构构件有限元数值分析的探讨。

1 试验概况

本文设计了3个方中空夹层钢管再生混凝土短柱试件,试件再生骨料取代率均为50%,试件的基本参数及各材料性能见表1,表中混凝土抗压强度 f_{cu} 由试件同批浇筑养护的 150 mm^3 标准试块测得,钢材屈服强度 f_y 根据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)规定的方法进行拉伸试验,钢管的材性指标取3个试件值的平均值。

本文试件夹层核心再生混凝土选用太行山牌42.5级普通硅酸盐水泥、再生粗骨料、天然碎石粗骨料、河沙、自来水、粉煤灰、液态高效减水剂拌合而成,粗骨料粒径均为5~20 mm;混凝土配合比为水:水泥:粉煤灰:细骨料:天然粗骨料:再生粗骨料:减水剂=218.3:356.7:40:697:619:619:4.2;试件钢管选用Q345钢。

本文试验加载方法采用荷载-位移联合控制法,试验过程中将荷载理论值分级加载,具体步骤为:为消除试件与试验机加载装置的间隙,首先施加50 kN荷载为预加载;调零后,按每级1/15预估峰值荷载的加载制度,对试验构件进行单调加载,每级荷载持荷5 min;当荷载达到预估峰值荷载70%时,采用位移加载制度,以1.0 mm/min的速率加载,直到荷载下降至峰值荷载的85%停止加载,试验结束。试验加载装置及采集装置见图1。

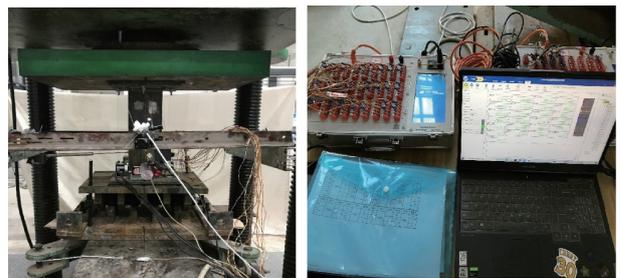


图1 试验加载及采集装置

Fig. 1 Test loading and acquisition device

2 有限元模型的建立

2.1 材料本构关系

2.1.1 钢材

实际工程中低碳钢为常用钢材,故本构模型采用二次塑流模型^[12],其应力-应变曲线由弹性阶段、弹塑性阶段、屈服阶段、强化阶段、局部破坏阶段五部分组成^[13]。钢材作为弹塑性材料,其强度理论采用经典的Von Mises屈服准则。

2.1.2 再生混凝土

本文的核心再生混凝土本构关系来源于文献^[14],要考虑内外钢管对其套箍作用的同时还需考虑其与普通混凝土力学性能的差异,因此要修正普通混凝土在单轴受压作用下应力-应变曲线下降段,在核心混凝土本构公式的基础上引入了再生骨料影响曲率系数。

表1 试件基本参数及材料力学性能指标

Tab.1 Basic parameters of test piece and mechanical property index of material

试件编号	试件高度 L/mm	试件外钢 尺寸 B/mm	试件内钢 尺寸 b/mm	偏心距 e_i/mm	抗压强度 $f_{cu}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	屈服强度 $f_y/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$
ss-g ₁ -e ₁	500	150	60	0	33.59	376.2
ss-g ₁ -e ₂	500	150	60	20	33.59	376.2
ss-g ₁ -e ₃	500	150	60	40	33.59	376.2

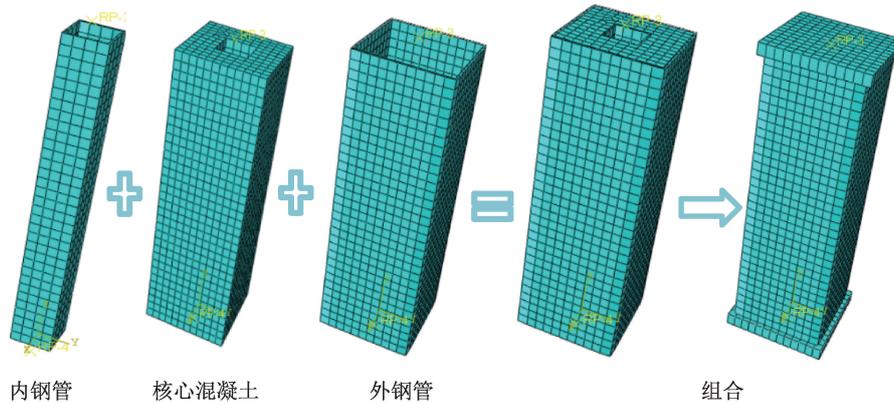


图2 网格划分

Fig. 2 Grid generation

2.2 单元类型的选取

钢管由于厚度较长度方向可忽略不计,为满足其精度要求,钢管单元类型采用线性4节点减缩积分S4R壳体单元;核心混凝土和上下端板采用8节点线性减缩积分C3D8R的实体单元,再生混凝土由于存在内部原始损伤故采用塑性损伤模型,将端板设置为刚体。

2.3 界面的模拟

为了实现截面的等效收缩,模型两端均设置端板。每个试件由五个单独的部件组成:外钢管、内钢管、核心混凝土以及顶部和底部端板。各部件之间相互作用是通过表面来定义的,其中一个表面作为主表面,另一个作为从表面,主表面和从表面的区别在于,前者可以绑定多个从表面。钢管在与混凝土相互作用时被选为主表面,混凝土和钢管在与两端板接触时均被选为从表面。在有限元软件中,内、外钢管与核心混凝土界面模型由两部分组成,一部分是切线方向上的粘结滑移,接触界面采用库仑摩擦模型,通过摩擦系数为0.6的罚函数Penalty来定义,界面接触采用surface-to-surface contact,考虑有限滑移作用^[15]。另一部分是法线方向上的接触,法线方向上采用硬接触。端板与混凝土、钢管上下界面之间均采用绑定(tie)约束。

2.4 网格划分

有限元模型建立完成后,需要对模型进行网格

划分,将模型划分为有一定数量和大小的单元,而且每个单元之间均是由节点进行连接。本文网格划分采用结构化划分方法。计算结果精度会受单元网格划分精细程度的影响,网格划分单位越小计算结果会更加精确,但计算量增大,计算时间增加。本文模型各部件网格划分尺寸相等,边长为15 mm的六面体单元网格,在保证计算精度的情况下减少计算时间。网格划分见图2。

2.5 边界条件和加载方式

本文的方钢管再生混凝土柱为三轴对称结构,柱底刚性端板采用固定约束 $U_1 = U_2 = U_3 = 0$,即端板在空间 X 、 Y 、 Z 三个方向均无位移,但可绕线约束方向转动^[16]。另一方面,顶部端板中心节点不发生任何旋转和侧向位移,只沿纵向(Z)轴变形,沿着该轴施加荷载。本文采用位移控制的加载制度施加荷载。设置参考点作为位移的作用点,并于端板耦合。详见图3。

3 有限元模型验证

采用上述有限元模型方式建立试验短柱实际尺寸的模型进行分析计算,图4为计算所得荷载-位移曲线与试验所得荷载-位移曲线对比,由图中曲线可知,实测曲线与模拟计算曲线整体趋势一致,两曲线可以较好吻合,即说明该建模方式建立的有限元模型可以较好地反映试件的真实受力状态。

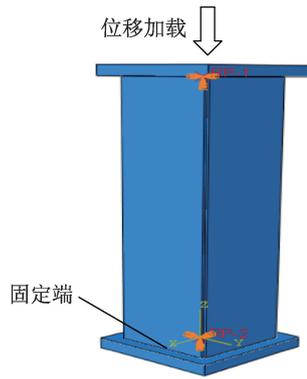


图3 边界条件详图

Fig. 3 Detail of boundary conditions

4 方钢管再生混凝土短柱设计及承载性能影响因素分析

4.1 有限元试件设计

钢管再生混凝土短柱承载性能模拟试验中,根据文献[17]本文试件设计为:短柱试件的长度 L 取500 mm,外边长 B 取165 mm,内钢管壁厚 t 取3 mm。考虑到不同组合类型及偏心距、外钢管壁厚影响,共设计了三种截面类型(ss-方套方中空、sc-方套圆中空及s-方实心),7根钢管再生混凝土短柱试件,具体情况详见图5及表2所示。

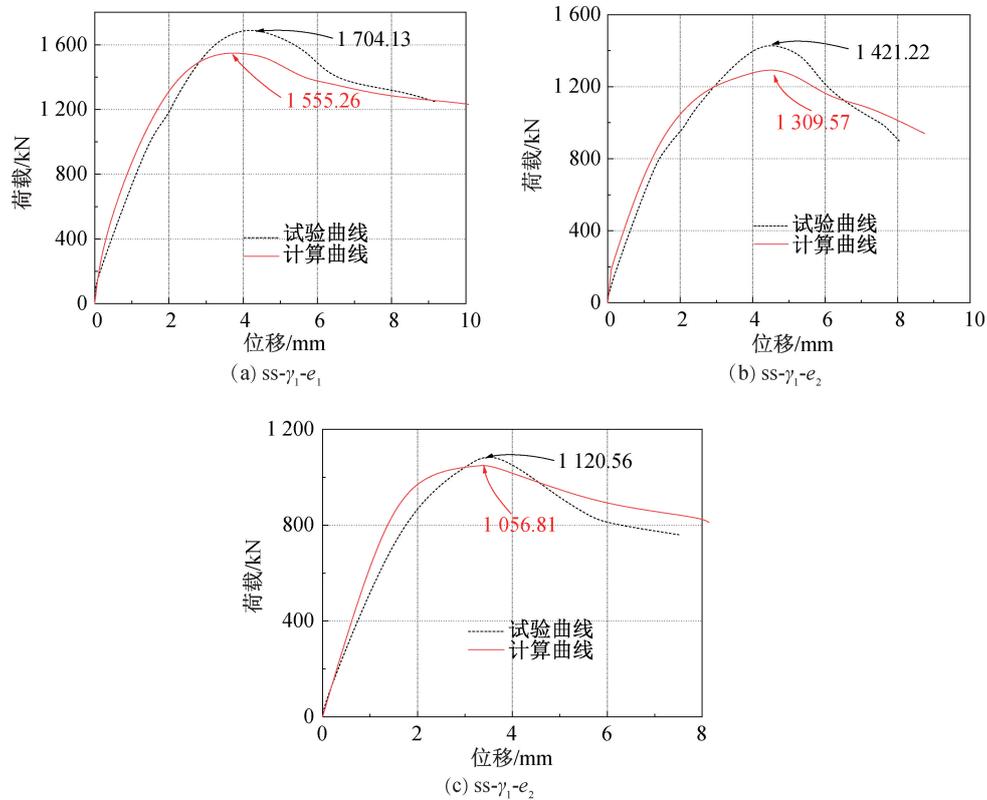
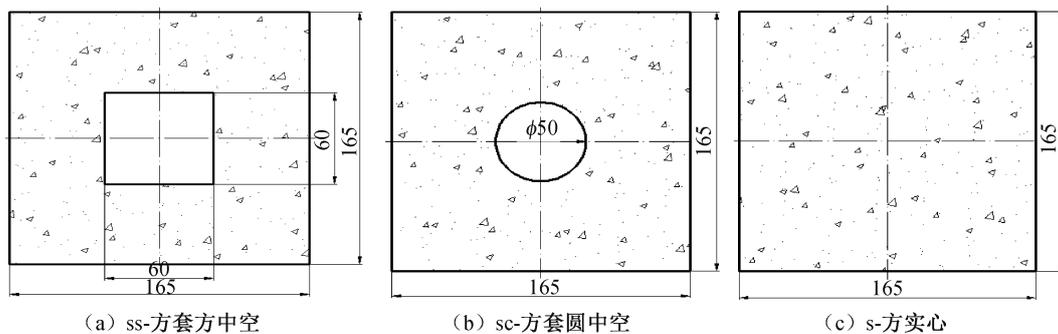


图4 计算曲线与试验曲线对比图

Fig. 4 Comparison between calculation curve and test curve



(a) ss-方套方中空

(b) sc-方套圆中空

(c) s-方实心

图5 钢管再生混凝土短柱截面类型

(单位:mm)

Fig. 5 Section types of recycled concrete filled steel tubular short columns

表2 钢管再生混凝土短柱试件设计参数

Tab. 2 Design parameters of recycled concrete filled steel tubular stub columns			
试件编号	外钢管壁厚 t_i/mm	内圆钢管直径 d 内方钢管边长 $(b)/\text{mm}$	偏心距 e/mm
ss- t_1 - e_1	4	60	0
sc- t_1 - e_1	4	50	0
sc- t_1 - e_2	4	50	20
sc- t_1 - e_3	4	50	40
sc- t_2 - e_1	5	50	0
sc- t_3 - e_1	6	50	0
s- t_1 - e_1	4	0	0

4.2 偏心距对承载性能的影响

sc- t_1 - e_1 、sc- t_1 - e_2 、sc- t_1 - e_3 的荷载-轴向位移曲线基于模拟成果见图6。

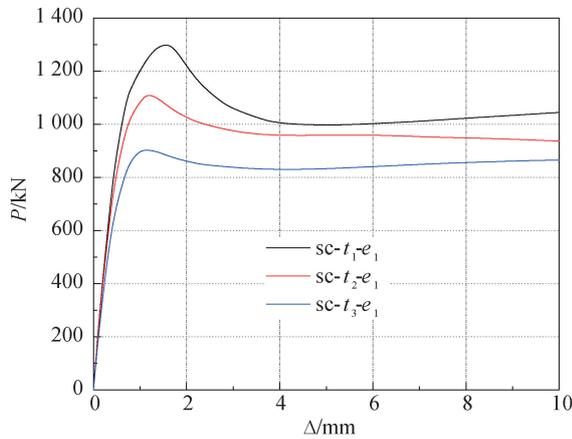


图6 不同偏心距试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 6 Load axial displacement curve of specimens with different eccentricities

4.2.1 承载力

由图6可见,在外钢管壁厚一定,方钢管再生混凝土短柱偏心距逐渐增大的情况下,由于加载初期试件处于弹性阶段刚度均较小,各试件曲线基本重合;荷载增加试件均进入弹塑性阶段,随偏心距增大,峰值荷载降低,对应的峰值应变相应减小。方套圆中空夹层再生混凝土短柱偏心距为20 mm和40 mm的试件与偏心距为0 mm的试件峰值比分别为0.854和0.698,说明模型极限承载力和偏心距的变化呈非线性。

4.2.2 延性

构件的变形能力常用延性来表示,通过计算位移延性系数来有效地评估其变形能力。位移延性系数 μ 由公式(1)求得。

$$\mu = \Delta f / \Delta p \quad (1)$$

式中: Δp 为峰值荷载对应的位移; Δf 为荷载下降到峰值荷载的85%所对应的位移。

峰值过后,曲线进入下降段,试件承载力均有所下降,试件sc- t_1 - e_3 荷载始终未降至极限荷载的85%,表现出较好的延性;试件sc- t_1 - e_1 、sc- t_1 - e_2 延性系数分别为1.856和6.962。总体来看,偏心受压构件延性优于轴心受压,且随偏心距增大延性系数呈上升趋势,原因是试件在偏心荷载作用下跨中截面产生侧向变形,导致变形由纵向转为横向。同时也表明钢管对再生混凝土的约束作用显著;能有效改善再生混凝土的变形性能。

4.3 外钢管壁厚对承载性能的影响

sc- t_1 - e_1 、sc- t_2 - e_1 、sc- t_3 - e_1 的荷载-轴向位移曲线模拟结果见图7。

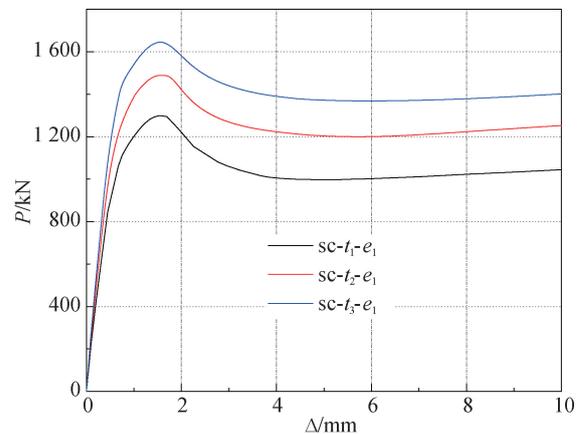


图7 不同外钢管壁厚试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 7 Load axial displacement curve of specimens with different outer steel pipe wall thickness

4.3.1 承载力

由图7可见,加载初期随外钢管壁厚的增加,试件的初始刚度略有增大,随着荷载的增大,外管壁较小的试件刚度退化较早,首先屈服。随外钢管壁厚的增加,试件sc- t_1 - e_1 的峰值荷载较试件sc- t_2 - e_1 和试件sc- t_3 - e_1 分别提高了12.81%和21.22%。

4.3.2 延性

曲线下降段的趋势基本一致,试件延性系数分别为1.856、1.910和2.13。随着钢管壁厚的增加,试件的变形能力增强。下降段后期曲线又表现出上升情况,形成这种曲线的主要原因是由于在试件加载初期,钢管和核心再生混凝土组合效应还未起作用,各自承受荷载,外钢管壁厚较大的试件含钢率大,变形小;随着荷载增大,再生混凝土与钢管之间开始产生组合作用,钢管壁厚度越

大,套箍能力越强,混凝土强度也大幅提高,但由于再生骨料内部本身存在较多的微裂缝,在较大的荷载作用下,微裂缝发生扩展,所以曲线下降段的下降趋势并未减小。由图7可见,方钢管再生混凝土短柱外钢管壁厚的增加对于构件极限承载力的提高有较大作用。

4.4 不同截面形式对承载性能的影响

不同截面形式的方钢管再生混凝土短柱的荷载-轴向位移关系曲线基于模型结果见图8。

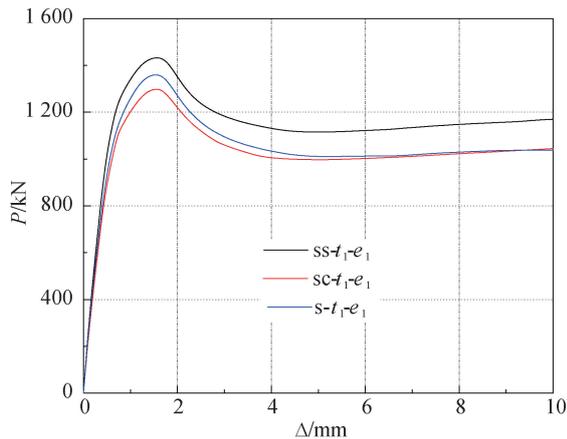


图8 不同截面形式试件荷载-轴向位移曲线

Fig. 8 Load axial displacement curves of specimens with different section forms

4.4.1 承载力

由图8可知,加载初期,曲线接近直线,试件变形较小。弹塑性阶段,各试件达到极限荷载,其中方套方 $ss-t_1-e_1$ 试件的极限荷载最大。偏心距、外钢管壁厚一定的情况下,方实心试件的承载力为1360 kN,方套方中空夹层试件的承载力为1433 kN,较方实心试件提高了约5.1%,方套圆中空夹层试件承载力为1299 kN,较方实心试件降低了约5%。

4.4.2 延性

试件进入塑性阶段,各试件承载力均有所下降, $ss-e_1-t_1$ 、 $sc-e_1-t_1$ 、 $s-e_1-t_1$ 延性系数分别为1.645、1.856、1.592,由此可知,方套圆试件变形能力最好,方套方试件次之,钢管对核心混凝土的约束效果明显。

5 结论

1) 外钢管壁厚不变,偏心距越大,试件初始刚度越小,对应的峰值应变相应减小,峰值荷载越低。

2) 偏心距为0 mm时,钢管壁厚的增加,即套

箍能力的增强,方钢管再生混凝土短柱极限承载力显著提高,曲线下降段平缓且趋势基本一致,后期曲线又表现出上升情况。

3) 方套方中空夹层钢管再生混凝土短柱的承载力最高;方实心与方套圆中空截面试件下降段曲线几乎重合,即后期受力情况与轴向变形几乎一致,同时各截面形式试件均表现出较好延性。

参考文献:

- [1] 黄 靓,林明明,高 畅,等. 钢管含砖骨料再生混凝土柱轴压力学试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(3):699-706.
- [2] 张向冈,陈宗平,薛建阳,等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能影响因素有限元分析[J]. 世界地震工程,2017,33(2):211-219.
- [3] 崔 航. 方钢管型钢再生混凝土偏压柱受力性能研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [4] 陈宗平,何天瑀,徐金俊,等. 钢管再生混凝土柱轴压性能及承载力计算[J]. 广西大学学报:自然科学版,2015,40(4):897-907.
- [5] 杨有福,黄翔宇. 矩形钢管再生混凝土短柱的轴压性能[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2017,45(12):121-127.
- [6] 杨有福,孟春媛. 方中空夹层钢管混凝土横向局压性能研究[J]. 建筑科学与工程学报,2015,32(4):92-98.
- [7] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004(12):1558-1561.
- [8] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007(11):1445-1449.
- [9] KONNO K, SATO Y, KAKUTA Y, et al. Property of Recycled Concrete Column Encased by Steel Tube Subjected to Axial Compression[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute,1997,19(2):231-238.
- [10] UENAKA K, KITO H, SONODA K. Concrete Filled Double Skin Circular Stub Columns under Compression[J]. Steel Construction,2010,48(1):19-24.
- [11] MOHANRAJ E K, KANDASAMY S, MALATHY R. Behaviour of Steel Tubular Stub and Slender Columns Filled with Concrete Using Recycled Aggregates[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering,2011,53(2):31-38.
- [12] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [13] 吴先哲,张兆强,姚 勇. 方钢管再生混凝土长柱偏心受压性能有限元分析[J]. 混凝土与水泥制品,2017(3):39-43.

(下转第74页)

- [5] 赵潇, 马廷霞, 谢娜娜. 地震波动下悬空管道的动力响应分析[J]. 石油机械, 2014, 42(3): 110-114.
- [6] 罗金恒, 赵新伟, 王峰会, 等. 地质灾害下悬空管道的应力分析及计算[J]. 压力容器, 2006(6): 23-26.
- [7] HINDY A, NOVAK M. Earthquake Response of Underground Pipelines[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1979, 7(5): 451-476.
- [8] 王海波, 林皋. 半无限弹性介质中管线地震反应分析[J]. 土木工程学报, 1987(3): 80-91.
- [9] 武立伟. 埋地管道极限悬空长度研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
- [10] 王小龙, 姚安林. 埋地钢管局部悬空的挠度和内力分析[J]. 工程力学, 2008(8): 218-222.
- [11] 杜景水, 马廷霞, 王维斌. 基于小挠度理论的悬空管道力学分析[J]. 油气储运, 2009, 28(1): 16-18+84.
- [12] 盖丽华. 大位移作用下埋地管道性能分析及隔震设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [13] 廖恒, 雷震, 徐晋东, 等. 山地悬空管道地震作用下的动态响应分析[J]. 长江大学学报: 自科版, 2018, 15(9): 51-56+6.
- [14] 雷震. 跨斜滑断层埋地管道力学性能研究[D]. 荆州: 长江大学, 2019.
- [15] 林皋, 朱彤, 林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000(1): 1-8.
- [16] 吕西林, 陈跃庆. 结构-地基相互作用体系的动力相似关系研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 85-92.
- [17] 张志超, 王进廷, 徐艳杰. 跨断层地下管线振动台模型试验研究(I)——试验方案设计[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 93-98.
- [18] JIAO Wenshuai, XU Jindong, TIAN Jiangping, et al. Seismic Response Analysis of Buried Pipelines with the High Drop [J/OL]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, (2021-04-07) [2021-07-21] <http://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.04.007>
- [19] 焦文帅, 徐晋东, 肖伟, 等. 基于振动台模型试验的高落差埋地管道地震响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 193-202.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第6页)

- [14] 李兵, 张齐, 孟爽. 圆钢管再生混凝土短柱轴压承载力有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2014, 30(6): 1037-1043.
- [15] 吴胜, 申兴月, 李迪, 等. 方钢管再生混凝土短柱轴压力学性能有限元分析[J]. 长江大学学报: 自科版, 2015, 12(28): 26-29+37+4.
- [16] 郝江华, 高欣乐, 李超. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(5): 145-148.
- [17] 王依群. 混凝土结构设计计算算例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

(责任编辑 周雪梅)