

方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的力学行为

向星赞,赵人达,贾毅,王永宝

(西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031)

摘 要 目的 研究方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的力学行为,揭示不同参数对其承载力和峰值挠度的影响规律。方法 通过方钢管自密实再生混凝土短柱的偏心受压试验,研究方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的破坏形态,荷载-挠度关系曲线、承载力和峰值挠度。结果 方钢管自密实再生混凝土偏压短柱由于发生侧向挠曲而破坏。方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的荷载-挠度关系曲线可分为弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段。再生粗骨料替代对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力的影响不显著,而对其峰值挠度的影响较显著。偏心率和含钢率对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力和峰值挠度有显著影响。结论 将自密实再生混凝土应用于方钢管混凝土中是可行的,研究成果可为方钢管自密实再生混凝土短柱的工程应用提供理论依据。

关键词 钢管混凝土;自密实再生混凝土;偏压短柱;力学行为

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Mechanical Behavior of the Eccentric Loaded Square Self-compacting Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tube Stub Columns

XIANG Xingyun, ZHAO Renda, JIA Yi, WANG Yongbao

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031)

Abstract: The goals of this paper are to investigate the mechanical behavior of the eccentric loaded square self-compacting recycled aggregate concrete filled steel tube (SCRACFST) stub columns and examine the effects of different parameters on the load-carrying capacity and the peak deflection of the eccentric loaded square SCRACFST stub columns. In order to study the failure patterns, the load-deflection curves, the load-carrying capacity and the peak deflection of the eccentric loaded square SCRACFST stub columns, several square SCRACFST stub columns were tested under eccentric compression. The test results show that the eccentric loaded square SCRACFST stub columns are failure due to the lateral deflection. The load-deflection curves of the eccentric loaded square SCRACFST stub columns can be divided into elastic stage, elastic-plastic stage and de-

收稿日期:2016-11-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200401)

作者简介:向星赞(1985—),男,博士研究生,主要从事新型混凝土材料和钢-混凝土组合结构研究。

scending stage. The recycled coarse aggregate replacement ratio has little significant effects on the load-carrying capacity of the eccentric loaded square SCRACFST stub columns, but has significant effects on the peak deflection of the eccentric loaded square SCRACFST stub columns. The eccentricity ratio and the steel ratio have significant effects on the load-carrying capacity and the peak deflection of the eccentric loaded square SCRACFST stub columns. It is feasible to apply the self-compacting recycled aggregate concrete to the square concrete-filled steel tube stub columns. The research finds can provide theoretical basis for the engineering application of the SCRACFST stub columns.

Key words: concrete-filled steel tube; self-compacting recycled aggregate concrete; eccentric loaded stub columns; mechanical behavior

我国每年产生数以亿吨计的建筑垃圾,其中废弃混凝土的数量已占到建筑垃圾的50%~60%^[1].再生混凝土技术将废弃混凝土加工成再生骨料用于替代天然骨料,既能减轻废弃混凝土造成的环境污染问题,又能节约天然骨料等自然资源,符合可持续发展的战略^[2-3].由于再生混凝土的力学性能和变形性能较普通混凝土低,比如抗压强度、抗拉强度和弹性模量等,限制了再生混凝土的应用范围^[4-8].钢管再生混凝土使再生混凝土处于钢管的约束和保护下,能有效改善再生混凝土强度较低和耐久性性能较差的缺点^[9].然而在钢管混凝土的施工中,存在振捣困难甚至无法振捣的问题,造成核心混凝土的浇筑质量难以控制^[10-11].钢管与核心混凝土之间的协同互补作用是确保钢管混凝土的组合效应得到发挥的关键因素,因此必须保证核心混凝土的浇筑质量和密实度^[11].如果采用普通振捣混凝土,核心混凝土容易出现空洞等缺陷,而且易造成混凝土与钢管壁脱粘形成空腔,使得钢管混凝土的组合效应无法发挥,严重时会导致钢管局部失稳甚至承载力严重不足^[12].自密实混凝土在自身重力作用下便可密实成型,尤其适用于难以浇筑和振捣困难的结构,能够避免核心混凝土出现浇筑质量问题^[13-14].

将再生混凝土、自密实混凝土和钢管混凝土相结合,形成钢管自密实再生混凝土组合结构,能发挥各自的优点,克服各自的不足,

具有重要的工程应用价值.目前,国内外学者对钢管普通混凝土的力学行为已经进行了大量的试验研究和理论分析,为钢管普通混凝土的应用提供了科学支撑.由于自密实再生混凝土的工作性能和力学性能与普通混凝土存在差别,导致钢管自密实再生混凝土的承载能力和变形能力与钢管普通混凝土存在差异.因此,钢管普通混凝土的研究成果并不完全适用于钢管自密实再生混凝土.

在工程结构中,由于荷载作用位置的不定性导致钢管混凝土构件实际处于偏心受力状态.方形截面的钢管混凝土具有节点构造简单、施工更方便,抗弯性能更好等优点,比圆形截面更适合于承受偏心压力作用^[15-16].因此,笔者开展了方钢管自密实再生混凝土短柱的偏心受压试验,以揭示方钢管自密实再生混凝土短柱在偏心受压状态下的力学行为,为方钢管自密实再生混凝土的工程应用提供理论依据.

1 试验

1.1 试验设计

蔡绍怀^[17]认为钢管混凝土短柱是指可以忽略压曲效应的柱,当钢管混凝土柱的长径比或长宽比小于4时,可以称之为短柱.韩林海^[18]建议钢管混凝土短柱标准试件的长径比或长宽比应取为3.试验共设计制作了15个方钢管自密实再生混凝土短柱,主要变

化参数为再生粗骨料替代率、偏心率和含钢率. 所有试件的长度均为 600 mm,截面宽度均为 200 mm,长宽比均为 3,主要参数如表 1 所示.

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of the specimens

编号	长/mm	宽/mm	厚/mm	偏心距/mm	含钢率/%	再生粗骨料替代率/%
SE-4-0-2	600	200	4	20	8.51	0
SE-4-1-2	600	200	4	20	8.51	50
SE-4-2-2	600	200	4	20	8.51	100
SE-4-0-4	600	200	4	40	8.51	0
SE-4-1-4	600	200	4	40	8.51	50
SE-4-2-4	600	200	4	40	8.51	100
SE-4-0-6	600	200	4	60	8.51	0
SE-4-1-6	600	200	4	60	8.51	50
SE-4-2-6	600	200	4	60	8.51	100
SE-5-2-2	600	200	5	20	10.80	100
SE-5-2-4	600	200	5	40	10.80	100
SE-5-2-6	600	200	5	60	10.80	100
SE-6-2-2	600	200	6	20	13.17	100
SE-6-2-4	600	200	6	40	13.17	100
SE-6-2-6	600	200	6	60	13.17	100

1.2 材料性能

方钢管的材料性能按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》的规定通过拉伸试验确定,结果如表 2 所示. 再生粗骨料来源于原始强度为 C60 的混凝土结构,原生混凝土经过机械破碎、筛分和清洗后形成粒径为 5~20 mm 的再生粗骨料. 自密实再生混凝土的材料性能按照《普通混凝土力学性

能试验方法标准》的规定通过抗压强度试验确定,结果如表 3 所示.

表 2 方钢管的材料性能

Table 2 Material properties of the square steel tubes

编号	钢管厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
SST-4	4	334	465
SST-5	5	318	443
SST-6	6	307	436

表 3 自密实再生混凝土的材料性能

Table 3 Material properties of the self-compacting recycled aggregate concrete

编号	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/10 ⁴ MPa	再生粗骨料替代率/%
SCRAC-0	72.8	59.2	3.38	0
SCRAC-1	67.7	56.1	3.15	50
SCRAC-2	61.5	51.7	2.99	100

1.3 加载和测量方案

加载装置采用 10 000 kN 压力试验机,正式试验前对试件进行预加载,并检查试验装置和采集设备的可靠性,确保正式试验的顺利进行. 采用分级加载制度,每级加载的持

荷时间约为 3~5 min. 当荷载接近极限荷载时,慢速持续加载,当荷载达到极限荷载后,仍继续慢速加载,并不断进行数据采集,直到试件的承载力急剧下降且弯曲变形迅速增长时才停止加载,试验装置如图 1 所示.



图1 试验装置

Fig.1 Test set-up

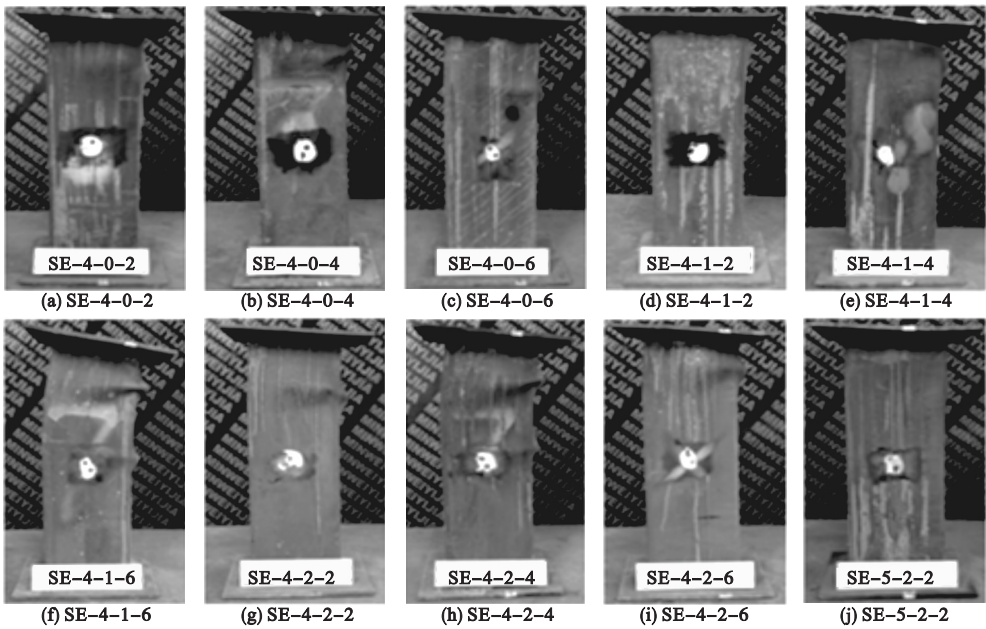
采用压力试验机自带的力传感系统测量作用在试件上的荷载,在试件的纵向布置电测位移计测量试件的纵向变形,同时在试件高度的1/2处布置电测位移计测量试件的横向弯曲挠度.在方钢管的中部沿纵向及横向共粘贴八片电阻应变片测量纵向应变和横向应变.应变及位移计的数值通过共和电业的UCAM-65B自动采集仪进行数据记录,荷载数值通过压力试验机的采集系统自动记录.

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

刚开始加载时,试件的纵向变形和挠度随荷载的增大而线性增大,试件的外观无明显变化,试件处于弹性阶段;当荷载达到极限荷载的70%~80%后,试件的纵向变形和挠度加速增大,荷载的增加速度逐渐变慢,方钢管表面开始出现轻微鼓曲,试件已进入弹塑性阶段;当荷载达到极限荷载以后,试件已进入破坏阶段,方钢管表面多处出现明显的局部鼓曲.方钢管自密实再生混凝土偏压短柱都呈现塑性破坏状态,说明方钢管对核心自密实再生混凝土的约束作用使其由脆性破坏转变为塑性破坏.

方钢管自密实再生混凝土偏压短柱由于发生侧向挠曲而破坏,而且属于强度破坏.当偏心距较小时,局部鼓曲多出现在试件的1/4高度处附近,如图2中试件SE-4-0-2和SE-4-1-4的破坏状态;当偏心距较大时,试件的弯曲变形更为严重,且在试件的1/2高度处和1/4高度处附近均出现局部鼓曲,如图2中试件SE-4-1-6和SE-4-2-4的破坏状态.



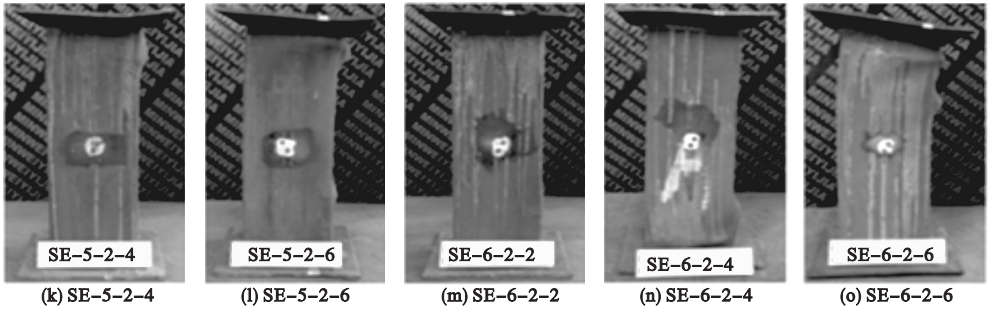


图 2 试件破坏形态
Fig. 2 Failure patterns of the specimens

2.2 荷载 - 挠度关系曲线

方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的荷载 - 挠度关系曲线如图 3 所示,图中 t 表示钢管厚度, ρ 表示再生粗骨料替代率, N 表示承载力, u 表示弯曲挠度. 从图 3 中可以看出,方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的荷载 - 挠度关系曲线可分为弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段.

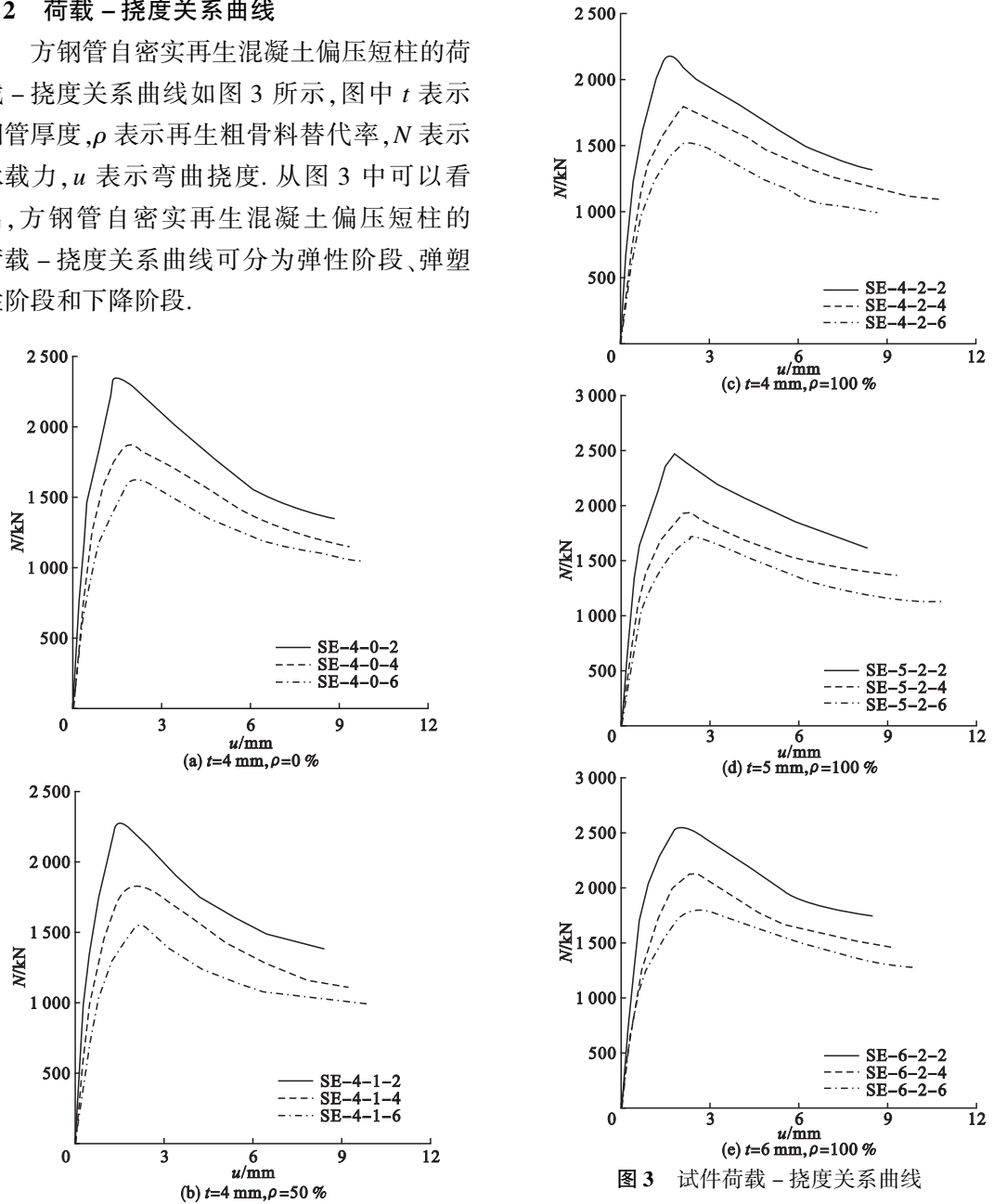


图 3 试件荷载 - 挠度关系曲线
Fig. 3 Load-deflection curves of the specimens

从受荷初期到极限荷载的 70% ~ 80% , 偏压短柱的挠度随荷载的增长呈线性增长, 荷载 - 挠度关系曲线近似为直线, 偏压短柱处于弹性工作阶段. 随着荷载的不断增大, 当荷载超过极限荷载的 70% ~ 80% 以后, 荷载 - 挠度关系曲线的斜率逐渐减小而且呈现出非线性关系, 偏压短柱处于弹塑性工作阶段, 在此阶段钢管对核心自密实再生混凝土产生非均匀的约束作用. 当荷载超过极限荷载以后, 荷载 - 挠度关系曲线呈现下降趋势, 荷载不断下降, 而挠度迅速增大, 受拉区的钢管弯曲而受压区的钢管鼓曲, 核心自密实再生混凝土截面的受压区面积不断减小而受拉区面积不断增大.

3 影响因素分析

3.1 再生粗骨料取代率

采用承载力 N 和峰值挠度 U_p 分析再生粗骨料替代率 ρ 对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱力学行为的影响. 再生粗骨料替代率对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力的影响如图 4 所示.

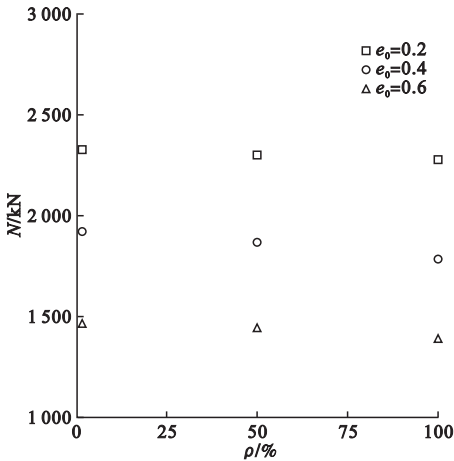


图 4 再生粗骨料取代率对承载力的影响

Fig. 4 Effects of recycled coarse aggregate replacement ratio on load-carrying capacity

从图 4 中可知, 当偏心率 $e_0 = 0.2$ 时, 随着替代率 ρ 的增大, 承载力 N 由 2 351 kN 下降到 2 179 kN, 下降幅度达到 7.3% ; 当偏心

率 $e_0 = 0.4$ 时, 随着替代率 ρ 的增大, 承载力 N 由 1 876 kN 下降到 1 792 kN, 下降幅度达到 4.5% ; 当偏心率 $e_0 = 0.6$ 时, 随着替代率 ρ 的增大, 承载力 N 由 1 635 kN 下降到 1 529 kN, 下降幅度达到 6.5% . 所有方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力均随着再生粗骨料替代率的增大而降低, 但是承载力的下降幅度均在 7.3% 以内, 表明再生粗骨料替代率对承载力的影响不显著. 自密实再生混凝土的强度随着再生粗骨料替代率的增大而降低是导致方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力降低的主要原因.

再生粗骨料替代率对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度的影响如图 5 所示. 从图 5 中可知, 当偏心率 $e_0 = 0.2$ 时, 随着替代率 ρ 的增大, 峰值挠度 U_p 由 1.42 mm 增大到 1.62 mm, 增加幅度达到 14.1% ; 当偏心率 $e_0 = 0.4$ 时, 随着替代率 ρ 的增大, 峰值挠度 U_p 由 1.92 mm 增大到 2.09 mm, 增加幅度达到 8.9% ; 当偏心率 $e_0 = 0.6$ 时, 随着替代率 ρ 的增大, 峰值挠度 U_p 由 2.10 mm 增大到 2.15 mm, 增加幅度达到 2.4% . 所有方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度均随着再生粗骨料替代率的增大而增大, 而且峰值挠度的最大增幅达到 14.1% , 表明

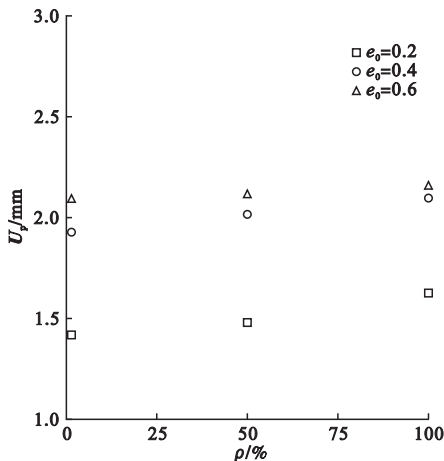


图 5 再生粗骨料取代率对峰值挠度的影响

Fig. 5 Effects of recycled coarse aggregate replacement ratio on peak deflection

再生粗骨料替代率对峰值挠度的影响较显著. 自密实再生混凝土的强度随着再生粗骨料替代率的增大而降低导致方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载能力降低,使得方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度随着再生粗骨料替代率的增大而增大.

3.2 偏心率

采用承载力 N 和峰值挠度 U_p 分析偏心率 e_0 对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱力学行为的影响. 偏心率对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力的影响如图 6 所示. 从图 6 中可知,当钢管厚度 $t=4\text{ mm}$ 时,随着偏心率 e_0 的增大,承载力 N 由 2 179 kN 下降到 1 529 kN,下降幅度达到 29.8%;当钢管厚度 $t=5\text{ mm}$ 时,随着偏心率 e_0 的增大,承载力由 2 461 kN 下降到 1 709 kN,下降幅度达到 30.6%;当钢管厚度 $t=6\text{ mm}$ 时,随着偏心率 e_0 的增大,承载力 N 由 2 547 kN 下降到 1 805 kN,下降幅度达到 29.1%. 所有方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力均随着偏心率的增大而降低,而且承载力的最大降幅达到 30.6%,表明偏心率对承载力有显著影响. 方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力随着偏心率的增大而降低是由于弯矩随着偏心率的增大而增大.

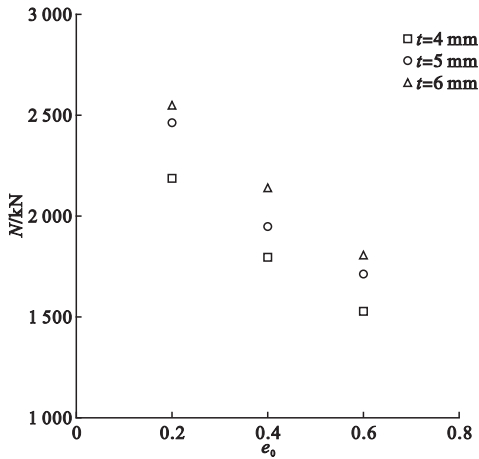


图 6 偏心率对承载力的影响

Fig. 6 Effects of eccentricity ratio on load-carrying capacity

偏心率对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度的影响如图 7 所示. 从图 7 中可知,当钢管厚度 $t=4\text{ mm}$ 时,随着偏心率 e_0 增大,峰值挠度 U_p 由 1.62 mm 增大到 2.15 mm,增加幅度达到 32.7%;当钢管厚度 $t=5\text{ mm}$ 时,随着偏心率 e_0 的增大,峰值挠度 U_p 由 1.77 mm 增大到 2.29 mm,增加幅度达到 29.4%;当钢管厚度 $t=6\text{ mm}$ 时,随着偏心率 e_0 的增大,峰值挠度 U_p 由 1.89 mm 增大到 2.46 mm,增加幅度达到 30.2%. 所有方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度均随着偏心率的增大而增大,而且峰值挠度的最大增幅达到 32.7%,表明偏心率对峰值挠度有显著影响. 弯矩随着偏心率的增大而增大是导致方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度随着偏心率的增大而增大的主要原因.

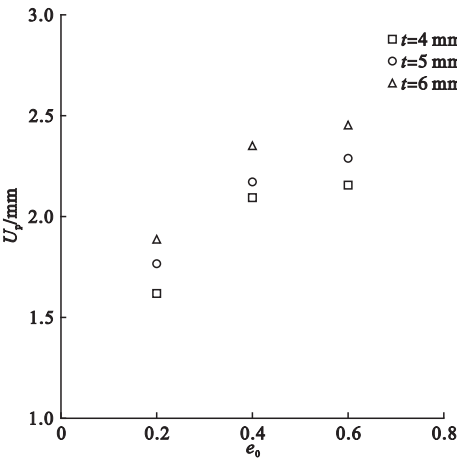


图 7 偏心率对峰值挠度的影响

Fig. 7 Effects of eccentricity ratio on peak deflection

3.3 含钢率

采用承载力 N 和峰值挠度 U_p 分析含钢率 α 对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱力学行为的影响. 含钢率对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力的影响如图 8 所示. 从图 8 中可知,当偏心率 $e_0=0.2$ 时,随着含钢率 α 的增大,承载力 N 由 2 179 kN 增大到 2 547 kN,增加幅度达到 16.9%;当偏

心率 $e_0=0.2$ 时,随着含钢率 α 的增大,承载力 N 由 1 792 kN 增大到 2 137 kN,增加幅度达到 19.3%;当偏心率 $e_0=0.6$ 时,随着含钢率 α 的增大,承载力 N 由 1 529 kN 增大到 1 805 kN,增加幅度达到 18.1%. 所有方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力均随着含钢率的增大而增大,而且承载力的最大增幅达到 19.3%,表明含钢率对承载力有显著影响. 方钢管对核心自密实再生混凝土的约束作用由于含钢率的增大而增大导致方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力随着含钢率的增大而增大.

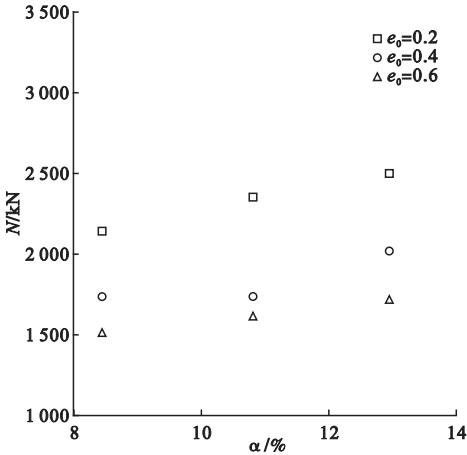


图8 含钢率对承载力的影响

Fig. 8 Effects of steel ratio on load-carrying capacity

含钢率对方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度的影响如图 9 所示. 从图 9 中可知,当偏心率 $e_0=0.2$ 时,随着含钢率 α 的增大,峰值挠度 U_p 由 1.62 mm 增大到 1.89 mm,增加幅度达到 16.7%;当偏心率 $e_0=0.4$ 时,随着含钢率 α 的增大,峰值挠度 U_p 由 2.09 mm 增大到 2.35 mm,增加幅度达到 12.4%;当偏心率 $e_0=0.6$ 时,随着含钢率 α 的增大,峰值挠度 U_p 由 2.15 mm 增大到 2.46 mm,增加幅度达到 14.4%. 所有方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度均随着含钢率的增大而增大,而且峰值挠度的最大增幅达到 16.7%,表明含钢率对峰值

挠度有显著影响. 方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的峰值挠度随着含钢率的增大而增大的主要原因是方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力随着含钢率的增大而增大.

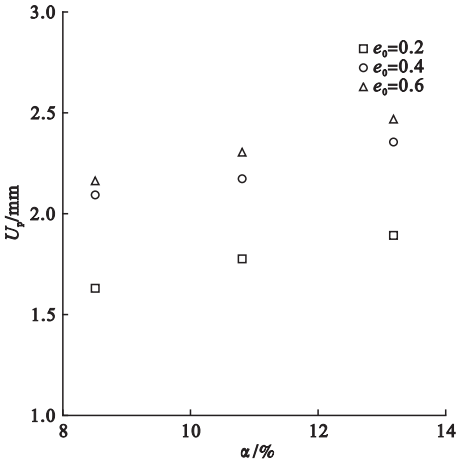


图9 含钢率对峰值挠度的影响

Fig. 9 Effects of steel ratio on peak deflection

4 结 论

- (1)方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的荷载-挠度关系曲线可分为弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段.
- (2)随着再生粗骨料替代率的增大,方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力减小而峰值挠度增大,但是再生粗骨料替代率对其承载力的影响不显著,而对其峰值挠度的影响较显著.
- (3)随着偏心率的增大,方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力减小而峰值挠度增大,而且偏心率对其承载力和峰值挠度有显著影响.
- (4)随着含钢率的增大,方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的承载力和峰值挠度均增大,而且含钢率对其承载力和峰值挠度有显著影响.

参考文献

[1] 周宏敏,柴俊,柴华,等. 再生骨料混凝土技术及其研究现状[J]. 混凝土,2008(12): 75 - 76.

- (ZHOU Hongmin, CHAI Jun, CHAI Hua, et al. Introduction of recycled aggregate concrete technology and current research situation [J]. Concrete, 2008(12):75-76.)
- [2] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003(10):17-20.
- (XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete-A review [J]. Concrete, 2003(10):17-20.)
- [3] 王兴国, 李力, 王文华. 再生混凝土性能特点及应用前景[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012(1):95-99.
- (WANG Xingguo, LI Li, WANG Wenhua. Application prospect and characteristic of recycled concrete performance [J]. Journal of Henan polytechnic university (natural science), 2012(1):95-99.)
- [4] ETXEBERRIA M, VÁZQUEZ E, MARÍ A, et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete[J]. Cement and concrete research, 2007, 37(5):735-742.
- [5] GOMEZ-SOBERON J M. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study [J]. Cement and concrete research, 2002, 32(8):1301-1311.
- [6] TOPÇU I B, ŞENGEL S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate [J]. Cement and concrete research, 2004, 34(8):1307-1312.
- [7] TOPÇU I B, GÜNÇAN N F. Using waste concrete as aggregate[J]. Cement and concrete research, 1995, 25(7):1385-1390.
- [8] XIAO J, LI J, ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading[J]. Cement and concrete research, 2005, 35(6):1187-1194.
- [9] 陈娟, 曾磊. 钢管再生混凝土短柱轴压力学性能试验[J]. 兰州理工大学学报, 2013(3):112-116.
- (CHEN Juan, ZENG Lei. Experiment on the mechanical performance of axial compression of recycled concrete-filled steel-tubular stub columns[J]. Journal of Lanzhou university of technology, 2013(3):112-116.)
- [10] 王国杰, 郑建岚. 自密实钢管混凝土的研究与应用[J]. 混凝土, 2006(3):57-61.
- (WANG Guojie, ZHENG Jianlan. Researching and applying self-compacting concrete filled steel tubes[J]. Concrete, 2006(3):57-61.)
- [11] 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(自然科学版), 2001(6):24-34.
- (HAN Linhai, TAO Zhong, LIU Wei. Concrete filled steel tubular structures from theory to practice[J]. Journal of Fuzhou university (natural science), 2001(6):24-34.)
- [12] 张凯峰, 刘永道, 吴雄, 等. 钢管混凝土界面脱空机理及检测技术研究进展[J]. 混凝土, 2013(6):154-156.
- (ZHANG Kaifeng, LIU Yongdao, WU Xiong, et al. Development on disengaging mechanism and testing technology of the interface of concrete filled steel tube[J]. Concrete, 2013(6):154-156.)
- [13] SONEBI M. Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans [J]. Cement and concrete research, 2004, 34(7):1199-1208.
- [14] BOUZOUBA N, LACHEMI M. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results [J]. Cement and concrete research, 2001, 31(3):413-420.
- [15] 柯晓军, 陈宗平, 薛建阳, 等. 方钢管再生混凝土短柱轴压承载性能试验研究[J]. 工程力学, 2013(8):35-41.
- (KE Xiaojun, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study on the bearing capacity of recycled aggregate concrete-filled square steel tube short columns under axial compression[J]. Engineering mechanics, 2013(8):35-41.)
- [16] 王菁, 蒋晓东, 李四平, 等. 方钢管混凝土偏压柱承载力计算的正割公式[J]. 建筑结构, 1998(9):48-51.
- (WANG Jing, JIANG Xiaodong, LI Siping, et al. Secant formula for computation of the ultimate loading of concrete-filled square steel tubular columns under eccentric compression [J]. Building structure, 1998(9):48-51.)
- [17] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- (CAI Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.)
- [18] 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. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2004.)