

钢管-RBSCC 短柱偏压性能研究

王建超¹, 宋洪缘¹, 马光卓²

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 华博建筑设计院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 以再生块体强度、再生块体粒径、自密实混凝土强度、轴向力偏心距、钢管壁厚为参数, 设计制作了 12 根试件, 通过对其进行了偏心受压承载力试验, 以研究钢管-RBSCC 短柱偏心受压性能。研究表明: 再生块体强度、自密实混凝土强度、含钢率对偏心受压承载力产生正相关影响; 偏心距对偏心受压承载力产生负相关的影响, 且影响程度最大; 再生块体粒径对偏压承载力产生正相关的影响, 但影响程度较小, 实际计算时, 可以忽略; 针对该类结构可采用本文建议的钢管-RBSCC 短柱偏心受压承载力计算方法进行计算, 为废弃混凝土的工程应用提供了一种途径。

关键词: 钢管自密实混凝土; 偏心受压; 试验研究; 承载力计算; 再生块体

中图分类号: TU317⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)03-0331-07

Study on bias performance of steel tube-RBSCC short column

WANG Jianchao¹, SONG Hongyuan¹, MA Guangzhuo²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Shenyang Architectural Design Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: Taking the RB strength, RB particle size, SCC strength, eccentricity of axial force and wall thickness of steel pipe as parameters, 12 specimens are designed and manufactured in this paper. Through the eccentric compression bearing capacity test, the eccentric compression performance of steel tube RBSCC short column is studied. The results show that the RB strength, the SCC strength and the steel content have a positive correlation effect on the eccentric compression bearing capacity; Eccentricity has a negative correlation effect on the bearing capacity of eccentric compression, and the influence degree is the largest; The RB particle size has a positive correlation effect on the eccentric bearing capacity, but the influence degree is small, which can be ignored in the actual calculation; For this kind of structure, the calculation method of eccentric compression bearing capacity of steel tube RBSCC short column proposed in this paper can be used to calculate, which provides a way for the engineering application of waste concrete.

Key words: steel pipe self compacting concrete; eccentric compression; experimental study; bearing capacity calculation; regenerated block

自从进入 21 世纪以来, 我国开始了大规模基建, 到近年来提出的“可持续发展”战略。对于建筑行业来说, 随着科技的进步, 各类建筑层出不穷, 并伴随产生大量建筑废料。因此, 近年来再生混凝土受到了大量学者的研究^[1-3], 但是, 由于再生混凝土的制备需要消耗较多资源以及对设备损耗较大, 所以, 解决资源问题势在必行。为解决在实际应用过程中再生块体存在的上述问题, 我们通过将块体粒径变大的方式, 减少在制作再生块体的过程中对环境产生的污染以及能耗问题。国内学者吴波课题组^[4-8]已经进行了部分研究, 将

废弃混凝土破碎成了大的节段型与混凝土组成再生块体混凝土结构。并对其进行实验研究, 探究了应用于钢管混凝土、混凝土板等结构中的力学性能。文献[4]将再生混凝土大骨料块体与节段混入钢管混凝土短柱中进行了轴压试验, 探究了薄壁钢管再生混合短柱的力学性能。文献[5]将再生大骨料应用于混凝土板中, 得出了再生大骨料混凝土板的承载力折减系数为 0.95 的结论。文献[6]探究了再生大骨料与自密实混凝土混合后试件的力学性能, 提出了试件组合强度和峰值应变的计算方法。文献[7]通过采用大尺度废弃混凝土掺入

收稿日期: 2021-05-19

修改稿日期: 2022-05-23

基金项目: 辽宁省高等学校创新团队基金资助项目(LT201911); 辽宁省教育厅基金资助项目(lnjc202023)

第一作者: 王建超(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事再生混凝土力学性能方面的研究。E-mail: wangjianchao005@163.com

钢管混凝土短柱、钢板混合墙和组合楼板中进行了力学性能探究. 文献[8]将节段型再生骨料掺入到薄壁钢管中, 并对其轴压性能进行了试验研究, 结果表明该种结构的承载力与薄壁钢管再生混凝土承载力相当.

目前国内针对自密实混凝土已经出版了相应的规范^[12]. 冯乃谦、徐仁崇、余志武等^[13-15]针对自密实混凝土的配合比进行了有关研究, 并对自密实混凝土进行多种方式的力学测试, 均能满足要求. 安雪晖等^[16]指出高性能自密实混凝土的造价从常规混凝土的 1.5 倍到目前下降到 1.1~1.2 倍, 经济效益更加明显. 文献[17]通过提出了一个理论模型, 研究了自密实混凝土的填充能力对质量的影响; 文献[18]研究了在火灾情况下温度升高对自密实混凝土的影响, 给出了自密实混凝土在高温状态下的应力-应变本构关系.

国外学者 Anatoly L 等^[19]研究发现, 在钢管中加入自密实混凝土可以使自密实混凝土试件强度提高 10% 左右, 同时, 试件的弹性极限可以提高 20%~33%, 在预应力试件中效果更加明显; 学者 YU Feng^[20]经过试验研究发现再生粗骨料自密实钢管混凝土柱在偏压状态下, 偏压长柱发生屈曲破坏, 而短柱发生鼓形屈曲破坏; Leila Shahryari^[21]研究了在自密实混凝土中加入再生骨料与高炉矿渣对力学性能的影响, 并进行多种方式的实验对比, 研究表明, 再生粗骨料对自密实混凝土力学性能产生的正面影响大于再生细骨料.

根据以上学者的研究成果, 对再生块体的应用提出了一种新的方法. 为保证钢管内部混凝土的浇筑质量, 本文采用分层浇筑的方法以提高试验的准确性. 首先在钢管中逐层放入粒径为 50~100 mm 的再生块体, 然后分层浇筑自密实混凝土, 待养护完成, 最后形成钢管-RBSCC (钢管再生块体自密实混凝土). 本文通过改变再生块体 (RB) 粒径、再生块体强度、自密实混凝土 (SCC) 强度、偏心距、钢管壁厚等参数, 共制作了 12 根试件. 用以研究钢管-RBSCC 短柱在偏压状态下, 上述参数变化对极限承载力的影响规律. 通过对

12 根试件试验数据的比较分析, 给出了针对钢管-RBSCC 构件偏心受压承载力的计算方法.

1 试验概况

1.1 材料制备

(1) 钢管用 Q235 号钢材, 设计使用 $t=4、5、6$ mm 三种壁厚, 其各项参数的实测值见表 1.

表 1 钢材参数
Tab. 1 Steel parameters

| $t_{\text{设计}}/\text{mm}$ | 钢管壁厚/mm | 屈服强度/GPa | 极限强度/GPa | 弹性模量/GPa | 泊松比 |
|---------------------------|---------|----------|----------|----------|-------|
| 4 | 3.79 | 0.353 | 0.525 | 193.6 | 0.268 |
| 5 | 4.35 | 0.320 | 0.444 | 219.2 | 0.284 |
| 6 | 5.78 | 0.296 | 0.438 | 211.8 | 0.253 |

(2) 再生块体取自本校结构实验室的废弃混凝土构件, 废弃构件按原设计强度分为 C30、C40、C50, 龄期在 0.5~1 a 之间, 考虑到多数废弃构件不满足钻芯要求, 我们采用回弹法进行无损检测, 测得废弃混凝土构件强度分别为 30.2 MPa、47.5 MPa、53.8 MPa, 随后进行机械破碎, 对个别不规则大碎块进行人工破碎, 并筛分成 50~70 mm、70~85 mm、85~100 mm 三个粒径范围, 如图 1 所示.



图 1 再生块体

Fig. 1 Regenerated block

(3) 采用 42.5 普通硅酸盐水泥, 一级粉煤灰, 二级中区砂, 5~10 mm 碎石, 聚羧酸系高性能减水剂原液 (液体, 掺量为胶凝材料质量的 2%), 具体参数见表 2.

表 2 自密实混凝土材料掺量及立方体试块抗压强度

Tab. 2 Material content of SCC and the strength of the cube

| 强度等级 | 水泥 /(kg·m ⁻³) | 粉煤灰 /(kg·m ⁻³) | 水 /(kg·m ⁻³) | 石子 /(kg·m ⁻³) | 砂 /(kg·m ⁻³) | 减水剂 /% | SCC 实测强度 /MPa |
|------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------|------------------|
| C30 | 357 | 136 | 221 | 880 | 749 | 2 | 51.3 |
| C40 | 381 | 109 | 221 | 880 | 790 | 2 | 55.3 |
| C50 | 406 | 100 | 209 | 880 | 790 | 2 | 62.0 |

1.2 试件设计与制作

设计制作长径比为 $L/D=3$ 的 12 根偏压短柱试件. 设计参数有再生块体粒径、自密实混凝土强度、再生块体强度、轴向力偏心距、钢管壁厚. 表 3 为偏压试件设计分组.

首先保持钢管对中, 焊接试件的下盖板, 随

后放置再生块体, 在放置前需将再生块体在前一天放入水中浸泡 24 h, 然后拿出放置饱和面干, 目的是防止再生块体吸水率过高对实验数据的准确性产生影响. 然后浇筑 20 mm 的自密实混凝土, 再放 1 层再生块体, 以此为循环直至浇筑完成, 然后养护 28 d, 最后焊接上盖板. 见图 2.

表 3 偏压试件参数
Tab. 3 Parameters of eccentric compression members

| 编号 | 高度 L /mm | 厚度 D /mm | SCC 强度 | RB 强度 | RB 粒径 | 厚度 _实 /mm | 含钢率 $\alpha/\%$ | 偏心距 /mm | 偏压承载力/kN | | 误差/ $\%$ |
|-----|---------------|---------------|--------|-------|--------|------------------------|--------------------|------------|----------|-------|----------|
| | | | /MPa | /MPa | /mm | | | | 试验值 | 计算值 | |
| P0 | 600 | 200 | 62.0 | 47.5 | 70-85 | 4.36 | 9.33 | 0 | 2 893 | 2 909 | -0.55 |
| P1 | | | 62.0 | 47.5 | 70-85 | 4.36 | 9.33 | 20 | 2 120 | 2 097 | 1.07 |
| P2 | | | 62.0 | 47.5 | 70-85 | 4.36 | 9.33 | 40 | 1 635 | 1 640 | -0.30 |
| P3 | | | 62.0 | 47.5 | 70-85 | 4.36 | 9.33 | 60 | 1 364 | 1 346 | 1.30 |
| P4 | | | 62.0 | 47.5 | 70-85 | 3.78 | 8.01 | 40 | 1 590 | 1 613 | -1.44 |
| P5 | | | 62.0 | 47.5 | 70-85 | 5.74 | 12.55 | 40 | 1 750 | 1 811 | -3.50 |
| P6 | | | 62.0 | 47.5 | 50-70 | 4.36 | 9.33 | 40 | 1 627 | 1 636 | -0.54 |
| P7 | | | 62.0 | 47.5 | 85-100 | 4.36 | 9.33 | 40 | 1 681 | 1 643 | 2.29 |
| P8 | | | 62.0 | 30.2 | 70-85 | 4.36 | 9.33 | 40 | 1 540 | 1 536 | 0.26 |
| P9 | | | 62.0 | 53.8 | 70-85 | 4.36 | 9.33 | 40 | 1 752 | 1 672 | 4.55 |
| P10 | | | 51.3 | 47.5 | 70-85 | 4.36 | 9.33 | 40 | 1 569 | 1 575 | -0.41 |
| P11 | | | 55.3 | 47.5 | 70-85 | 4.36 | 9.33 | 40 | 1 605 | 1 607 | -0.11 |

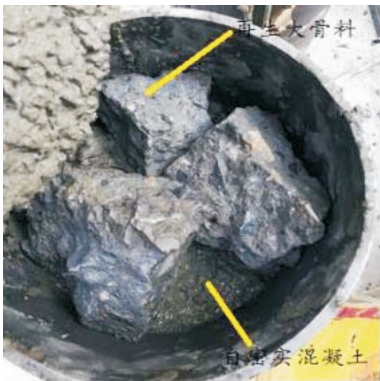


图 2 试件浇筑

Fig. 2 Casting the specimens

50~70 mm、70~85 mm、85~100 mm 三个粒径区间的再生块体混入量分别为 37.56%、34.34%、31.09%. 混入量为再生块体与浇筑后去除钢管后试件的总质量之比. 试件养护见图 3.



图 3 试件养护

Fig. 3 Maintenance of the specimens

1.3 RBSCC 组合强度验证

为了对试件进行组合强度验证, 本文通过改变再生块体、自密实混凝土的强度, 以及调整两者掺入量比例的方式来研究对组合强度的影响, 采用上述三种调整方式浇筑成 5 组 150 mm 的立方体试块, 每组 3 块, 薄膜覆盖标准养护 28 d. 具体参数见表 4.

表 4 立方体试块分组
Tab. 4 Grouping of cubes

| 强度组合 | 组 1 | 组 2 | 组 3 | 组 4 | 组 5 |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|
| SCC 强度/MPa | 51.3 | 55.3 | 62.0 | 62.0 | 62.0 |
| RB 强度/MPa | 47.5 | 47.5 | 47.5 | 30.2 | 53.8 |
| RB 混入量/ $\%$ | 20.6 | 20.6 | 20.7 | 20.3 | 20.6 |
| 抗压强度实测 /MPa | 49.3 | 53.2 | 56.8 | 50.5 | 59.1 |
| 抗压强度计算 /MPa | 49.9 | 52.9 | 56.1 | 49.8 | 58.1 |
| 强度差/ $\%$ | 1.40 | -0.57 | -1.25 | -1.41 | -1.72 |

对再生混合构件进行组合强度计算, 可采用吴波^[5,9]给出的组合强度公式(1)进行计算.

$$f_{cu,com} = \left(\frac{f_{cu,old}}{f_{cu,new}} \right) \times f_{cu,new} \times (1 - \eta) + \left(\frac{f_{cu,new}}{f_{cu,old}} \right)^{1.1\eta} \times f_{cu,old} \times \eta \quad (1)$$

式中: $f_{cu,com}$ 为混合混凝土实测强度; $f_{cu,new}$ 为新拌

混凝土实测强度; $f_{cu,old}$ 为废弃混凝土实测强度。

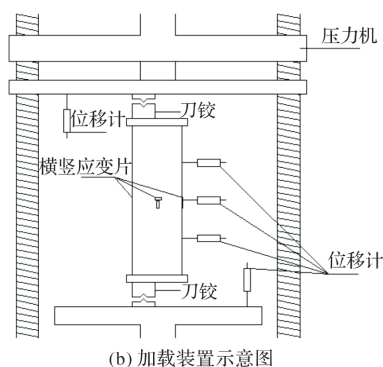
由表4中强度差值可知,用吴波给出的组合强度公式与实验真实数据相差不大,说明可以用公式(1)对试件的抗压强度进行计算。

1.4 加载装置与测点布置

偏心受压试验在5 000 kN压力机上进行,用刀铰控制偏心距。首先在加载板上下两端各设置1个竖向位移计,共计2个竖向位移计。然后在试件上设置4个测点,每个测点打磨光亮,用502胶水贴横竖两片电阻应变片,共计8个应变片。四个测点分布在钢管的四个方向。最后在试件受拉侧四分点处分别设置1个横向位移计,共计3个横向位移计。如图4所示。



(a) 试验加载装置



(b) 加载装置示意图

图4 偏压试验加载装置

Fig. 4

在实验之前,为检查测试仪器设备、位移计、应变片的工作情况及数据读取情况是否存在异常,可先进行预加载。随后进行分级加载,前期加载迅速,每级加载为极限荷载的1/15,直至加载到预估极限承载力的70%左右,载荷时间大约三min。第二阶段加载缓慢,加载后期接近预估极限承载力,此阶段需缓慢持续地加载并进行数据采集,加载过快会对后期数据质量产生影响。直到试件主体发生较大的变形时停止加载。

2 试验结果与分析

2.1 偏压实验现象

当P2~P11试件加载到极限承载力的75%左右、P0和P1试件加载到极限承载力的80%左右

时,试件端部附近均开始出现屈曲现象,并且表面开始出现覆盖物,随着荷载的持续增加,铁锈慢慢剥离掉落,并且钢管内部出现轻微声响。荷载继续增加,P0、P1试件受压区高度1/3和2/3处发生鼓曲变形且逐渐明显,P2~P11试件受压区高度1/3、1/2、2/3处发生鼓曲变形且逐渐明显,并且钢管内部出现明显声响。试件达到最大承载力,所有构件均为强度破坏,其中P0、P1试件挠曲的变形相对较小,P2、P4~P11试件表现出一定的挠曲变形,P3试件挠曲变形相对较大。

每个试件的具体变形如图5所示。



图5 偏压试件变形图

Fig. 5 Deformation diagram of eccentric compression specimens

钢管表面剥开后内部典型破坏如图6所示。由图6可见,内部RBSCC浇筑良好。受压侧混凝土被压碎但是被钢管压实鼓起。在受拉侧混凝土无混凝土压碎现象,在试件中部有垂直于试件高度方向的裂缝向两端延伸,并且越来越短。可见钢管对核心RBSCC有紧箍力的作用,但是受压区钢管的紧箍力要远大于受拉区。



图6 混合混凝土破坏图

Fig. 6 Failure diagram of mixed concrete

2.2 荷载与柱中侧向挠度和纵向应变变化规律

(1) 轴向力偏心距对荷载-柱中侧向挠度曲线的影响

图7(a)为钢管-RBSCC偏心受压短柱极限承载力随偏心距的变化曲线。从曲线上可以看出,当偏心距为0 mm时,极限承载力为2 893 kN;当偏心距为20 mm时,极限承载力为2 120 kN,比偏心距为0 mm时减小26.7%。当偏心距为40 mm时,极限承载力为1 624 kN;比偏心距为0 mm时减小43.9%。当偏心距为60 mm时,极限承载力为1 354 kN,比偏心距为0 mm时减小53.2%。从以上数据可知,试件的极限承载力随偏心距的增加而减小;

(2) 含钢率对荷载-柱中侧向挠度曲线的影响

图7(b)为钢管-RBSCC偏心受压短柱极限承载力随含钢率的变化曲线。从曲线上可以看出,当

含钢率为8.01%(钢管实测壁厚 $t=3.78$ mm)时,试件的极限承载力为1 590 kN.当含钢率为9.33%(钢管实测壁厚 $t=4.36$ mm)时,试件的极限承载力为1 635 kN,比含钢率为8.01%时增加2.83%.当含钢率为12.55%(钢管实测壁厚 $t=5.74$ mm)时,试件的极限承载力为1 750 kN,比含钢率为8.01%时增加10.06%.从以上数据可知,钢管-RBSCC偏压短柱极限承载力随着管壁厚度的增加而增加;

(3) 再生块体粒径对荷载-柱中侧向挠度曲线的影响

图7(c)为钢管-RBSCC偏心受压短柱极限承载力随再生块体粒径的变化曲线.从曲线上可以看出,试件的极限承载力随着粒径的增大而呈现增大趋势,当再生块体粒径区间为50~70 mm时,试件的极限承载力为1 627 kN;当再生块体粒径区间为70~85 mm时,试件的极限承载力为1 635 kN,相比再生块体粒径区间为50~70 mm时提高0.5%;当再生块体粒径区间为85~100 mm时,试件的极限承载力为1 655 kN,相比再生块体粒径区间为50~70 mm时提高1.7%.即试件的极

限承载力随着再生块体粒径增大而提高,但是再生块体粒径对试件极限承载力的影响并不大;

(4) 再生块体强度对荷载-柱中侧向挠度曲线的影响

图7(d)为钢管-RBSCC偏心受压短柱极限承载力随再生块体强度的变化曲线.从曲线上可以看出,当再生块体强度分别为30.2 MPa、47.5 MPa、53.8 MPa时,极限承载力为1 540 kN、1 635 kN、1 778 kN;后两个试件的极限承载力相继提升了6.2%和15.5%.由此可知,随着再生块体强度的提高,钢管-RBSCC偏心受压短柱的承载力增大;

(5) 自密实混凝土强度对荷载-柱中侧向挠度曲线的影响

图7(e)为钢管-RBSCC偏心受压短柱极限承载力随自密实混凝土强度的变化曲线.从曲线上可以看出,当自密实混凝土强度为51.3 MPa、55.3 MPa、62.0 MPa时,试件极限承载力分别为1 569 kN、1 605 kN、1 635 kN.后两个试件的极限承载力相继提升了2.3%和4.2%.由此可知,随着自密实混凝土强度的提高,钢管-RBSCC偏心受压短柱的承载力增大.

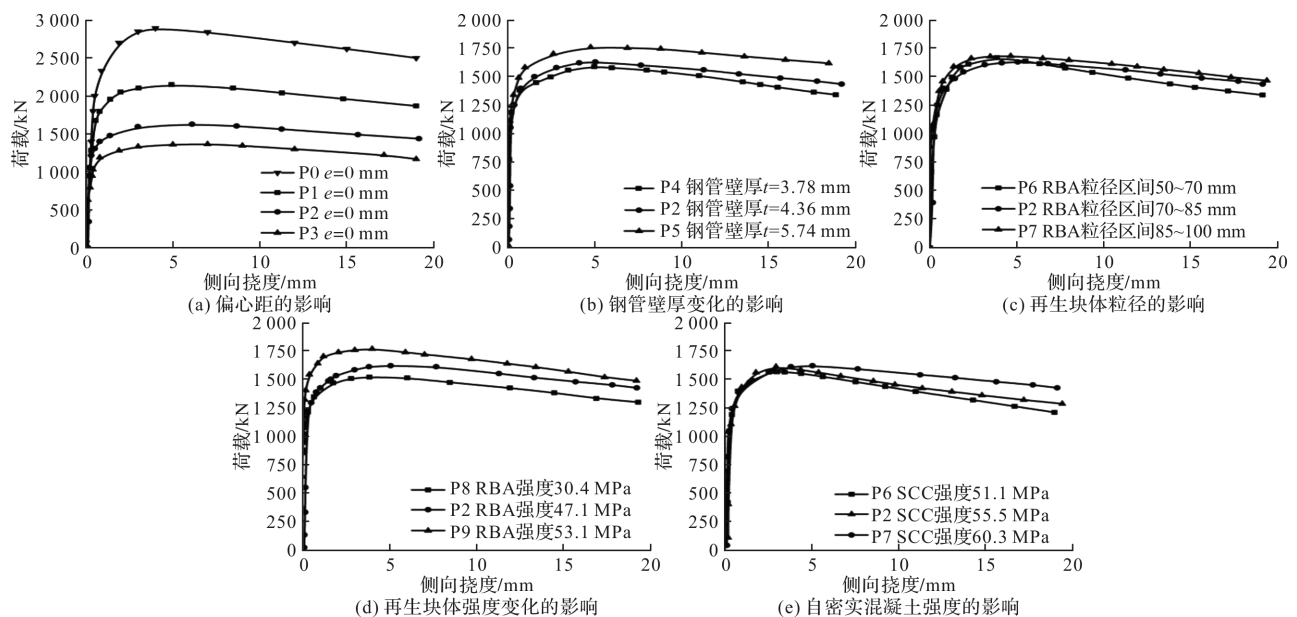


图7 荷载-侧向位移曲线图

Fig. 7 Load-lateral displacement

图8所示为所有试件在偏心受压状态下受拉侧和受压侧柱中处应变随荷载的变化曲线.图中每个试件均给出两条曲线,其中压应变为负,拉应变为正.通过图像可以看出,基本分为两个阶段,第一阶段为线性阶段(小于极限荷载的80%阶段),荷载-纵向应变基本保持线性,为弹性阶段.第二阶段为非线性阶段(大于极限荷载的80%阶段),试件进入弹塑性阶段,在达到极限荷载后,设备加载值产生轻微波动,表示钢管开始屈服,应变

急速增加.对于偏心距为20 mm的试件,初始弯矩较小,加载初期试件整体为受压状态,随着荷载的继续增加,由于压弯作用试件开始发生侧向弯曲,受拉侧的压应变越来越小逐渐转为拉应变.对于偏心距为40 mm和60 mm的试件,由于初始弯矩比较大,所以在加载初期存在受拉区.随着荷载的持续增加,试件的拉应变急速增加.极限荷载以后,荷载-纵向应变曲线开始下降,表明中和轴逐渐开始偏向受压区,核心混凝土裂缝区域

扩大. 通过对比可以看出, 由于钢管对混凝土的约束性提高了混凝土的抗压性能, 使得受拉区比受压区的应变值更小, 同时, 偏压柱的受压区变

形能力也优于受拉区. 钢管在荷载增长缓慢时应变继续增大, 表明钢管的延性性能得到了良好的发挥.

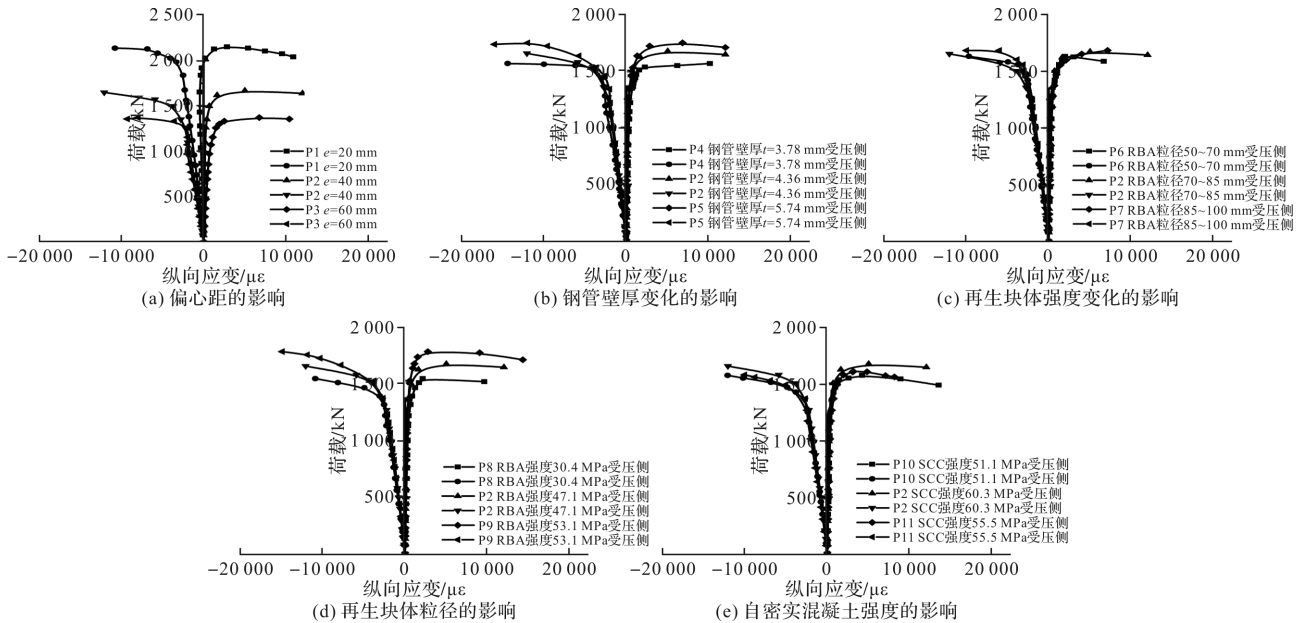


图8 五种参数变化对荷载-纵向应变曲线的影响

Fig. 8 The influence of five parameters on load-vertical strain curve

3 承载力计算

本文参考相关研究成果^[10-11], 给出其具体计算方法.

$$N_0 = \varphi_c N_u \quad (2)$$

式中: N_0 偏压承载力; φ_c 偏心折减系数, 按式(6)、(7)计算; N_u 轴压承载力, 按式(3)、(4)计算.

当 $\xi_c \leq 1.235$ 时

$$N_u = A_c f_c (1 + 2\xi_c) \quad (3)$$

当 $\xi_c \geq 1.235$ 时

$$N_u = A_c f_c (1 + \sqrt{\xi_c} + \xi_c) \quad (4)$$

$$\xi_c = \frac{A_y f_y}{A_c f_c} \quad (5)$$

式中: ξ_c 约束效应系数, 按式(5)计算; A_c 截面混凝土面积; A_y 截面钢管面积; f_c 混凝土轴心抗压强度, MPa; f_y 钢管的屈服强度, MPa.

当 $e_0/r_c \leq 1.55$ 时

$$\varphi_c = \frac{1}{1 + c \frac{e_0}{r_c}} \quad (6)$$

当 $e_0/r_c \geq 1.55$ 时,

$$\varphi_c = 0.4/e_0 \cdot r_c^{-1} \quad (7)$$

式中: r_c 试件截面半径, mm; e_0 初始偏心距, mm.

按照上式计算的钢管-RBSCC 的偏心受压承载力列于表3. 通过对比发现, 本文给出的计算方法

可以用于该种构件的承载力计算.

4 结论

本文针对钢管-RBSCC 短柱开展了偏心受压试验研究, 得到主要结论如下:

(1) 钢管-RBSCC 短柱偏心受压承载力随偏心距的增加而减小, 随含钢率、再生块体粒径、再生块体强度、自密实混凝土强度的增加而增加; 对承载力的影响从大到小依次为偏心距、含钢率、再生块体强度和自密实混凝土强度, 再生块体粒径对其承载力影响可以忽略;

(2) 本文建议的钢管-RBSCC 短柱偏心受压承载力计算方法可以用于该类结构的计算, 为废弃混凝土的工程应用提供了一种途径.

参考文献 References

- [1] 牛海成, 曹万林, 董宏英, 等. 钢管高强再生混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6): 128-135.
NIU Haicheng, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Experimental study on axial compression performance of high strength recycled concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Building Structure, 2015, 36(6): 128-135
- [2] WANG Y Y, CHEN J, GENG Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns[J]. Engineering Structures, 2015, 86: 192-212.

- [3] CAO V V. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete-filled steel tubes under axial loading[J]. International Journal of Civil Engineering, 2019(17): 1341-1351.
- [4] 吴波,刘伟,刘琼祥,等.薄壁钢管再生混合短柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(8):22-28.
WU Bo, LIU Wei, LIU Qiongxiang, et al. Experimental study on axial compression performance of thin-walled steel tubular recycled mixed short columns[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 22-28
- [5] 吴波,陈宇菲.再生块体混凝土板的冲切性能试验研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(8): 1-8.
WU Bo, CHEN Yufei. Experimental study on punching performance of recycled block concrete slab[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 1-8
- [6] 吴波,刘璐,赵霄龙.自密实再生混合混凝土的单轴受压试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(2):74-78,126.
WU Bo, LIU Lu, ZHAO Xiaolong. Experimental study on self compacting recycled concrete under uni-axial compression[J]. Journal of Building Structure, 2016, 37(2): 74-78, 126
- [7] 吴波,赵新宇,杨勇.采用大尺度废弃混凝土的再生混合构件研究进展[J].华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(10):174-183.
WU Bo, ZHAO Xinyu, YANG Yong. Research progress of recycled composite members using large-scale waste concrete[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(10): 174-183
- [8] 吴波,刘伟,刘琼祥,等.薄壁钢管再生混合短柱轴压性能试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(8):22-28.
WU Bo, LIU Wei, LIU Qiongxiang, et al. Experimental study on axial compression performance of thin-walled steel tubular recycled mixed short columns[J]. Journal of Building Structure, 2010, 31(8): 22-28
- [9] WU B, ZHANG S, YANG Y, Compressive behaviors of cubes and cylinders made of normal-strength demolished concrete blocks and high-strength fresh concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 342-353.
- [10] 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 concrete filled steel tubular structure [M]. Beijing: People's Communications Press, 2003
- [11] 钟善桐.钢管混凝土结构[M].第3版.北京:清华大学出版社,2003.
ZHONG Shantong. Concrete filled steel tubular structure [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.自密实混凝土应用技术规程,JGJ/T 283-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for application of self compacting concrete: JGJ/T 283-2012 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012
- [13] 冯乃谦,叶浩文,马展祥.超高性能自密实混凝土的研发与超高泵送技术[J].施工技术,2018,47(6): 117-122.
FENG naiqian, YE Haowen, MA Zhanxiang. Research and development of ultra-high performance self compacting concrete and ultra-high pumping technology [J]. Construction Technology, 2018, 47(6): 117-122
- [14] 徐仁崇,陈茜,苏艺凡,等. C30~C60 自密实混凝土的配制及性能研究[J].混凝土与水泥制品,2014,(2): 9-12.
XU renchong, CHEN Qian, SU Yifan, et al. Study on preparation and performance of C30~C60 self compacting concrete[J]. Concrete and Cement Products, 2014, (2): 9-12
- [15] 余志武,潘志宏,谢友均,等.浅谈自密实高性能混凝土配合比的计算方法[J].混凝土,2004(1): 54-57.
YU Zhiwu, PAN Zhihong, XIE Youjun, et al. Discussion on the calculation method of mix proportion of self compacting high performance concrete[J]. Concrete, 2004(1): 54-57
- [16] 安雪晖,金峰,石建军.自密实混凝土充填堆石体试验研究[J].混凝土,2005,(1): 3-6.
AN Xuehui, JIN Feng, SHI Jianjun. Experimental study on filling rockfill with self compacting concrete [J]. Concrete, 2005, (1): 3-6
- [17] LIU Wenju, PAN Jianwen. Filling capacity evaluation of self-compacting concrete in rock-filled concrete. [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 13(1): 108.
- [18] ASLANI F, SAMALI B. Constitutive relationships for self-compacting concrete at elevated temperatures[J]. 2015, 48(1): 337-356.
- [19] ANATOLY L, KRISHAN, MARIA A, et al. Strength of axially loaded concrete filled steel tube elements of self-stressing concrete[J]. Key Engineering Materials, 2019, 792: 160-165.
- [20] YU Feng, LIN Longlong, FANG Yuan, et al. Mechanical behavior of recycled coarse aggregates self compacting concrete filled steel tubular columns under eccentric compression[J]. Structural Concrete, 2019, 20(6): 2000-2014.
- [21] LEILA Shahryari, MARYAM Nafisinia, MOHAMMAD Hadi Fattahi. Investigation of effects of recycled aggregates and blast furnace slag on properties of self-compacting concrete [J]. NEDUET Journal of Research, 2020, XVII(3): 1-14.

(编辑 吴海西 沈波)