

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201807186

圆钢管 RPC 轴压短柱有限元分析与承载力计算

戎 芹^{1,2}, 曾宇声², 侯晓萌², 菅 伟², 郑文忠³

(1. 哈尔滨理工大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150080;
2. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
3. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘 要: 圆钢管 RPC 柱可为大跨、高层与高耸建筑、重载工程建设提供性能优越的竖向构件。现有圆钢管 RPC 轴压短柱承载力计算公式适用于直径不大于 152 mm 的钢管 RPC 柱, 对大直径钢管 RPC 柱, 计算值偏大。为研究大直径圆钢管 RPC 轴压短柱承载力计算公式, 利用 ABAQUS 有限元软件, 建立了圆钢管 RPC 轴压短柱分析模型, 完成了 134 种钢管 RPC 轴压短柱受力全过程分析, 研究了 RPC 相对约束应力与钢管位移曲线的关系, 揭示了套箍系数、核心 RPC 强度等对其荷载-位移曲线的影响规律。结果表明: 当套箍系数小于 0.5 时, 钢管 RPC 柱荷载-位移曲线不存在强化段; 当套箍系数大于 0.5 时, 钢管 RPC 柱荷载-位移曲线出现强化段; 当套箍系数达到 1 时, 强化段极限荷载相对于承载力的提升将超过 30%, 延性更好。相同截面尺寸的圆钢管 RPC 柱, 随核心 RPC 轴心抗压强度降低, 其横向变形系数增大, 钢管对核心 RPC 的约束作用增强。基于试验和数值分析结果, 提出了直径达 560 mm 圆钢管 RPC 轴压短柱极限承载力计算公式。

关键词: 圆钢管 RPC; 轴压; 有限元; 套箍系数; 承载力

中图分类号: TU318.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)12-0061-06

Finite element analysis and bearing capacity calculation for RPC-filled circular steel tube columns under axial compression

RONG Qin^{1,2}, ZENG Yusheng², HOU Xiaomeng², JIAN Wei², ZHENG Wenzhong³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;
3. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: RPC-filled circular steel tube columns can be applied in long-span buildings, high-rise structures, and heavy loading constructions due to its excellent mechanical performance as vertical members. Currently, the formula of load-bearing capacity of RPC-filled circular steel tube column under axial compression is only applicable for the ones with a diameter less than 152 mm. When the diameter is larger than 152 mm, the calculated value is larger than test data. To solve this problem, finite element analysis on RPC-filled circular steel tube columns under axial compression was conducted using ABAQUS. The relationship of RPC confining stress ratio and RPC-filled circular steel tube column displacement curves were investigated. A total of 134 load-displacement curves of RPC-filled circular steel tube columns were calculated. Results show that when the confinement index is less than 0.5, there is no strengthening stage in load-displacement curves of the RPC-filled circular steel tube columns; when the confinement index is larger than 0.5, the strengthening stage in load-displacement curves occurs; when the confinement index reaches 1, the ultimate load increases as much as 1.3 times that of the loading bearing capacity, and the ductility becomes higher. With same cross section of RPC-filled circular steel tube column, the lateral deformation coefficient and the confinement effect on core RPC increase with the decrease of RPC strength. Based on the results of experimental and numerical analysis, the calculation formula on bearing capacity of RPC-filled circular steel tube column under axial compression with diameter as large as 560 mm were proposed.

Keywords: RPC-filled circular steel tube; axial compression; finite element; confinement index; bearing capacity

收稿日期: 2018-07-25
基金项目: 国家自然科学基金(51408167);
黑龙江省自然科学基金(QC2017058);
黑龙江省青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017085)
作者简介: 戎 芹(1982—), 女, 博士, 讲师;
侯晓萌(1982—), 男, 副教授, 博士生导师;
郑文忠(1965—), 男, 博士生导师, 长江学者特聘教授
通信作者: 侯晓萌, houxiaomeng_hit@126.com.

在土木工程中推广超高强材料和新型结构, 是提高结构性能和发展绿色建筑的有效方法。钢管 RPC 可为大跨、高层与高耸建筑、重载工程建设提供性能优越的竖向构件。多位学者展开了钢管 RPC 柱力学性能研究^[1-2]。文献[3]进行了不同配合比

的 RPC 试块以及钢管 RPC 短柱轴压承载能力研究,发现水胶比从 0.16 增大到 0.2 时, RPC 试块强度降低 4.7%, 钢管 RPC 短柱承载力下降 15.7%。文献[4]进行了 18 根圆钢管 RPC 短柱的轴心受压试验,提出了直径不大于 152 mm 的圆钢管 RPC 承载力计算式;文献[5]对比分析了 40 根钢管 RPC 短柱试验结果,建立了钢管 RPC 轴压短柱承载力计算式。

以上研究表明,现有圆钢管 RPC 轴压短柱承载力计算公式适用于直径不大于 152 mm 的钢管 RPC 柱,对大直径钢管 RPC 柱,计算值偏大。在超高层建筑中,钢管混凝土柱直径已超过 2 m^[6]。目前,中国尚缺乏圆钢管 RPC 轴压短柱相关设计标准。针对上述问题,本文利用 ABAQUS 有限元软件,提出损伤塑性模型中参数的取值建议,对 134 种钢管 RPC 短柱轴压荷载受力全过程进行分析,揭示截面尺寸、套箍系数、钢材强度、核心 RPC 强度对 RPC 轴压短柱荷载-位移曲线的影响规律;结合已有试验结果,建立圆钢管 RPC 轴压短柱承载力的计算公式。

1 有限元分析模型的建立与验证

1.1 材料的本构模型

采用 ABAQUS 有限元软件建立钢管 RPC 轴压短柱分析模型。模型中钢材采用理想弹塑性模型。钢材的屈服强度取实测值,密度取为 7 850 kg/m³,弹性模量取为 200 GPa,泊松比取为 0.3。

核心 RPC 采用文献[7]提出的塑性损伤模型模拟。RPC 塑性损伤模型所需单轴受压应力-应变曲线及单轴受拉应力-应变曲线分别采用文献[8]的单轴受压试验和文献[9]的单轴受拉试验结果。在 RPC 拉压力学性能试验的基础上,提出了塑性损伤模型中膨胀角 φ 、偏心距 ε 、双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度之比 σ_{l0}/σ_{c0} 、拉伸子午面上与压缩子午面上的第二应力不变量之比 k_c 、黏滞系数 μ 等关键参数的取值建议。

参数 φ 和 ε 取值决定了流势面的形状,以 70.7 mm × 70.7 mm × 220 mm 的 RPC 棱柱体受压应力-应变关系模拟结果与实测结果的对比,确定膨胀角 φ 、偏心距 ε 的取值。图 1 为膨胀角不同取值对 RPC 应力-应变关系影响曲线,结果表明,当 φ 取为 25°~40°时,随 φ 增大,应力-应变曲线下降段的斜率变缓,膨胀角取为 38°时,模拟结果与文献[8]试验结果吻合较好。由于偏心距 ε 对应力-应变曲线影响较小,有限元分析中,建议取 1.0。

屈服面由 σ_{l0}/σ_{c0} 和 k_c 两个参数决定。参考文献[10]完成的 RPC200 双轴受压试验,确定参数

σ_{l0}/σ_{c0} 的值为 1.14, k_c 为 RPC 屈服面在扁平面上投影的形状参数,投影为三角形时取 0,圆形时取 0.666 7,本文建议取值 0.666 7。图 2 为黏滞系数不同取值与文献[8]试验结果对比曲线,发现黏滞系数的取值对曲线影响较大。随着黏滞系数的增大,应力-应变曲线的峰值增大,下降段斜率变缓。当 $\mu = 0.002$ 时,模拟结果与文献[8]试验结果吻合较好。采用 5 个关键参数计算的 RPC 受压应力-应变关系与文献[11]的试验结果也吻合较好(具体对比结果详见文献[12]),说明这 5 个关键参数的取值可用于后续计算分析。

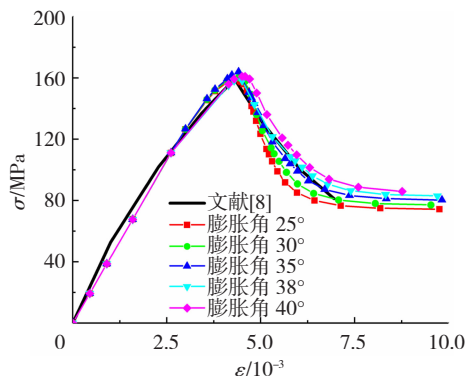


图 1 膨胀角 φ 与试验结果对比曲线

Fig. 1 Influence of φ on stress-strain curves of RPC test

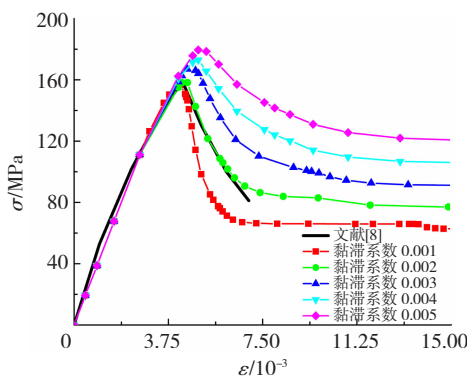


图 2 黏滞系数 μ 与试验结果对比曲线

Fig. 2 Influence of μ on stress-strain curves of RPC test

1.2 钢管与核心 RPC 的接触

钢管与核心 RPC 的接触包括切向(沿钢管竖直方向)和法向(垂直于接触面)两个部分。其中法向接触采用硬接触,切向接触采用库仑摩擦模型,摩擦系数取为 0.25^[13]。核心区 RPC 采用三维八节点实体单元 C3D8R,钢管采用四节点壳单元 S4R,划分网格大小为 1 cm。完全约束柱底端自由度,柱顶两个水平方向不施加约束,仅在柱顶端施加轴向荷载(位移荷载)。

1.3 有限元模型验证

采用 ABAQUS 软件建立了钢管 RPC 柱有限元分析模型,与文献[12,14]完成的圆钢管 RPC 轴压

短柱试验进行对比,以验证有限元模型的正确性.图 3 为试件荷载-位移曲线试验值与有限元计算值的对比.与文献[12]对比表明,在荷载-位移曲线弹性阶段,计算值与实测值吻合良好;随后钢材屈服进入塑流阶段,曲线出现下降段,也基本吻合,在之后的承载力回升阶段,有限元计算的回升速率略快于试验结果.与文献[14]试验结果对比看出,试件 CFT3、CFT4 的有限元计算曲线与试验曲线均较为接近.有限元分析钢管 RPC 柱 m-245-8 破坏后变形云图和试验后柱实际破坏情况见图 4,均呈现腰鼓型破坏.结合图 3、4 可知,有限元模拟结果与试验结果吻合较好,可用于圆钢管 RPC 轴压短柱受力性能分析.

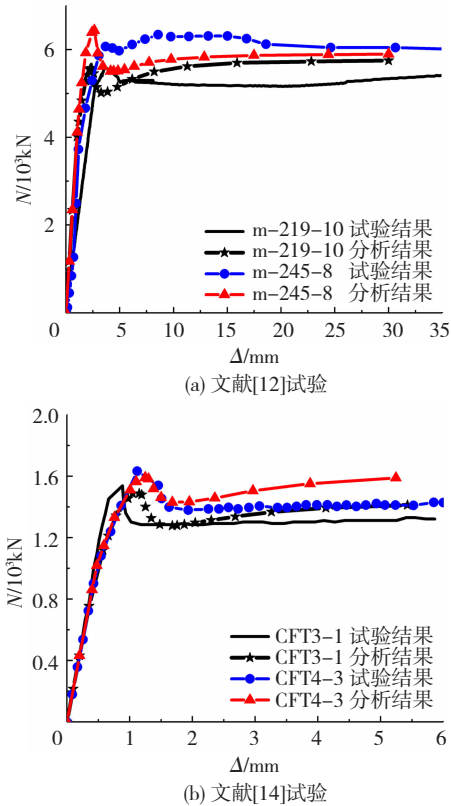


图 3 有限元计算曲线与试验曲线比较

Fig. 3 Comparison of load-displacement curves from FEA and the test

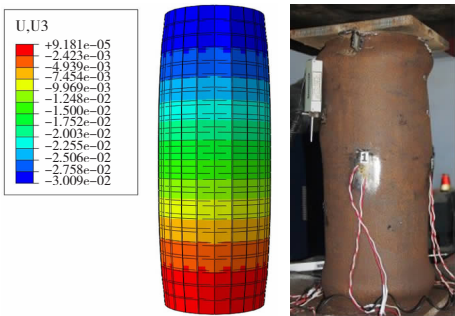


图 4 试件 m-245-8 有限元变形与试验变形对比

Fig. 4 Comparison of deformation of specimen m-245-8 from FEA and the test

2 参数分析

基于 ABAQUS 有限元模型,完成 134 种 RPC 轴压短柱受力过程分析,为消除柱长和外径之比过大影响柱轴压承载力的问题,本文分析的钢管 RPC 短柱,其柱长和外径之比均为 3.由于不同钢管 RPC 试件荷载位移曲线规律相似,本节参数分析仅以部分典型试件为例,研究钢管径厚比、套箍系数、核心 RPC 强度与钢材强度等对钢管 RPC 荷载-位移曲线的影响和钢管对核心 RPC 约束作用的影响规律.

2.1 钢管径厚比

通过变换钢管厚度或钢管外径分析钢管径厚比变化对钢管 RPC 轴压短柱力学性能的影响规律,分析模型参数见表 1、2.相同外径、不同钢管厚度对钢管 RPC 短柱荷载-位移曲线的影响见图 5,其中 N 为轴压力, Δ 为试件的整体纵向位移.当钢管外径相同时,随着钢管厚度的增大,钢管径厚比减小,套箍系数增大,钢管对核心区 RPC 的约束作用增强,试件的峰值承载力提高,极限承载力得到改善,表现出良好的延性.不同外径、相同厚度时,径厚比变化对圆钢管 RPC 短柱荷载-位移曲线的影响见图 6.

表 1 相同外径、不同厚度的试件参数

Tab. 1 Parameters of specimens with the same diameter						
$D \times t \times L/\text{mm}$	D/t	f_y/MPa	f_c/MPa	A_s/mm^2	A_c/mm^2	ξ
133 × 3 × 400	44.3	290	109	1 225	12 668	0.257
133 × 4.5 × 400	29.5	290	109	1 817	12 076	0.400
133 × 6.5 × 400	20.5	290	109	2 583	11 310	0.608

表 2 不同外径、相同厚度的试件参数

Tab. 2 Parameters of specimens with the same thickness						
$D \times t \times L/\text{mm}$	D/t	f_y/MPa	f_c/MPa	A_s/mm^2	A_c/mm^2	ξ
110 × 5 × 300	22.0	310	115.8	1 648.5	7 850.0	0.562
133 × 5 × 465	26.6	310	115.8	2 009.6	11 876.3	0.453
152 × 5 × 450	30.4	310	115.8	2 307.9	15 828.7	0.390

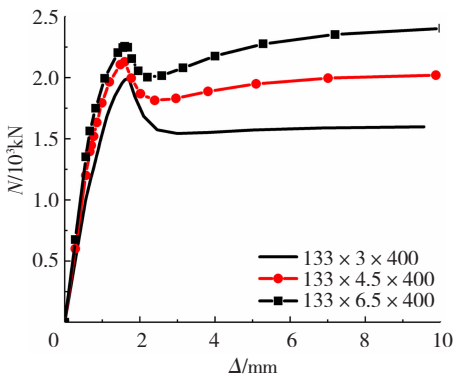


图 5 不同钢管厚度时荷载-位移曲线对比

Fig. 5 Curves of specimens with different tube thicknesses

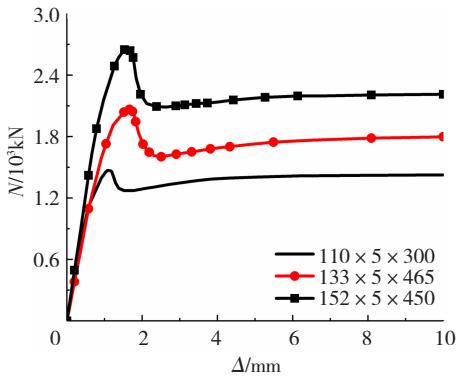


图 6 不同钢管外径时荷载 - 位移曲线对比

Fig. 6 Curves of specimens with different tube diameters

结果表明,当钢管厚度相同时,试件的截面尺寸越大,轴压承载力越高,但径厚比变大,含钢率减小,套箍系数减小,钢管对核心区 RPC 的约束作用减弱,试件达到峰值承载力后曲线下降较为明显,且试件承载力的回升程度也明显低于含钢率较大的试件。

2.2 套箍系数

套箍系数 ξ ($\xi = A_s f_y / A_c f_c$) 对钢管 RPC 承载力有较大的影响。 ξ 越大,钢管所占的比重越大,核心区 RPC 所占的比重相对越小,套箍作用大。对工程常用范围内 16 种不同截面尺寸 ($1 \text{ mm} \leq t \leq 45 \text{ mm}$ 、 $110 \text{ mm} \leq D \leq 560 \text{ mm}$),共 134 种不同套箍系数 ($0.051 \leq \xi \leq 1.972$) 的钢管 RPC 柱进行模拟分析,获得其荷载 - 位移曲线,得到套箍系数对下降段影响的界限值。其中 f_y 和 f_c 分别取 310 和 100 MPa。图 7 给出了不同套箍系数试件的荷载 - 位移曲线。

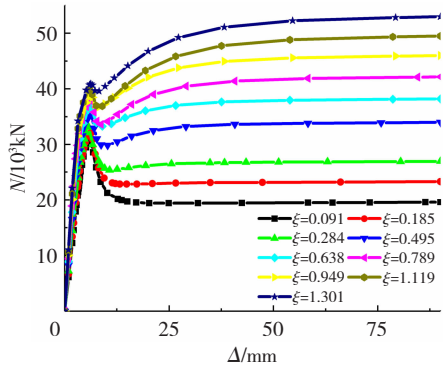


图 7 钢管 RPC 轴压短柱 ($D = 560 \text{ mm}$) 荷载 - 位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of RPC-filled circular steel tubes ($D = 560 \text{ mm}$)

当套箍系数小于 0.5 时,钢管 RPC 柱荷载 - 位移曲线不存在强化段;当套箍系数达到 0.5 ~ 0.6 时,钢管 RPC 试件在轴压荷载作用下,在达到极限承载力之后,极限荷载下降到原来的 80% ~ 85%,之后随着荷载的继续施加,试件的极限荷载逐渐回升,并与峰值荷载(荷载 - 位移曲线第一个峰值点对应的荷载)持平。套箍系数继续增加,则荷载的回升将超过峰值荷载,当套箍系数达到 1 时,试件在达

到峰值荷载之后,极限荷载的下降幅度很小,仅为 5% 左右,荷载的回升将超过峰值荷载的 30%,荷载继续施加,钢管 RPC 荷载 - 位移曲线呈现回升段,表现出良好的延性。

2.3 核心 RPC 轴心抗压强度

变化核心区 RPC 轴心抗压强度,分析其对钢管 RPC 短柱受压力学性能的影响规律。其中钢管的屈服强度 f_y 为 290 MPa,试件截面尺寸 $D \times t \times L$ 均为 $133 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,核心 RPC 轴心抗压强度 f_c 分别为 75、100、125、150、175 和 200 MPa。RPC 抗压强度变化对钢管 RPC 短柱的荷载 - 位移曲线的影响如图 8 所示。分析发现:试件承载能力随着核心 RPC 轴心抗压强度的提高而增大,但 RPC 轴心抗压强度越高,钢管对核心 RPC 的约束作用相对减弱,约束后 RPC 承载力提升幅度减小;模型中 RPC75 的抗压强度最低,套箍系数最大,承载力的提升幅度达到 33%,即钢管对 RPC75 试件的约束作用更强。

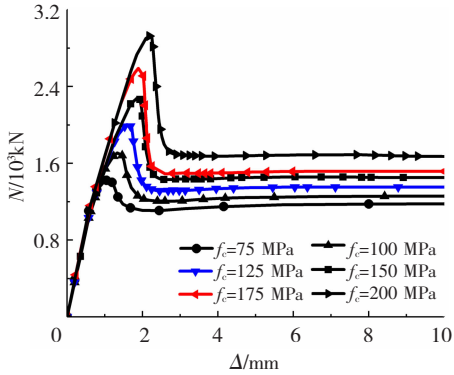


图 8 RPC 强度变化时试件的荷载 - 位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of specimens with different RPC strengths

当 RPC 轴心抗压强度分别为 75、125 和 175 MPa 时,钢管 RPC 柱中 RPC 约束应力 σ_r 与轴向名义压应力 σ_n (外荷载与钢管 RPC 柱横截面积之比)之比与钢管轴向位移的关系见图 9。该曲线大致可分为 3 个阶段:第一阶段,钢管 RPC 基本处于弹性阶段,约束应力与轴向名义压应力之比基本不变;第二阶段,曲线出现明显下降段,主要是钢管环向屈服,约束应力基本不变,而因 RPC 未被压碎,故随柱顶轴向位移增加,轴向名义压应力增加,导致曲线出现明显下降段;第三阶段,曲线基本维持不变,比值在 0.06 ~ 0.10,这主要是 RPC 被压碎,约束应力与截面名义压应力均降低至一定水平,且基本维持不变所致。此外,对比不同 RPC 强度的三条曲线,可看出随 RPC 抗压强度降低,RPC 约束应力与轴向名义压应力之比增大,说明钢管对低强度的 RPC 约束作用更强。这与横向约束作用下普通混凝土受约束效果强于高强混凝土受约束效果的规律一致。

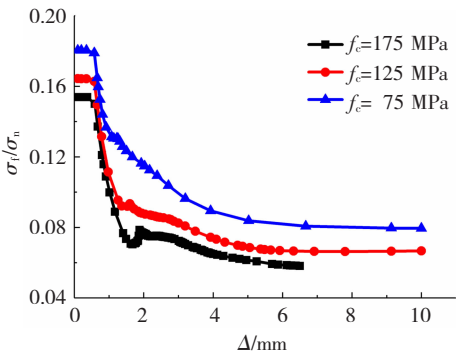


图 9 RPC 强度变化时相对约束应力 - 位移曲线

Fig. 9 Confining stress ratio-displacement curves of specimens with different RPC strengths

为进一步探索混凝土强度变化对钢管 RPC 短柱轴压承载力的影响,参考文献[15-17]中普通混凝土,高强混凝土及 RPC 横向变形系数的实测结果,给出了横向变形系数随混凝土抗压强度变化的关系,见图 10。随混凝土抗压强度提高,其横向变形系数降低,RPC 横向变形小于高强混凝土和普通混凝土,钢管对 RPC 的横向约束效果相对更差。

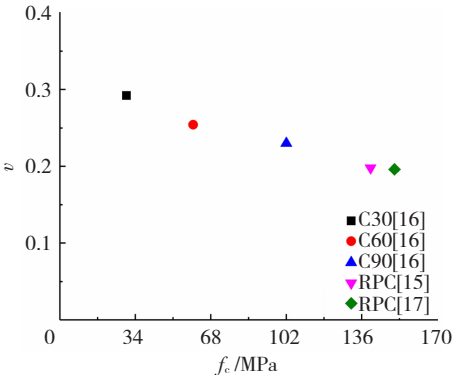


图 10 不同强度混凝土的横向变形系数

Fig. 10 Transverse deformation coefficient of concrete with different strengths

2.4 钢材屈服强度

不同钢材屈服强度时钢管 RPC 试件的荷载 - 位移对比见图 11,试件分析参数为:钢管外径 133 mm、厚 3 mm,核心 RPC 抗压强度 100 MPa,变化钢材的屈服强度为 300 ~ 450 MPa。分析表明:随钢管屈服强度的提高,套箍系数增大,钢管 RPC 的承载力逐渐提高。S4 试件的钢材屈服强度是 S1 试件的 1.5 倍,S4 试件承载力只有 S1 试件的约 1.1 倍,这主要是由于钢材屈服强度越高,钢管 RPC 短柱轴压承载力越高,相同外荷载下,钢管 RPC 柱纵向变形越小,对应的钢管 RPC 柱横向变形越小,混凝土的横向变形过小导致钢管与混凝土的接触不明显。故随着钢材屈服强度的提高,钢管 RPC 短柱轴压承载力提高幅度不显著。工程应用时,需注意钢材屈服强度和核心 RPC 强度的匹配,提高钢材的屈服强度并不能显著提升其约束效果。

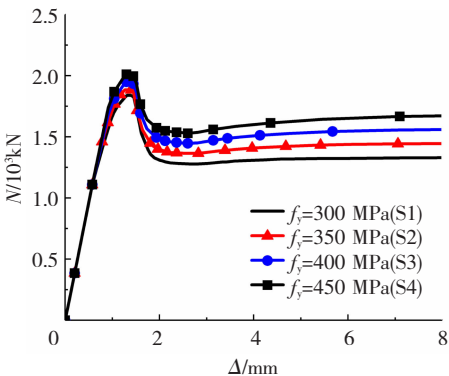


图 11 不同钢材屈服强度试件的荷载 - 位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of specimens with different steel strengths

3 圆钢管 RPC 轴压极限承载力计算

基于本课题组^[12]和文献[5,14,18-20]完成的 139 根圆钢管 RPC 轴心受压短柱试验数据及本文分析的 134 根圆钢管 RPC 有限元模拟数据,拟合出钢管 RPC 柱的极限承载力计算公式。

3.1 极限承载力计算公式

钢管 RPC 柱的极限承载力可表示为

$$N = A_{\omega} f_c + \alpha A_s f_y, \tag{1}$$

将 $\xi = A_s f_y / A_{\omega} f_c$ 代入式(1)中,可得

$$N = A_{\omega} f_c \times (\alpha \xi + 1). \tag{2}$$

基于最小二乘法,对上述试验数据和数值模拟结果进行拟合,得到钢管 RPC 轴压短柱的极限承载力公式:

$$N = A_{\omega} f_c (1.23 \xi + 1), \tag{3}$$

$$\xi = A_s f_y / A_{\omega} f_c, 0.057 \leq \xi \leq 1.575.$$

图 12 为拟合的极限承载力公式计算结果 N 与试验及数值模拟结果 N_u 对比,计算值 N 与 N_u 比值的平均值为 0.967,变异系数 0.097,吻合较好。

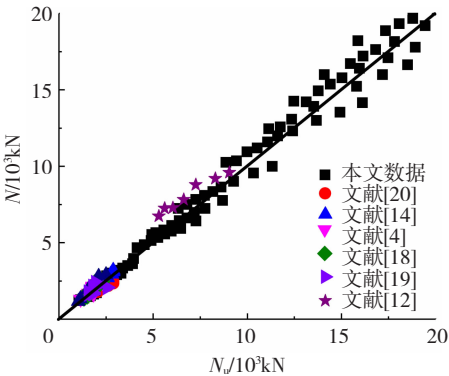


图 12 拟合公式与试验数据对比

Fig. 12 Comparison between fitting formula and test data

3.2 极限承载力计算公式对比

以外径 560 mm 的圆钢管 RPC 短柱为例,将本文拟合式(3)与各学者提出的公式及 CECS 28:2012《钢管混凝土结构与施工规程》规范公式进行

对比,圆钢管 RPC 短柱试件的尺寸见表 3(N_u 为有限元计算结果),对比结果见图 13. 由对比结果可知:现有圆钢管 RPC 试件极限承载力公式,规程(CECS 28:2012)中钢管普通混凝土、钢管高强混凝土极限承载力公式计算值偏大,而拟合式(3)吻合较好,适用范围更广.

表 3 钢管 RPC 短柱试件基本参数

Tab.3 Parameters of specimens

试件编号	$D \times t \times L/\text{mm}$	f_c/MPa	f_y/MPa	ξ	N_u/kN
1	$560 \times 4 \times 1\ 680$	100	310	0.091	30 658
2	$560 \times 8 \times 1\ 680$	100	310	0.185	32 047
3	$560 \times 12 \times 1\ 680$	100	310	0.284	33 110
4	$560 \times 20 \times 1\ 680$	100	310	0.495	35 436
5	$560 \times 25 \times 1\ 680$	100	310	0.638	36 651
6	$560 \times 30 \times 1\ 680$	100	310	0.789	38 013
7	$560 \times 35 \times 1\ 680$	100	310	0.949	38 770
8	$560 \times 40 \times 1\ 680$	100	310	1.119	40 090
9	$560 \times 45 \times 1\ 680$	100	310	1.301	40 901

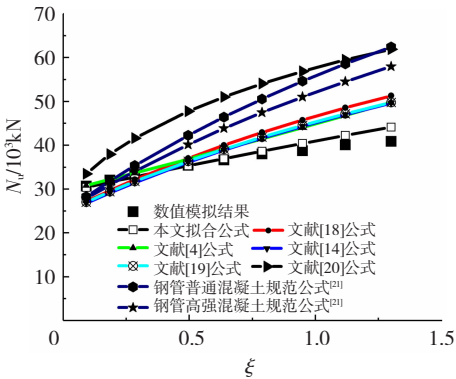


图 13 计算值与实测值对比

Fig.13 Comparison of calculated and test value

4 结 论

1)套箍系数对钢管 RPC 短柱轴压力学性能影响显著,随着套箍系数的增大,钢管对核心 RPC 的约束作用增强,柱的延性越好. 当套箍系数 $\xi < 0.5$, 钢管 RPC 柱荷载 - 位移曲线不存在强化段;当 $0.5 \leq \xi < 1$ 时,钢管 RPC 柱荷载 - 位移曲线出现强化段;当 $\xi \geq 1$ 时,强化段极限荷载相对于承载力的提升将超过 30%.

2)相同截面尺寸的圆钢管 RPC 柱,随核心 RPC 轴心抗压强度降低,其横向变形系数增大,钢管对核心 RPC 的约束作用增强.

3)提出了直径达 560 mm 圆钢管 RPC 轴压短柱极限承载力计算公式,可用于工程设计.

参考文献

[1] MEHMET C. The effect of high temperature on reactive powder concrete[J]. Construction & Building Materials,2012,70(6):508

[2] LEE J, XI Yunping, WILLIAM K, et al. A multiscale model for modulus of elasticity of concrete at high temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(9):754

[3] 孟世强. 钢管活性粉末混凝土初步研究[J]. 混凝土与水泥制品,2003,1(1):5

[4] 林震宇,吴炎海,沈祖炎. 圆钢管活性粉末混凝土轴压力学性能研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(4):52

[5] 吴炎海,林震宇. 钢管活性粉末混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 中国公路学报,2005,18(1):57

[6] 范重,王倩倩,李振宝,等. 大直径钢管混凝土柱抗震性能试验研究及承载力计算[J]. 建筑结构学报,2017,38(11):34

[7] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989,5:299

[8] ZHENG Wenzhong, LUO Baifu, WANG Ying. Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibers at elevated temperatures [J]. Construction & Building Materials, 2013, 41: 844

[9] 安明喆,杨志慧,余自若,等. 活性粉末混凝土抗拉性能研究[J]. 铁道学报,2010,32(1):54

[10] 余自若,安明喆,王志强. 双轴压下活性粉末混凝土的力学性能[J]. 建筑材料学报,2011,14(3):305

[11] 马亚峰. 活性粉末混凝土(RPC200)单轴受压本构关系研究[D]. 北京:北京交通大学,2006

[12] 菅伟. 圆钢管活性粉末混凝土短柱轴压性能试验与设计方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016

JIAN Wei. Experimental research and design method on behavior of reactive powder concrete-filled circular steel tube columns under axial compression[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2016

[13] ELLOBODY E, YOUNG B. Nonlinear analysis of concrete-filled steel SHS and RHS columns[J]. Thin-walled Structures,2006,44:919

[14] 田志敏,张想柏,冯建文,等. 钢管超高性能 RPC 短柱的轴压特性研究[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(1):99

[15] 吴炎海,林震宇,孙士平. 活性粉末混凝土基本力学性能试验研究[J]. 山东建筑工程学院学报,2004,19(3):7

[16] 张晓东,仲伟群. 高强混凝土的力学性能[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1996,29(3):62

[17] 李海艳,王英,郑文忠. 高温后活性粉末混凝土横向变形性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(4):1

LI Haiyan, WANG Ying, ZHENG Wenzhong. Transverse deformation properties of reactive powder concrete after exposure to high temperature [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013,45(4):1

[18] 罗华,季文玉,闫志刚,等. 加载方式对钢管活性粉末混凝土短柱抗压性能影响的研究[J]. 铁道学报,2014,36(9):105

[19] 闫志刚,张武奇,安明喆. 圆钢管 RPC 短柱轴心受压极限承载力分析[J]. 北京工业大学学报,2011,37(3):361

[20] 杨吴生. 钢管活性粉末混凝土力学性能及其极限承载力研究[D]. 长沙:湖南大学,2003

[21] 钢管混凝土结构设计与施工规程:CECS 28:2012[S]. 中国计划出版社,2012