

引用本文:张玉琢,刘进隆,徐 倩,等. 钢管煤矸石混凝土轴压短柱极限承载力计算方法研究[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(3):50-60.  
ZHANG Yuzhuo,LIU Jinlong,XU Qian,et al. Steel tube coal gangue concrete axial pressure short column ultimate bearing capacity calculation method research[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2023,40(3):50-60.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11148

# 钢管煤矸石混凝土轴压短柱极限承载力计算方法研究

张玉琢<sup>1,2</sup>,刘进隆<sup>3</sup>,徐 倩<sup>2</sup>,王庆贺<sup>4</sup>

- (1. 沈阳建筑大学 管理学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁工程技术大学 辽宁省煤矸石资源化利用及  
节能建材重点实验室,辽宁 阜新 123000; 3. 东南大学 土木工程学院,江苏 南京 211189;  
4. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:**为促进煤矸石在钢管混凝土结构中的应用,选取辽宁地区的煤矸石作为粗骨料,开展 6 根钢管混凝土和 12 根钢管煤矸石混凝土短柱轴压试验。根据构件破坏形式与荷载-应变曲线讨论材料强度、钢管约束和取代率对构件轴压承载力的影响规律,进行了设计参数与承载力的相关性分析,在此基础上,讨论规范 GB 50936—2014 和规程 T/CECS 625—2019 中的轴压短柱极限承载力计算方法对钢管煤矸石混凝土的适用性,给出圆钢管煤矸石混凝土短柱极限承载力计算公式的建议修正系数。结果表明:轴向压缩试验下构件呈现出局部鼓曲与剪切破坏形态;与钢管普通混凝土短柱相比,钢管对核心煤矸石混凝土具有更好的横向约束效应;相同取代率下提高套箍系数与含钢率将显著提升构件承载力,构件的轴压承载力随煤矸石取代率提升而降低,但最大降低幅度未超过 11%;煤矸石粗骨料对承载力的相关系数为-0.33 且不具有显著性;现有的规范 GB50936—2014 和规程 T/CECS 625—2019 中相关计算方法适用于钢管煤矸石混凝土短柱,引入修正系数后承载力计算的平均相对误差在 3% 以内。

**关键词:**钢管混凝土柱;煤矸石混凝土;轴心受压;极限承载力;计算方法

**中图分类号:**TU398.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-2049(2023)03-0050-11

## Steel tube coal gangue concrete axial pressure short column ultimate bearing capacity calculation method research

ZHANG Yuzhuo<sup>1,2</sup>, LIU Jinlong<sup>3</sup>, XU Qian<sup>2</sup>, WANG Qinghe<sup>4</sup>

- (1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Coal Gangue Resource Utilization and Energy-saving Building Materials, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 4. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In order to promote coal gangue application in concrete-filled steel tubular (CFST) structures, coal gangue produced in Liaoning province was selected as coarse aggregate, then the axial compression tests on 6 CFST short columns and 12 CFST short columns using spontaneous-

收稿日期:2021-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51808352,51808351);辽宁省应用基础研究计划项目(2022JH2/101300130);

沈阳市中青年科技人才项目(RC200143)

作者简介:张玉琢(1988-),男,工学博士,副教授,E-mail:zhangyuzhuo@sjzu.edu.cn。

通信作者:王庆贺(1987-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:wangqinghe@sjzu.edu.cn。

combustion coal gangue aggregate(SCGA) were carried out. Based on the failure mode and load-strain curve of the component, the influences of material strength, steel tube confinement and replacement rate of SCGA on the axial compression bearing capacity of the component were discussed. The correlation analysis between design parameters and axial compression capacity was carried out. On this basis, the applicability of the ultimate bearing capacity calculation method of axial compression short column in GB 50936—2014 and T/CECS 625—2019 to coal gangue CFST was discussed, and the recommended correction coefficient of the calculation formula of ultimate bearing capacity of circular coal gangue CFST short column was given. The results show that the components under axial compression test show local buckling and shear failure modes. Compared with ordinary CFST short column, steel tube has better lateral restraint effect on core coal gangue concrete. Under the same replacement rate, increasing the confinement coefficient and steel ratio will significantly increase the bearing capacity of the component. The axial compression bearing capacity of the component decreases with the increase of the coal gangue replacement rate, but the maximum reduction does not exceed 11%. The correlation coefficient of coal gangue coarse aggregate to bearing capacity is  $-0.33$  which is not significant, The relevant calculation methods in the existing specifications GB 50936—2014 and T/CECS 625—2019 are applicable to the short column of coal gangue CFST. The average error of bearing capacity calculation is less than 3%.

**Key words:** steel tube concrete column; coal gangue concrete; axial compression; ultimate bearing capacity; calculation method

## 0 引言

钢管混凝土柱具有承载力高、塑性与韧性好的特点,在建设工程领域中被广泛研究和应用<sup>[1]</sup>。当前中国煤炭开采过程中产生的煤矸石废弃物约  $45 \times 10^8$  t 且以每年  $2 \times 10^8$  t 的惊人速度增长,如何把煤矸石等大宗固废进行有效利用成为当下研究热点<sup>[2]</sup>。将直接破碎后的煤矸石全部或部分取代石子,用作配制混凝土的粗骨料,可以扩大煤矸石的有效利用,也可以减少建筑业对砂石等不可再生资源的消耗<sup>[3-5]</sup>。为进一步提高煤矸石的综合利用率,拓宽煤矸石混凝土的工程应用范围,将其推广到建设工程领域中的钢管混凝土柱中,形成一种新型钢管固废混凝土柱,即钢管煤矸石混凝土柱<sup>[6]</sup>。

多年来,研究人员针对钢管再生混凝土柱开展了广泛的研究工作。牛海成等<sup>[7]</sup>进行了不同构造的5个钢管混凝土轴压试件试验,探究钢管高强混凝土柱与高强再生混凝土柱轴压性能的差异,结果表明,二者损伤发展与破坏形态类似。吴波等<sup>[8]</sup>进行了17根钢管再生混凝土短柱轴压试验,探究其刚度、强度和延性,结果表明,采用32%~35%废弃混凝土的钢管再生混合短柱的轴向受力性能与现浇钢管混凝土短柱相似。陈宗平等<sup>[9]</sup>进行了15个方钢

管再生混凝土长柱的偏心受压试验以研究其力学性能,结果表明,试件承载力受再生骨料影响不大,随长细比和偏心距增大而减小。王玉银等<sup>[10]</sup>分析了用钢量相同时钢管再生混凝土短柱与钢筋再生混凝土短柱二者轴压力学性能的差异,结果表明,二者受力性能类似,再生骨料对钢管混凝土结构承载力的影响较小。陈梦成等<sup>[11]</sup>进行了6根锈蚀圆钢管再生混凝土短柱轴心受压试验,分析了锈蚀对构件轴压性能的影响,结果表明,试件承载力与刚度随锈蚀率增加而降低。张向冈等<sup>[12]</sup>分别进行了5个方钢管再生混凝土长柱与圆钢管再生混凝土柱的轴压单调加载试验,结果表明:再生粗骨料取代率对构件承载力影响较小,而长细比影响较大。黄宏等<sup>[13]</sup>设计了方实心、方套圆中空夹层与方套方中空夹层钢管再生混凝土短柱并进行轴压试验,结果表明,实心短柱的横向应变发展更快,内管斜放比正放短柱的极限荷载提高约3.2%。李兵等<sup>[14]</sup>进行了方钢管再生混凝土短柱轴压承载力的非线性分析,利用极限平衡法推导了短柱的轴压承载力计算公式,结果表明,理论公式的适用性较好。张玉琢等<sup>[15]</sup>进行了ISO 84标准火灾作用后的中空夹层方钢管再生混凝土柱的有限元分析,探究构件剩余承载力,结果表明,受火时间60 min后构件的剩余承载力急剧降低。

马辉等<sup>[16]</sup>对 11 个钢管型钢再生混凝土组合柱进行轴心受压试验,探究相关参数对承载力的影响,结果表明,组合柱具有良好的变形能力,承载力随再生骨料取代率增加而降低。刘坚等<sup>[17]</sup>在考虑钢管和钢筋笼约束下基于极限分析法及双剪统一强度理论推导了钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力计算公式,结果表明,增加钢筋笼将提高构件约 10% 的承载力。此外,沈奇罕等<sup>[18]</sup>对椭圆钢管钢渣混凝土短柱进行轴向压缩试验,根据叠加原理提出了轴压承载力计算公式,结果表明,钢渣作为骨料可提升构件承载力 1.1%~16.8%。Gao 等<sup>[19]</sup>通过 7 组圆钢管煤矸石混凝土短柱试验,引入煤矸石粗骨料强度折减系数并考虑约束效应提出了承载力计算公式,结果表明,承载力理论计算相对误差在 12% 以内。

目前,钢管煤矸石混凝土的研究尚处于初期,其轴压力学性能是其他复杂荷载下力学性能的基础,而对钢管煤矸石混凝土柱轴压承载力的影响因素尚缺乏定量研究。本文结合课题组进行的圆形钢管煤矸石混凝土短柱轴向压缩试验,研究材料强度、约束效应和取代率对承载力的影响,分析多个参数对承载力的相关性与显著性,探究现有的《钢管混凝土结构设计规范》(GB 50936—2014)<sup>[20]</sup>与《钢管再生混凝土结构技术规程》(T/CECS 625—2019)<sup>[21]</sup>中轴压承载力计算公式的适用性,以为钢管煤矸石混凝土轴压短柱的设计应用提供参考。

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of concrete

混凝土强度等级	煤矸石取代率 $r/\%$	各材料用量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )						
		水	水泥	粉煤灰	NFA	NCA	SCGA	附加水
C30	0	183.7	320	80	950	870	0	0.0
C30	50	178.0	348	87	860	395	395	39.5
C30	100	171.3	376	94	769	0	710	71.0

注:NFA 为天然细骨料;NCA 为天然粗骨料;SCGA 为自燃煤矸石骨料;附加水是指 SCGA 预浸工序所用的水。

修正计算结果如表 3 所示。

表 3 混凝土材料力学性能

Table 3 Mechanical properties of concrete materials

$r/\%$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_c/\text{MPa}$	$E_c/\text{GPa}$	$\mu_c$
0	55.8	40.3	32.8	0.230
50	52.4	37.5	25.6	0.218
100	45.7	33.0	23.2	0.223

注: $f_{cu}$ 为煤矸石混凝土立方体抗压强度实测值; $f_c$ 为煤矸石混凝土轴心抗压强度修正计算值; $E_c$ 为煤矸石混凝土的弹性模量; $\mu_c$ 为煤矸石混凝土的泊松比。

1.2 试件设计

考虑混凝土煤矸石取代率、钢材屈服强度、含钢

1 试验概况

1.1 试验材料

圆钢管煤矸石混凝土短柱的外钢管选用了 3 种厚度(2.75、3.75、4.50 mm),按照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)<sup>[22]</sup>的要求进行了钢材的材性试验,结果如表 1 所示。

表 1 钢材材性

Table 1 Mechanical properties of steel materials

$t/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$E_s/10^5\text{ MPa}$	$\mu_s$
2.75	278	364	1.70	0.259
3.75	285	374	1.77	0.240
4.50	338	419	1.77	0.224

注: $t$ 为钢管壁厚; $f_y$ 为钢材的屈服强度; $f_u$ 为钢材的抗拉强度; $E_s$ 为钢材的弹性模量; $\mu_s$ 为钢材的泊松比。

用作粗骨料的煤矸石取自辽宁阜新地区,煤矸石取代率设定为 0%、50%、100%,混凝土的配合比如表 2 所示。按照煤矸石取代率的不同,分别设置了 3 组立方体和 3 组棱柱体试块,尺寸分别为 100 mm×100 mm×100 mm 和 100 mm×100 mm×300 mm,在标准养护完成后使用 WAW-600C 试验机进行轴压试验。由于本次试验采用的试件为非标准试件,根据《混凝土结构设计规范》中考虑尺寸效应的混凝土轴心抗压强度修正公式,使用 100 mm×100 mm×100 mm 试件的立方体抗压强度实测值进行修正计算得到轴心抗压强度,材性试验及

率等变化参数,设计并制作了 9 组共 18 个圆钢管煤矸石混凝土短柱试件,包括 6 个 100%煤矸石粗骨料取代率的试件,6 个 50%煤矸石粗骨料取代率的试件和 6 个 0%取代率的试件。试件相关参数如表 4 所示。

1.3 试验加载与测试方案

试验场地位于沈阳建筑大学结构工程实验室,仪器为 5 000 kN 液压机。试验前对试件进行打磨处理,在试件中部截面沿四周分别粘贴 4 组纵向应变片和 4 组环向应变片,每组应变片圆心角为 90°,用于准确测量轴向压缩下试件的环向和竖向变形。试件端板沿对角方向布置 4 个量程为 50 mm、精度

表 4 试件实际尺寸和材料强度  
Table 4 Actual size of specimen and strength of material

组号	试件编号	$r/\%$	试件尺寸	$\alpha/\%$	$f_y/\text{MPa}$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_c/\text{MPa}$	$\xi$
1	SCGA-0.0-2.75-a	0	140 mm×2.75 mm×420 mm	8.3	278	55.8	40.3	0.576
	SCGA-0.0-2.75-b	0	140 mm×2.75 mm×420 mm	8.3	278	55.8	40.3	0.576
2	SCGA-0.5-2.75-a	50	140 mm×2.75 mm×420 mm	8.3	278	52.4	37.5	0.619
	SCGA-0.5-2.75-b	50	140 mm×2.75 mm×420 mm	8.3	278	52.4	37.5	0.619
3	SCGA-1.0-2.75-a	100	140 mm×2.75 mm×420 mm	8.3	278	45.7	33.0	0.703
	SCGA-1.0-2.75-b	100	140 mm×2.75 mm×420 mm	8.3	278	45.7	33.0	0.703
4	SCGA-0.0-3.75-a	0	140 mm×3.75 mm×420 mm	11.6	285	55.8	40.3	0.823
	SCGA-0.0-3.75-b	0	140 mm×3.75 mm×420 mm	11.6	285	55.8	40.3	0.823
5	SCGA-0.5-3.75-a	50	140 mm×3.75 mm×420 mm	11.6	285	52.4	37.5	0.885
	SCGA-0.5-3.75-b	50	140 mm×3.75 mm×420 mm	11.6	285	52.4	37.5	0.885
6	SCGA-1.0-3.75-a	100	140 mm×3.75 mm×420 mm	11.6	285	45.7	33.0	1.005
	SCGA-1.0-3.75-b	100	140 mm×3.75 mm×420 mm	11.6	285	45.7	33.0	1.005
7	SCGA-0.0-4.50-a	0	140 mm×4.50 mm×420 mm	14.2	338	55.8	40.3	1.071
	SCGA-0.0-4.50-b	0	140 mm×4.50 mm×420 mm	14.2	338	55.8	40.3	1.071
8	SCGA-0.5-4.50-a	50	140 mm×4.50 mm×420 mm	14.2	338	52.4	37.5	1.151
	SCGA-0.5-4.50-b	50	140 mm×4.50 mm×420 mm	14.2	338	52.4	37.5	1.151
9	SCGA-1.0-4.50-a	100	140 mm×4.50 mm×420 mm	14.2	338	45.7	33.0	1.308
	SCGA-1.0-4.50-b	100	140 mm×4.50 mm×420 mm	14.2	338	45.7	33.0	1.308

注:以 SCGA-0-2.75-a 为例,SCGA 表示圆钢管煤矸石混凝土试件,0 表示取代率为 0%(普通混凝土),2.75 表示钢管厚度,a 与 b 分别表示同一参数的 2 个试件;试件尺寸为钢管直径、钢管壁厚、钢管长度; $\alpha$  为含钢率, $\alpha=A_s/A_c$ , $A_s$ 、 $A_c$  分别为钢管和煤矸石混凝土的截面面积; $\xi$  为套箍系数, $\xi=f_yA_s/(f_{cu}A_c)$ 。

为  $1\times10^{-4}$  mm 的位移计,用于测量试件的竖向位移。试验装置如图 1 所示。

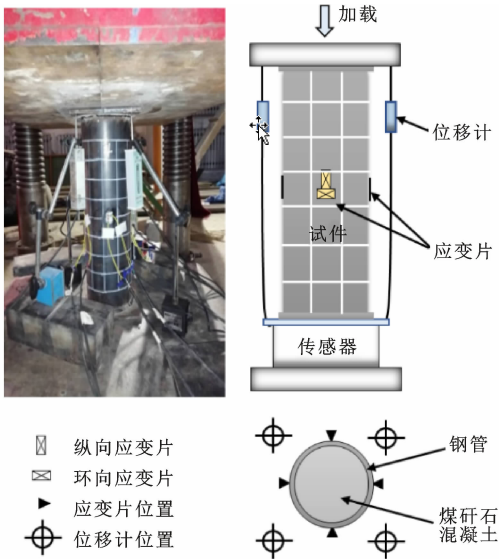


图 1 试验装置  
Fig. 1 Test equipment

应变片和位移计布置完成后,采用激光对中仪进行物理对中,通过预加载时应变片和位移计的读数进行几何对中,从而使得试件完全处于轴心受压状态。试验前先进行持荷预估加载,加载值约为极

限荷载值的 10%,加载后持荷 2 min 后卸载,加载结束后若试件和仪器满足试验要求则正式加载,否则调整试验仪器和试件再次预加载直至符合要求。正式加载采用分级加载,当试件位于弹性范围内,每级加载值为预估极限荷载的 10%,试件屈服后由于变形急速增加,故减小每级加载值为预估极限荷载的 5%,从而保证试验数据精度。每级加载持荷时间均为 2 min,当试件接近破坏时缓慢加载,持续至试件产生较大变形或荷载出现上升时开始卸载。

1.4 试验现象与破坏情况

圆钢管煤矸石混凝土短柱的承载特征、破坏过程及破坏模式与钢管普通混凝土较为一致。加载初期,钢管煤矸石混凝土试件的工作状态处于弹性阶段,荷载、应变及位移都较小,试件中截面应变和纵向位移增长,钢管和煤矸石混凝土共同承受纵向轴压力;当试件开始进入弹塑性阶段时,钢管靠近端部的地方会开始出现剪切滑移线并逐渐向试件中部移动;持续加载至试件进入屈服阶段,圆钢管煤矸石混凝土试件外观仍无明显变化;当荷载不断增大,钢管进入塑性阶段后应变持续增加,荷载增长缓慢;当试件到达峰值荷载时,应变增长速率加快且荷载开始逐渐下降,外钢管发生局部鼓曲,大多在试件中部或

靠近端板处产生一处或多处严重鼓曲而退出工作。  
试件最终破坏情况如图 2 所示。

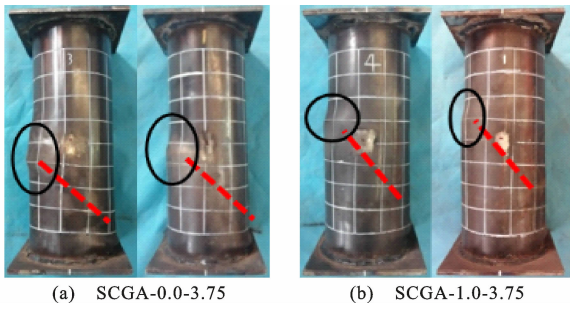


图 2 圆钢管煤矸石混凝土轴心受压破坏情况  
Fig.2 Failure condition of coal gangue concrete filled circular steel tube under axial compression

1.5 试件的荷载-应变( $N-\varepsilon$ )曲线

以表 4 中第 4、5、6 组试件为例对试件荷载-应变曲线进行分析。试件在加载过程中 4 个测点的荷载-应变曲线基本一致,因此以 4 个测点的平均数作为最终的荷载-平均应变曲线,如图 3 所示,其中,纵向压应变为负,横向拉应变为正。由图 3 可知:同组的 2 个试件在加载初期刚度基本一致,呈线性增长;加载至弹塑性阶段部分曲线出现分叉现象,但偏离值均未超过 20%,试件的力学性能保持稳定;继续加载试件进入屈服状态,产生塑性变形,此时应变增长较快;由于钢管的约束,在弹性及弹塑性阶段,混凝土中的裂缝发展受到限制,处于三向受压状态,使圆钢管煤矸石混凝土试件呈现较好的塑性变形能力,使其之后承受的荷载仍缓慢增长;最后由于煤矸石混凝土内部裂缝的持续发展形成贯通裂缝,核心混凝土压碎,试件破坏,试件承载能力随之下降。对比图 3 中不同取代率下试件的荷载-应变曲线,可以发现试件的峰值荷载随取代率提升而降低,这是由于煤矸石粗骨料强度较天然骨料强度低所导致的。试件峰值荷载随取代率提升的最大降低幅度未超过 15%,这是因为钢管与混凝土之间的约束作用,使得内部煤矸石混凝土处于三向受压状态,抑制了煤矸石混凝土的内部损伤。此外随取代率的提升,试件纵向峰值压应变略有提升而横向峰值拉应变有所降低,这表明钢管对 0%取代率下的普通混凝土具有更好的纵向约束,而对煤矸石混凝土的横向约束更好。这是由于煤矸石混凝土弹性模量较普通混凝土略低,其受荷后纵向变形较钢管普通混凝土试件大,横向变形发展较快,使钢管与核心煤矸石混凝土之间的约束作用更早出现。

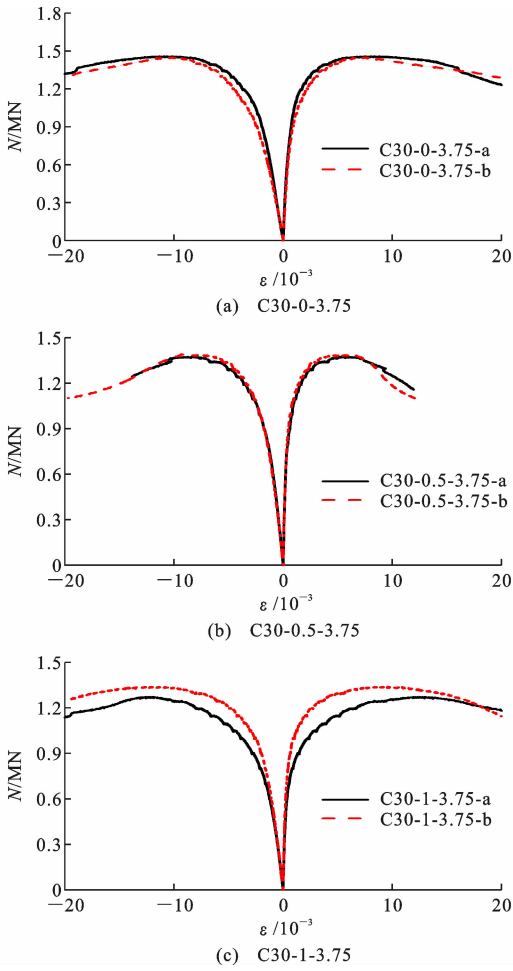


图 3 试件  $N-\varepsilon$  关系曲线  
Fig.3  $N-\varepsilon$  relation curves of specimens

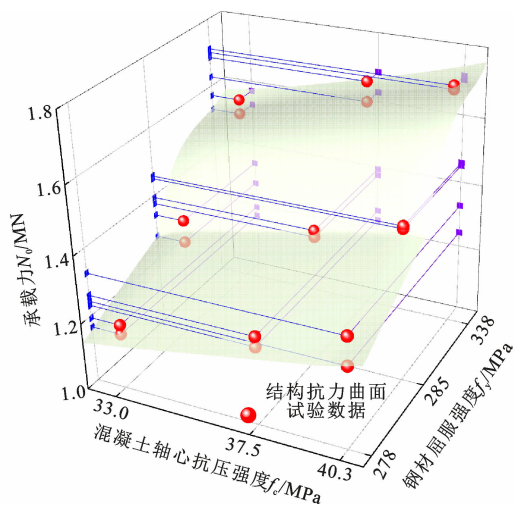
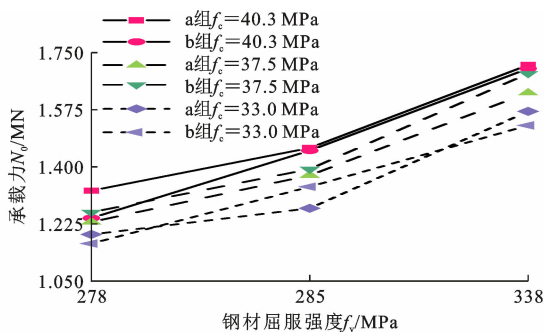
2 极限承载力影响因素分析

2.1 材料强度的影响

图 4 为试验的 9 组 18 个试件在不同取代率下的轴压承载力随钢材屈服强度和混凝土轴心抗压强度变化的关系,曲面为使用试验数据拟合的圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱结构抗力曲面。由图 4 可知,结构抗力曲面随混凝土轴心抗压强度与钢材屈服强度的提高而提升,即试件的轴压承载力与  $f_c$  和  $f_y$  正相关。由于钢管煤矸石混凝土短柱在轴心受压情况下的荷载由其结构横截面直接承担,且轴压短柱由于长细比较小不存在失稳破坏只存在材料失效所导致的破坏,因此钢管煤矸石混凝土轴压短柱试件的材料强度将直接影响其极限承载力。

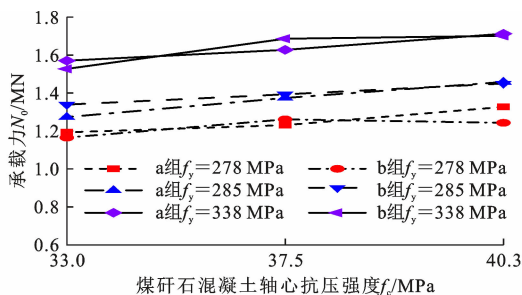
钢材屈服强度  $f_y$  对构件轴压承载力  $N_0$  的影响如图 5 所示。由图 5 可知,混凝土轴心抗压强度相同时,试件的承载力随钢材屈服强度的提升而增加,这是由于钢管自身承载能力提升且其对核心煤



图4  $N_0$  与  $f_y$ 、 $f_c$  的关系Fig. 4 Relationship of  $N_0$  with  $f_y$  and  $f_c$ 图5  $f_y$  对  $N_0$  的影响Fig. 5 Effect of  $f_y$  on  $N_0$ 

矸石混凝土约束效应增加所导致的。外钢管钢材屈服强度  $f_y$  从 278 MPa 提升至 285 MPa 时,承载力平均提升 11.71%,其中 b 组  $f_c=40.3$  MPa 的试件承载力提升幅度最大,为 16.65%,a 组  $f_c=33.0$  MPa 的试件承载力提升最小,为 6.71%。当  $f_y$  从 285 MPa 提升至 338 MPa 时,承载力平均提升 18.59%,提升效果更为显著,这是由于钢管屈服强度增量较前一阶段( $f_y$  从 278 MPa 提升至 285 MPa)的大,其中 a 组  $f_c=33.0$  MPa 的试件提升幅度最大,为 23.33%,b 组  $f_c=33.0$  MPa 的试件提升幅度最小,为 14.04%,试件参数相同而试验结果差距较大,这可能是由于试验时存在的加载误差以及构件的初始缺陷存在差异所导致的。

构件轴压承载力随其核心煤矸石混凝土轴心抗压强度的变化情况如图 6 所示,图 6 中  $f_c$  提升导致的承载力增加幅度明显小于图 5,这是因为提升核心煤矸石混凝土强度只能提升混凝土自身的承载能力,而提升钢材屈服强度不但可以直接提升钢管自身承载能力,而且还可以增强对核心混凝土的约束

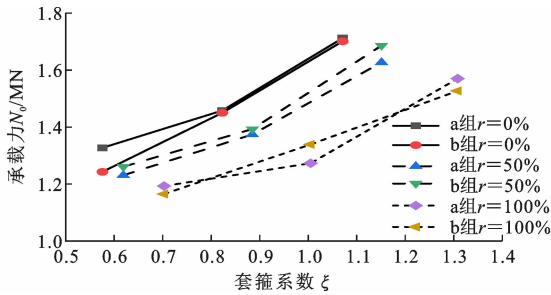
图6  $f_c$  对  $N_0$  的影响Fig. 6 Effect of  $f_c$  on  $N_0$ 

作用使得承载力间接提升。当  $f_c$  从 37.5 MPa 提升至 40.3 MPa 时,b 组  $f_y=278$  MPa 的试件承载力降低了 1.45%,这是由于试验时的测量误差所导致的。当  $f_c$  从 33 MPa 提升至 37.5 MPa 时,试件的承载力平均提升 5.18%,其中 b 组  $f_y=338$  MPa 试件的承载力提升幅度最大,为 9.43%。当  $f_c$  从 37.5 MPa 提升至 40.3 MPa 时,试件的承载力平均提升 3.54%,其中 a 组  $f_y=278$  MPa 试件承载力增幅最大,为 7.23%。相同钢材屈服强度下,试件的承载力在  $f_c$  从 33.0 MPa 提升至 40.3 MPa 时增幅平均为 9.20%,其中 a 组  $f_y=285$  MPa 试件的增幅最大,为 12.68%。由于钢材强度较低时承受荷载与约束混凝土的能力较弱,故 b 组  $f_y=278$  MPa 试件的增幅最小,为 6.28%。钢材屈服强度不变时,构件的轴压承载力随核心煤矸石混凝土轴心抗压强度的提升而增加,这是由于构件核心煤矸石混凝土达到极限压应变的部分减少使得损伤降低,进而使得构件的直接受荷能力得到提升。

## 2.2 钢管约束的影响

全截面轴心受压情况下,核心煤矸石混凝土由于截面尺寸较大将承担大部分荷载,煤矸石混凝土外围的钢管面积相对较小,虽然对于直接承受轴向荷载的作用较小,但由于钢管对核心混凝土存在约束作用,可以使得核心煤矸石混凝土处于三向受压应力状态,抑制混凝土的侧向变形与开裂,从而提升轴压构件的承载力。外钢管的约束效应主要取决于含钢率与套箍系数,含钢率用于表征构件横截面钢材的占比,套箍系数则反映钢管与核心混凝土的材料强度比值以及横截面的几何特征,含钢率与套箍系数越大则外钢管对核心混凝土约束效应越强,构件承载力越高。

不同煤矸石取代率下构件轴压承载力与套箍系数的关系如图 7 所示。当  $r=0\%$ ,套箍系数从 0.576 提升至 0.619 时承载力平均提升 11.63%,从

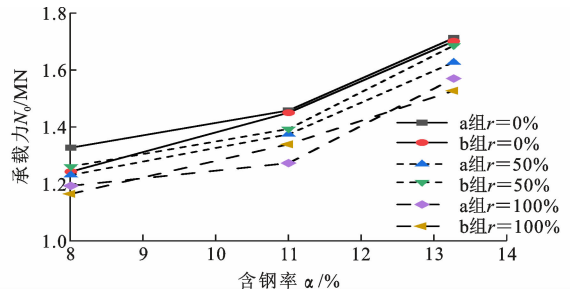
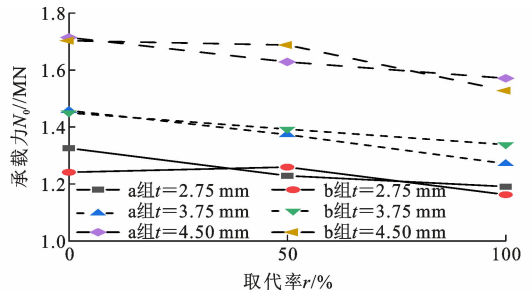
图 7  $\xi$  对  $N_0$  的影响Fig. 7 Effect of  $\xi$  on  $N_0$ 

0.619 提升至 0.703 时承载力平均提升 9.94%；当  $r=50\%$ ，套箍系数从 0.823 提升至 0.885 时承载力平均提升 9.64%，从 0.885 提升至 1.005 时承载力平均提升 14.79%；当  $r=100\%$ ，套箍系数从 1.071 提升至 1.151 时承载力平均提升 16.46%，从 1.151 提升至 1.308 时承载力平均提升 25.61%。因此适当降低煤矸石取代率，提升套箍系数从而使得试件承载力得到增加，这是由于套箍效应的存在使得核心煤矸石混凝土在被挤压时上下端面产生自平衡的摩擦力，除底面之外其余部分三向受压而中间部分平衡不受力，从而提升试件轴压承载力。

图 8 为含钢率对轴压承载力的影响。由图 8 可知：含钢率  $\alpha$  与承载力具有双折线关系，当  $\alpha$  小于 11.00% 时构件承载力随  $\alpha$  提升幅度较低；当  $\alpha$  大于 11.00% 时，承载力随  $\alpha$  增加而提升的幅度明显增大。由此可见约束效应对承载力的提升并非线性关系，这是由于含钢率的提升导致横截面上钢管所占面积增加，初始钢管面积占比较小时钢管以约束作用为主而直接承载能力较低，随着钢管面积占比的增加其约束效应增强的同时直接承载能力也得到提升，从而使得承载力增加更为迅速。试件的含钢率  $\alpha$  从 8.01% 提升至 11.00% 时，承载力平均提升 10.40%； $\alpha$  从 11.00% 提升至 13.27% 时，承载力平均提升 15.63%。相同含钢率  $\alpha$  下，提升煤矸石取代率会使得承载力降低， $\alpha$  为 8.01% 时，100% 取代率较 0% 取代率的承载力降低 8.18%； $\alpha$  为 11.00% 时，100% 取代率较 0% 取代率的承载力降低 10.17%； $\alpha$  为 13.27% 时，100% 取代率较 0% 取代率的承载力降低 9.26%。由于含钢率的提升使试件中钢管所占体积与横截面面积增加，钢管约束效应增强，从而抑制核心混凝土的横向裂缝开展，使得核心混凝土应变增长放缓，从而提高试件承载力。

### 2.3 取代率的影响

图 9 为取代率对轴压承载力的影响。可以看

图 8  $\alpha$  对  $N_0$  的影响Fig. 8 Effect of  $\alpha$  on  $N_0$ 图 9  $r$  对  $N_0$  的影响Fig. 9 Effect of  $r$  on  $N_0$ 

出，圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱承载力随煤矸石取代率的增加而降低，不同取代率下的轴压短柱具有差异性。取代率从 0% 提升至 50% 使得构件承载力平均降低 3.78%，取代率从 50% 提升至 100% 使得承载力平均降低 9.20%，煤矸石取代率提升所导致的承载力最大降低幅度未超过 11%，表明煤矸石粗骨料与天然骨料相比，因自身强度降低而导致的构件承载力降低幅度较小。不同取代率下，钢管厚度  $t$  从 2.75 mm 提升至 3.75 mm， $f_y$  从 278 MPa 提升至 285 MPa 使得构件承载力平均提升 10.40%； $t$  从 3.75 mm 提升至 4.50 mm， $f_y$  从 285 MPa 提升至 335 MPa，承载力平均提升 15.63%，其中不同煤矸石粗骨料取代率对应的构件承载力提升程度具有差异性。由于试件的核心混凝土标号、水泥及细骨料的种类和配比都相同，仅煤矸石取代率不同，因此取代率对构件承载力的影响在本质上主要是由核心煤矸石混凝土轴心抗压强度的不同所产生的。0% 取代率下核心混凝土  $f_c=40.3\text{MPa}$ ，50% 取代率下核心混凝土  $f_c$  相比 0% 取代率下  $f_c$  降低了 6.90%，100% 取代率下核心混凝土  $f_c$  相比 0% 取代率下降了 18.1%，煤矸石粗骨料取代率的提升导致混凝土轴心抗压强度降低。0% 取代率与 100% 取代率相比，承载力的降低幅度约为  $f_c$  降低幅度的 0.56 倍，可以发现构件承载力随取代率提升而降低的幅度较核心煤矸石混凝土轴心抗压强度降低幅度小，

本质上是构件充分利用钢材的抗拉强度与核心煤矸石混凝土抗压强度的体现,在轴压短柱试件的腰腹部钢管由于混凝土受压产生横向膨胀变形而承受拉力,起到约束核心煤矸石混凝土的作用,在一定程度上降低了因取代率提升所导致的构件承载力差异。

2.4 相关程度与显著性

结合参数分析结果,构件承载力的差异由构件自身材料强度以及钢管约束产生,且不同取代率下的构件承载力也存在差异性,因此选定含钢率  $\alpha$ 、套箍系数  $\xi$ 、外钢管管壁厚度  $t$ 、钢材屈服强度  $f_y$ 、煤矸石取代率  $r$  与核心煤矸石混凝土轴心抗压强度  $f_c$ 。这 6 个指标进行相关性分析,由于各参数与承载力间并不一定为线性关系,因此使用 Spearman 相关系数进行分析并选定显著性水平为 0.05,求解结果如表 5 所示。由表 5 可知: $\alpha$ 、 $f_y$  和  $t$  与承载力的相关系数为 0.93 且伴随概率均小于 5%,说明以上参数在不同水平下对承载力存在显著性差异且相关性极高,是最主要的影响因素; $\xi$  对承载力存在显著性差异,相关系数为 0.780,是较为关键的影响参数。 $r$ 、 $f_c$  与承载力的伴随概率  $p$  大于 5%,未通过显著性检验,且相关性较低,因此对于本次试验而言煤矸石取代率  $r$  与煤矸石混凝土轴心抗压强度  $f_c$  并不会显著影响承载力,这与参数分析中  $f_c$  与  $r$  使承载力降低程度未超过 11%的结果相吻合。综上所述,煤矸石取代率对圆钢管煤矸石混凝土短柱的轴压承载力并不会造成显著的降低,相同混凝土标号下含钢率  $\alpha$ 、钢管壁厚  $t$  与钢材屈服强度  $f_y$  是提升承载力的关键因素。

表 5 Spearman 相关系数与伴随概率

Table 5 Spearman correlation coefficient and adjoint probability

参数	$\alpha$	$t$	$f_y$	$\xi$	$r$	$f_c$
$R$	0.93	0.93	0.93	0.780	-0.33	0.33
$p$	$2.04 \times 10^{-8}$	$2.04 \times 10^{-8}$	$2.04 \times 10^{-8}$	$1.36 \times 10^{-4}$	0.18	0.18

注: $R$  为 Spearman 相关系数; $p$  为伴随概率。

3 承载力计算方法

3.1 承载力组成分析

由于外钢管对核心煤矸石混凝土存在约束作用,因此轴向压缩时圆钢管煤矸石混凝土短柱的承载力大于煤矸石混凝土和钢管单独作用时的叠加承载力,产生了“1+1>2”的效果<sup>[20]</sup>。构件承载力的组成如图 10 所示,其中试件 1~18 对应表 4 中 SC-GA-0.0-2.75a~SCGA-1.0-4.50b,混凝土的承载力

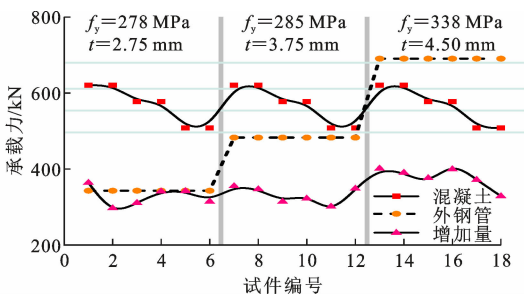


图 10 承载力  $N_0$  的组成

Fig. 10 Composition of bearing capacity  $N_0$

为核心混凝土横截面面积与混凝土轴心抗压强度的乘积,钢管承载力为其横截面面积与屈服强度的乘积,承载力增加量为承载力试验值减去外钢管和核心混凝土单独作用时的承载力。由图 10 可知,钢管产生的承载力以及承载力增加量与管壁厚度  $t$  和钢材屈服强度  $f_y$  正相关。当钢管壁厚  $t=2.75、3.75$  mm(较薄),钢材屈服强度  $f_y=278、285$  MPa(较小时),荷载主要由混凝土承担;当  $t$  增加至 4.5 mm 时,钢材屈服强度为 338 MPa(较大),外钢管承担的荷载将略大于核心混凝土。由于试件长度均为 420 mm,半径均为 140 mm,因此核心煤矸石混凝土的承载力仅与取代率  $r$  决定的  $f_c$  有关,取代率的提升会导致  $f_c$  降低。煤矸石粗骨料 0%取代率与 100%取代率的试件其核心混凝土承载力下降约为 140 kN。相同混凝土强度等级下,构件承载力增加量随钢材屈服强度  $f_y$  与钢管壁厚  $t$  的增加而提升,随着取代率的增加导致承载力降低,本质上是钢管约束的增强与核心混凝土材料强度的降低。

3.2 承载力理论计算

使用如表 6 所示的现行规范与规程中轴压短柱承载力公式进行钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的计算<sup>[20-21]</sup>。通过对比理论计算值与试验值探究现有规范与规程中理论计算公式的适用性。

使用表 6 中的相关公式可以计算得到承载力理论计算值,将其与试验值进行对比,结果如图 11 和表 7 所示。计算结果显示公式(1)、公式(2)与公式(3)平均相对误差分别为 5.05%、9.38%、4.38%,方差分别为 0.03、0.07、0.04。其中 GB 50936—2014 极限平衡理论公式(1)与 T/CECS 625—2019 统一强度理论公式(3)的计算值与试验值相比偏差均小于 10%。GB 50936—2014 统一强度理论公式(2)的计算值与试验值相比偏差大于 10%。

3.3 承载力修正计算

由第 3.2 节可知承载力试验值与计算值具有较



表 6 理论计算公式  
Table 6 Theoretical calculation formula

公式来源	承载力计算公式	理论依据
GB 50936—2014 <sup>[20]</sup>	$N_0 = \begin{cases} 0.9A_c f_c (1+2\xi) & \xi \leq 1 \\ 0.9A_c f_c (1+\sqrt{\xi}+\xi) & \xi > 1 \end{cases} \quad (1)$	极限平衡理论
	$\left. \begin{aligned} N_0 &= A_{sc} f_{sc} \cdot f_{sc} = (1.212 + B\xi + C\xi^2) f_c \\ B &= 0.176 f_y / 213 + 0.974 \\ C &= -0.104 f_c / 14.4 + 0.026 \end{aligned} \right\} \quad (2)$	统一强度理论
T/CECS 625—2019 <sup>[21]</sup>	$N_0 = A_{sc} f_{sc} \cdot f_{sc} = (1.14 + 1.02\xi) f_c \quad (3)$	

注： $A_{sc}$ 为钢管混凝土柱横截面面积； $f_{sc}$ 为实心钢管混凝土抗压强度； $B$ 、 $C$ 为截面形状对套箍效应的影响系数。

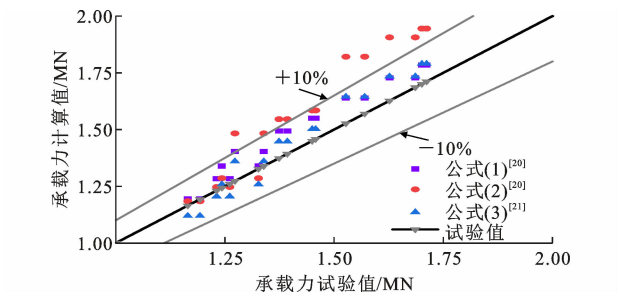


图 11 承载力理论计算结果

Fig. 11 Theoretical calculation results of bearing capacity  
高的线性相关性,为进一步提高构件承载力的计算精度,使现有普通钢管混凝土轴压短柱与再生钢管混凝土轴压短柱的轴压承载力计算公式更适用于钢管煤矸石混凝土短柱,引入修正系数与截距修正量

对表 6 中的计算公式进行参数修正,得到式(4)。根据试验数据进行参数求解,结果如表 8 所示。由表 8 可知,修正后的理论计算公式的判定系数  $R^2$  均大于 0.94,具有较高的计算精度。承载力修正计算值与试验值的散点图如图 12 所示。由图 12 可知,修正后的承载力计算值平均偏差均小于 3%,计算值数据在试验值两侧均匀分布。

$$N = \mu N_0 + \beta \quad (4)$$

式中： $N$ 为承载力修正计算值； $\mu$ 为修正系数； $\beta$ 为截距修正量。

4 结 语

(1)本次试验中,相同取代率下圆钢管煤矸石混凝土短柱的含钢率从8.3%提升至14.2%,套箍系

表 7 理论计算值与试验值的对比

Table 7 Comparison of theoretical and experimental values

试件编号	承载力试验值 $N_0/\text{kN}$	公式(1) <sup>[20]</sup>		公式(2) <sup>[20]</sup>		公式(3) <sup>[21]</sup>	
		$N_1$	$N_1/N_0$	$N_2$	$N_2/N_0$	$N_3$	$N_3/N_0$
SCGA-0.0-2.75-a	1 327	1 339.0	1.009	1 285.6	0.968	1 258.5	0.948
SCGA-0.0-2.75-b	1 243	1 339.0	1.077	1 285.6	1.034	1 258.5	1.012
SCGA-0.5-2.75-a	1 231	1 283.4	1.042	1 246.8	1.012	1 205.4	0.979
SCGA-0.5-2.75-b	1 261	1 283.4	1.017	1 246.8	0.980	1 205.4	0.955
SCGA-1.0-2.75-a	1 193	1 194.3	1.001	1 184.4	0.992	1 120.1	0.938
SCGA-1.0-2.75-b	1 165	1 194.3	1.025	1 184.4	1.016	1 120.1	0.961
SCGA-0.0-3.75-a	1 458	1 550.0	1.063	1 584.4	1.086	1 502.1	1.030
SCGA-0.0-3.75-b	1 450	1 550.0	1.068	1 584.4	1.092	1 502.1	1.035
SCGA-0.5-3.75-a	1 374	1 493.7	1.087	1 545.6	1.125	1 447.6	1.053
SCGA-0.5-3.75-b	1 393	1 493.7	1.072	1 545.6	1.110	1 447.6	1.039
SCGA-1.0-3.75-a	1 273	1 403.7	1.102	1 483.2	1.165	1 360.0	1.068
SCGA-1.0-3.75-b	1 339	1 403.7	1.048	1 483.2	1.108	1 360.0	1.015
SCGA-0.0-4.50-a	1 712	1 783.8	1.041	1 945.0	1.136	1 790.0	1.045
SCGA-0.0-4.50-b	1 701	1 783.8	1.048	1 945.0	1.143	1 790.0	1.052
SCGA-0.5-4.50-a	1 627	1 727.7	1.061	1 906.2	1.172	1 734.3	1.065
SCGA-0.5-4.50-b	1 686	1 727.7	1.024	1 906.2	1.131	1 734.3	1.028
SCGA-1.0-4.50-a	1 570	1 638.7	1.043	1 821.0	1.160	1 644.9	1.047
SCGA-1.0-4.50-b	1 527	1 638.7	1.073	1 821.0	1.192	1 644.9	1.077

注： $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 分别为规范中不同公式的承载力计算值。

表 8 修正参数的拟合值

Table 8 Modified parameter fitting values

参数	公式(1) <sup>[20]</sup>	公式(2) <sup>[20]</sup>	公式(3) <sup>[21]</sup>
$\mu$	0.908 6	0.635 8	0.776 3
$\mu_{5\%}$	[0.81,1.00]	[0.55,0.71]	[0.69,0.85]
$\beta$	64.11	429.20	291.60
$\beta_{5\%}$	[-73.25,201.50]	[300.00,558.50]	[176.80,406.50]
$R^2$	0.965 2	0.940 8	0.965 1

注： $\mu_{5\%}$ 和 $\beta_{5\%}$ 分别为修正系数和截距修正量的95%置信区间。

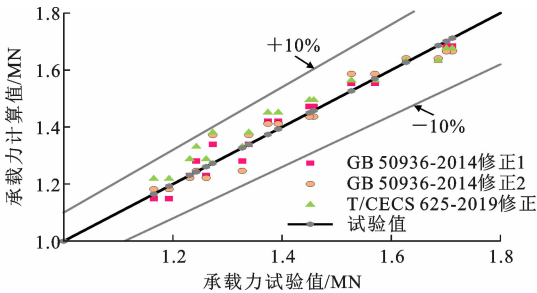


图 12 承载力修正计算结果

**Fig. 12 Calculation results of bearing capacity modification**

数从 0.576 提升至 1.308,轴压承载力提升了 24.44%。煤矸石粗骨料取代率对试件承载力影响不大,100%取代率下与 0%取代率下相比,承载力平均降低 10.20%;50%取代率与 0%取代率相比,试件的承载力平均降低程度仅为 3.78%。

(2)钢材屈服强度、钢管壁厚和含钢率对承载力的 Spearman 相关系数均为 0.93 且通过了显著性检验,为关键影响因素;煤矸石粗骨料取代率与轴压承载力为负相关且 Spearman 相关系数仅为 0.33。因此可以通过提升上述关键影响因素来降低构件因取代率提升所产生的承载力上的差异。

(3)GB 50936—2014 中基于极限平衡理论与统一强度理论给出的圆钢管混凝土短柱轴压承载力的计算公式在用于钢管煤矸石混凝土轴压短柱承载力计算时平均偏差均小于 10%,计算值较试验值偏大。《钢管再生混凝土结构技术规程》(T/CECS 625—2019)中的理论公式计算值与试验值接近。

(4)引入修正系数与截距修正量对 GB 50936—2014 规范与 T/CECS 625—2019 规程中的理论计算公式进行拟合修正后,判定系数  $R^2$  均大于 0.94,平均偏差均小于 3%,试验数据均匀分布在修正公式计算值两侧,可供工程应用参考。

参考文献:

References:

[1] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 3 版.

北京:科学出版社,2016.

HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures — theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press,2016.

[2] 王栋民,房奎圳. 煤矸石资源化利用技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社,2021.

WANG Dongmin, FANG Kuizheng. Coal gangue resource utilization technology [M]. Beijing: China Building Materials Press,2021.

[3] ZHOU M,DOU Y W,ZHANG Y Z,et al. Effects of the variety and content of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete[J]. Construction and Building Materials,2019,220:386-395.

[4] ZHANG Y Z,WANG Q H,ZHOU M,et al. Mechanical properties of concrete with coarse spontaneous combustion gangue aggregate (SCGA): experimental investigation and prediction methodology [J]. Construction and Building Materials,2020,255:119337.

[5] 白国良,朱超,王建文,等. 煤矸石混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(12):49-55.

BAI Guoliang,ZHU Chao,WANG Jianwen,et al. Experimental study on shear behavior of coal gangue concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2020,41(12):49-55.

[6] 李幅昌,张海霞,杨志坚. 钢管煤矸石混凝土结构的抗震性能[M]. 北京:科学出版社,2018.

LI Guochang,ZHANG Haixia,YANG Zhijian. Seismic performance of concrete-filled steel tube with coal gangue[M]. Beijing:Science Press,2018.

[7] 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): 128-136.

NIU Haicheng,CAO Wanlin,DONG Hongying,et al. Experimental research on highstrength recycled concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6):128-136.

[8] 吴波,刘伟,刘琼祥,等. 钢管再生混合短柱的轴压性能试验[J]. 土木工程学报,2010,43(2):32-38.

WU Bo,LIU Wei,LIU Qiongxiang,et al. Experimental study on the behavior of recycled-concrete-segment/lump filled steel tubular stub columns subjected to concentrically axial load[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(2):32-38.

[9] 陈宗平,郑述芳,李启良,等. 方钢管再生混凝土长柱偏心受压承载性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012,33(9):21-29.

CHEN Zongping,ZHENG Shufang,LI Qiliang,et al.

- Experimental study on behavior of recycled aggregate concrete filled square steel tubular long columns under eccentric compression loading [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 21-29.
- [10] 王玉银, 陈杰, 纵斌, 等. 钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 170-177.  
WANG Yuyin, CHEN Jie, ZONG Bin, et al. Mechanical behavior of axially loaded recycled aggregate concrete filled steel tubular stubs and reinforced recycled aggregate concrete stubs [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 170-177.
- [11] 陈梦成, 方苇, 黄宏, 等. 锈蚀圆钢管再生混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 138-146.  
CHEN Mengcheng, FANG Wei, HUANG Hong, et al. Axial compressive behavior of recycled concrete filled corroded circular steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 138-146.
- [12] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土轴压长柱试验研究及力学性能分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 12-20.  
ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study and mechanical behavior analysis of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 12-20.
- [13] 黄宏, 孙微, 陈梦成, 等. 方钢管再生混凝土轴压短柱力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增1): 215-221.  
HUANG Hong, SUN Wei, CHEN Mengcheng, et al. Experimental research on mechanical behavior of recycled concrete-filled square steel tubular stub columns subjected to axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S1): 215-221.
- [14] 李兵, 张齐, 孟爽. 方钢管再生混凝土短柱轴压承载力有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4): 29-34.  
LI Bing, ZHANG Qi, MENG Shuang. Finite element analysis of bearing capacity for recycled concrete-filled square steel tubular stub columns under axial compression [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 29-34.
- [15] 张玉琢, 吕学涛, 李晓婷. 中空夹层方钢管再生混凝土柱火灾后剩余承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(1): 76-84.  
ZHANG Yuzhuo, LU Xuetao, LI Xiaoting. Residual bearing capacity of hollow sandwich square steel tube recycled concrete column after fire [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(1): 76-84.
- [16] 马辉, 郭婷婷, 李哲, 等. 圆钢管型钢再生混凝土组合柱轴压性能及承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2): 97-105.  
MA Hui, GUO Ting-ting, LI Zhe, et al. Axial compression performance and bearing capacity calculation of recycled concrete filled circular steel tube-profile steel composite columns [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2): 97-105.
- [17] 刘坚, 田勇, 刘长江, 等. 圆钢管钢筋再生混凝土短柱轴压承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5): 97-105.  
LIU Jian, TIAN Yong, LIU Changjiang, et al. Axial compression carrying capacity of reinforced recycled aggregate concrete-filled circular steel tubular stub columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 97-105.
- [18] 沈奇罕, 高奔浩, 王静峰, 等. 椭圆截面钢管钢渣混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增2): 197-203.  
SHEN Qihan, GAO Benhao, WANG Jingfeng, et al. Experimental study on performance of steel slag concrete filled elliptical steel tubular stub columns under axial load [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(S2): 197-203.
- [19] GAO S, ZHAO G H, GUO L H, et al. Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121212.
- [20] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Technical code for concrete filled steel tubular structures: GB 50936—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [21] 钢管再生混凝土结构技术规程: T/CECS 625—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Technical specification for recycled aggregate concrete-filled steel tubular structures: T/CECS 625—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [22] 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
Metallic materials — tensile testing — part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.