

圆钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力有限元分析

张玉琢^{1,2}, 刘进隆¹, 徐倩², 王庆贺¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 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)

摘要 目的 研究煤矸石粗骨料不同取代率下的圆钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的关键影响因素, 提出承载力简化计算式, 为其工程应用提供理论指导。方法 通过 ABAQUS 建立圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱有限元模型, 验证模型可靠性, 并研究试件的破坏模式、应力分布与荷载分配; 在此基础上分析试件在不同取代率下含钢率、钢材屈服强度、混凝土轴心抗压强度对钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的影响。结果 不同取代率下, 含钢率由 4.04% 到 10.25%、混凝土轴心抗压强度由 20 MPa 到 40 MPa、钢材屈服强度从 345 MPa 到 460 MPa, 使构件承载力分别平均提升 41.09%、40.72%、12.90%; 煤矸石粗骨料 100% 取代率下构件的轴压承载力下降幅度低于 16%。结论 圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱较普通混凝土柱仍具有较高承载力; 不同取代率下含钢率、混凝土轴心抗压强度对试件的轴压承载力影响较为显著; 引入煤矸石取代率影响系数的轴压承载力简化计算式与试验值的平均误差率小于 6%, 可供工程应用参考。

关键词 圆钢管混凝土短柱; 煤矸石; 轴压性能; 有限元; 简化计算式

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Circular Concrete-filled Steel Tube Stub Columns Using Spontaneous Combustion Coal Gangue Aggregate Subjected to Axial Compressive Load

ZHANG Yuzhuo^{1,2}, LIU Jinlong¹, XU Qian², WANG Qinghe¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Key Laboratory of Coal Gangue Resource Utilization and Energy-saving Building Materials, Fuxin, China, 123000)

收稿日期: 2021-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808352); 辽宁省教育厅基本科研项目(lnqn202024); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902027)

作者简介: 张玉琢(1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢-固废混凝土组合结构方面研究。

Abstract: The effect of spontaneous-combustion coal gangue aggregate (SCGA) replacement ratio on ultimate compressive strength of circular concrete-filled steel tube (CFST) stub columns under axial load was studied in this paper. The study proposed a simplified formula for predicting ultimate compressive strength and provided theoretical reference for engineering application. The finite element (FE) model was established on the basis of software ABAQUS. Then the rationality of the FE model was verified by the experimental results. According to the FE model, this paper studied the failure mode, stress distribution and load distribution of the specimens. The effect of steel ratio, yield strength of steel and compressive strength of concrete with the change of SCGA replacement on ultimate compressive strength was analyzed. The results showed that with the steel ratio increasing from 4.04% – 10.25%, the ultimate compressive strength increased up to 41.09%. When compressive strength of concrete changed from 20 MPa to 40 MPa, the ultimate compressive load increased 40.72%. The ultimate compressive strength of specimens with steel yield strength of 460 MPa increased up to 12.9% compared to the specimens with steel yield strength of 345 MPa. When the SCGA replacement ratio varied from 0% to 100%, the ultimate compressive strength decreased up to 16%. It suggested that the CFST using SCGA has acceptable axial load bearing capacity. The SCGA replacement ratio, compressive strength of concrete significantly impacted the ultimate compressive strength while the steel yields strength was not obvious. The proposed formula has higher accuracy with the average error below 6%.

Key words: circular concrete-filled steel tube stub column; spontaneous-combustion coal gangue; axial compressive capacity; finite element method; simplified formula

煤矸石混凝土能有效减少建筑业对砂石等不可再生资源的消耗^[1],但较普通混凝土而言,煤矸石混凝土力学性能和耐久性能相对不足,使其结构化应用受到限制^[2-3]。将圆钢管混凝土柱中的粗骨料替换成大宗固废煤矸石,形成一种新型钢-固废混凝土组合柱——圆钢管煤矸石混凝土柱,该柱既继承了圆钢管混凝土柱的力学优势^[4],又解决了煤矸石造成的环境污染问题,同时促进建筑行业减碳绿色发展^[5-6]。

关于煤矸石混凝土材料层面,王晴等^[7]研究煤矸石混凝土的显微硬度性能,结果表明煤矸石集料混凝土界面过渡区的显微硬度低于普通碎石混凝土界面过渡区;周梅等^[8-9]对100%取代率的自燃煤矸石混凝土进行单轴压缩试验,发现随煤矸石骨料掺量增加,试件破坏变为纵向劈裂;张玉琢等^[10]研究不同取代率对煤矸石混凝土力学性能的影响,结果表明掺入100%煤矸石后混凝土的抗压强度、劈拉强度及弹性模量分别下降19.4%、36.1%、32.2%。关于煤矸石混凝土

构件层面,李幅昌等^[11]研究钢管煤矸石混凝土构件压弯时的动力性能,结果显示构件的延性与耗能性能较好;周梅等^[12]研究了自燃煤矸石砂轻-半混凝土叠合板的跨中挠度、结构应变和裂缝特征,结果表明裂缝宽度和挠度满足规范限值;白国良等^[13]进行了煤矸石混凝土梁的受剪试验,结果表明不同煤矸石取代率下梁的斜向开裂荷载降低了8.9%~31.5%;王庆贺等^[14]研究了煤矸石混凝土梁的受弯性能,结果表明单掺煤矸石粗骨料时开裂弯矩和极限弯矩提高而双掺粗、细骨料时降低;张霓等^[15]对GFRP管-煤矸石混凝土-钢管空心柱进行轴压试验,结果表明采用煤矸石骨料后构件的初始刚度降低但增长段提高;闫亚杰等^[16]对两种煤矸石细石混凝土夹层楼板进行静载试验,结果显示两种夹层楼板可满足试验设计工况下的正常使用要求。

综上所述,研究人员针对煤矸石混凝土及其结构化应用方面开展了一定的研究工作。但针对圆钢管煤矸石混凝土柱,缺乏对

不同煤矸石粗骨料取代率下构件轴压承载力影响因素的研究。鉴于此,笔者利用 ABAQUS 建立有限元模型,研究轴压作用下圆钢管煤矸石混凝土短柱在一定参数范围内,含钢率、混凝土轴心抗压强度、钢材屈服强度、煤矸石骨料取代率对构件承载力的影响规律,提出可供工程参考的圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱承载力计算式。

1 有限元模型的建立

1.1 钢材

钢管为满足 Von Mises 屈服准则的低碳钢,采用二次塑流模型,包含弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段和二次塑流段 5 个阶段,其表达式如下:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_e; \\ -A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C, & \varepsilon_e < \varepsilon \leq \varepsilon_{el}; \\ f_y, & \varepsilon_{el} < \varepsilon \leq \varepsilon_{e2}; \\ f_y(1 + 0.6 \frac{\varepsilon - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}}), & \varepsilon_{e2} < \varepsilon \leq \varepsilon_{e3}; \\ 1.6f_y, & \varepsilon_{e3} < \varepsilon. \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_y 为钢材屈服强度; E_s 为钢材弹性模量; $\varepsilon_e = 0.8f_y/E_s$; $\varepsilon_{el} = 1.5\varepsilon_e$; $\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{el}$; $\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{el}$; $A = 0.2f_y/(\varepsilon_{el} - \varepsilon_e)^2$; $B = 2A\varepsilon_{el}$; $C = 0.8f_y + A\varepsilon_e^2 - B\varepsilon_e$ 。

1.2 煤矸石混凝土

核心煤矸石混凝土采用 ABAQUS 软件提供的混凝土塑性损伤模型,该模型适用于具有压拉异性特征的煤矸石混凝土材料。考虑到煤矸石混凝土中骨料取代率对应力应变关系的影响,笔者采用文献[14]中引入骨料取代率影响系数的混凝土应力应变关系模型,其表达式为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ \frac{x}{\psi\beta(x-1)^2 + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_0$; ε_0 为峰值应变, $\varepsilon_0 = (1\ 300 +$

$12.5f_c) \times 10^{-6} \lambda + 800 \times \xi^{0.2} \times 10^{-6}$; λ 为煤矸石骨料取代率影响应变系数, $\lambda = 1 + 0.105r$, r 为煤矸石骨料取代率; ξ 为套箍系数, $\xi = f_y A_s / (f_c A_c)$, f_y 为钢材屈服强度, A_s 为钢管的横截面面积, f_c 为煤矸石混凝土的抗压强度, A_c 为煤矸石混凝土的横截面面积; $y = \sigma/\sigma_0$; $\sigma_0 = f$ 为峰值应力; $\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{(0.25 + (\xi - 0.5)^7)} \times f_c^{0.5} \times 0.5 \geq 1.2$; ψ 为煤矸石骨料取代率影响曲率系数, $\psi = 2 + 1.5r$ 。

1.3 单元选取和网格划分

圆钢管采用壳单元 S4R^[18],在壳的厚度方向上选用有 11 个积分点的 Simpson 积分。核心煤矸石混凝土采用三维实体单元减缩积分 C3D8R,模型中的力学性能采用材料的实测数据。将端板视为刚体进行模拟,其弹性模量设置为 10^{12} MPa,泊松比设置为 0.000 1。

单元网格的划分密度直接影响模型的计算精度与求解效率。通过敏感性分析,最终选定模型网格密度为 20 mm,在保证模拟精度的同时兼顾求解效率。模型网格划分结果如图 1 所示。

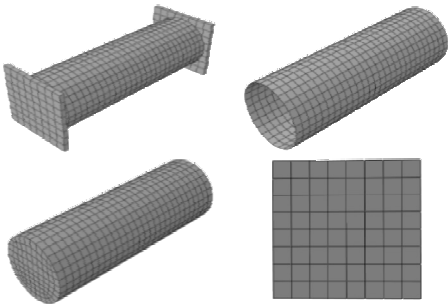


图1 模型网格

Fig. 1 The model mesh

1.4 荷载和边界条件

较大轴向荷载会导致煤矸石混凝土出现塑性流动和软化现象,采用力加载方式难以收敛。笔者采用上端板竖向位移加载,设置上端板 $U_1 = U_2 = 0, UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$; 下端板设置 $U_1 = U_2 = U_3 = 0, UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ 。

1.5 相互作用

钢管、煤矸石混凝土和端板装配完成后三个部分之间荷载的传递通过设置相互作用来实现。端板界面与核心混凝土设置为面面接触,法向硬接触,端板面设置为主面,核心煤矸石混凝土设置为从面。钢管与端板的连接通过采用壳与实体耦合的方式实现。钢管与核心煤矸石混凝土之间定义为表面与表面接触,混凝土为主面,钢管为从面,切向滑移接触库伦摩擦函数,大小设置为 0.6,法向设为硬接触。

表 1 试件实际尺寸和材料强度

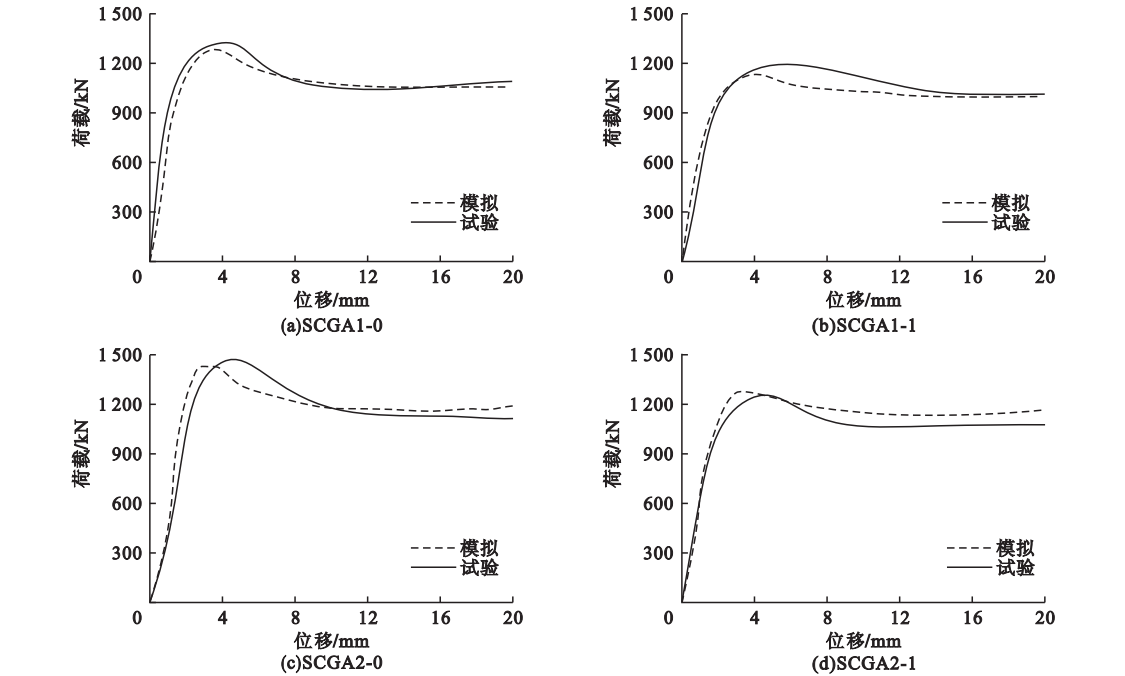
Table 1 The size of specimens and strength of materials							
序号	试件编号	$r/\%$	$D\times t\times L/\text{mm}$	α	f_y/MPa	f_{cu}^{100}/MPa	f_c/MPa
1	SCGA1-0	0	$140\times 2.75\times 420$	0.083	278	55.8	40.3
2	SCGA1-1	100	$140\times 2.75\times 420$	0.083	278	45.7	33.0
3	SCGA2-0	0	$140\times 3.75\times 420$	0.116	285	55.8	40.3
4	SCGA2-1	100	$140\times 3.75\times 420$	0.116	285	45.7	33.0
5	SCGA3-0	0	$140\times 4.50\times 420$	0.142	304	55.8	40.3
6	SCGA3-1	100	$140\times 4.50\times 420$	0.142	304	45.7	33.0

注:SCGA 表示圆钢管煤矸石混凝土短柱; D 表示试件直径; t 表示钢管壁厚; L 表示试件长度; α 表示含钢率; f_{cu}^{100} 表示试验测得的 100 mm 煤矸石混凝土立方体试块抗压强度值。

2 有限元分析

2.1 荷载 - 位移曲线

基于 ABAQUS 软件,笔者建立了圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱的有限元分析模型。根据课题组前期的试验结果^[17],利用有限元模型分别进行轴压模拟。试件的尺寸和材料如表 1 所示。利用有限元模型获得构件的荷载位移曲线,与前期试验结果的结果对比,如图 2 所示。图中各试件荷载 - 位移曲线模拟值与试验值的误差均未超过 10%,与试验结果吻合良好。



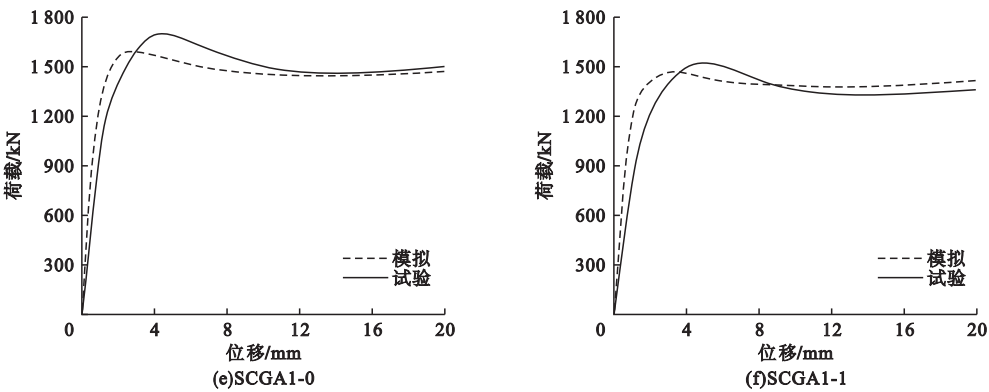


图2 试件的荷载-位移曲线

Fig. 2 The load-displacement curve of specimen

2.2 轴压承载力

承载力模拟值 N_{uc} 与试验值 N_{ue} 如图3所示。由图可知, N_{uc}/N_{ue} 的平均值和标准差分别为0.969和0.027, N_{uc} 与 N_{ue} 的平均误差在10%以内。随钢管壁厚增加,即试件含钢率增大,圆钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力增大;当其他条件固定时,随煤矸石粗骨料取代率的增加,试件承载能力降低。

钢率、取代率对柱的承载力有较大影响^[18]。因此,通过笔者建立的有限元模型,采用控制变量的原则,分别探究不同煤矸石粗骨料取代率下(0%、25%、50%、75%、100%),含钢率 α 、钢材屈服强度 f_y 、混凝土轴心抗压强度 f_c 对圆钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的影响规律。参数取值如表2所示,其中,所有圆柱形试件的尺寸均为600 mm×200 mm。

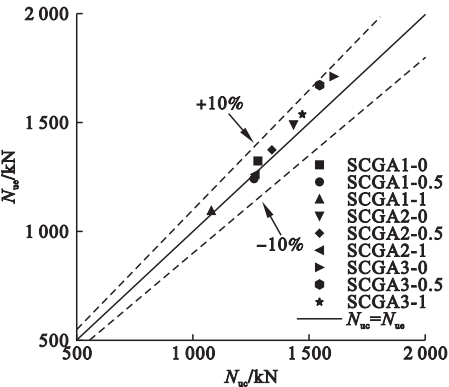


图3 承载力模拟值与试验值的比较

Fig. 3 The comparison of simulated and measured bearing capacity values

3 圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱极限承载力参数分析

通过笔者建立的圆钢管煤矸石混凝土有限元模型,对荷载-位移曲线和极限承载力进行分析,与试验吻合良好,模拟值与试验值的误差在10%以内。相关研究结果表明,含

表2 参数取值范围

Table 2 The range of parameters

参数	$\alpha/\%$	f_y/MPa	f_c/MPa
取值	4.04、6.09、	345、390	20、25
	8.16、10.25	420、460	30、40
默认值	4.04	345	20

3.1 含钢率

图4为不同取代率下,含钢率对试件承载力的影响。取代率小于50%时,试件在相同含钢率下随取代率提升而导致的承载力最大降幅仅为2.80%;取代率超过50%以后,因取代率提升所导致的试件承载力最大降幅为5.99%。含钢率对圆钢管煤矸石混凝土的影响与钢管普通混凝土相似,即随着试件的含钢率增加,试件的极限承载力也随之增加。其中含钢率 α 从4.04%提升到10.25%,试件承载力平均提升35.01%。

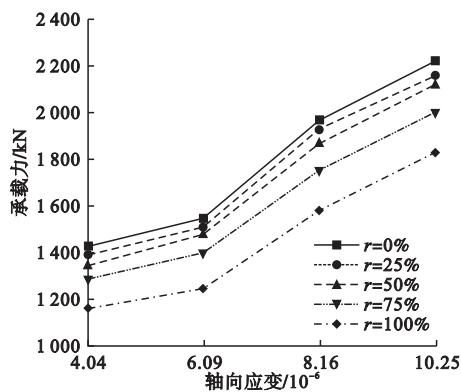


图4 含钢率对轴压承载力的影响

Fig. 4 The effect of steel ratios on axial bearing capacity

由于含钢率较小时钢管对核心煤矸石混凝土的约束作用较弱,因此试件随取代率的增加而导致的承载力下降较为明显;当含钢率大幅度上升后,因为钢管对煤矸石混凝土的环向约束力增强,所以随取代率提高所导致的试件承载力降低幅度减小,但是当取代率超过75%以后,由于核心混凝土骨料强度的明显降低,含钢率提升所导致的承载力增加量降低。

3.2 钢材屈服强度

试件的轴压承载力与钢材屈服强度的关系如图5所示。

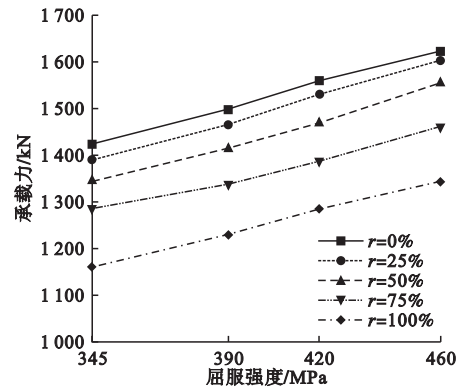


图5 钢材屈服强度对轴压承载力的影响

Fig. 5 The effect of steel yield strength on axial bearing capacity

由图可知,钢材屈服强度与对应试件的轴压承载力近似呈线性关系。随着取代率的提升,承载力逐渐降低,25%取代率以后,试

件承载力随取代率提升而导致的降幅不断增加。当 $r = 100\%$ 时,钢材屈服强度从 345 MPa 提升至 390 MPa,试件的承载力提升 5.65%;钢材屈服强度从 390 MPa 提升至 420 MPa,试件的承载力提升 4.27%;钢材屈服强度从 420 MPa 提升至 460 MPa,试件的承载力提升 4.38%。

由于钢材屈服强度的增加,钢管和煤矸石混凝土的纵向应力都得到相应提升,所以试件的承载力也得到提高。此外,由于钢材屈服应力的提高会使得煤矸石混凝土的纵向应力和延性改善程度增加,因此可以在一定程度上削弱取代率提升对承载力产生的不利因素。

3.3 混凝土轴心抗压强度

混凝土轴心抗压强度对轴压承载力的影响如图6所示。由图6可知,试件的承载力随混凝土轴心抗压强度 f_c 增加而提升。相同煤矸石混凝土轴心抗压强度下,构件的轴压承载力随取代率的提升而降低。取代率从 75% 提升到 100% 时,试件承载力降低较为明显; f_c 为 20 MPa 时,承载力降低最少为 125.0 kN; f_c 为 40 MPa 时,承载力降低最大为 151.9 kN。混凝土抗压强度从 20 MPa 提升至 40 MPa 使得试件承载力提升,不同取代率下平均提升约 40.72%。

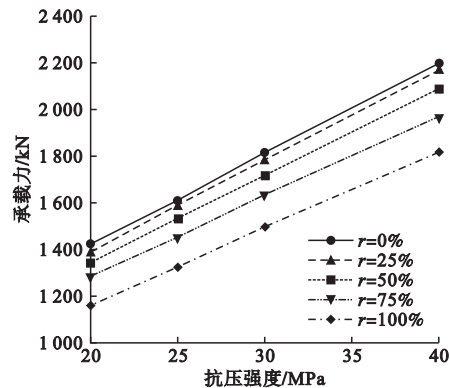


图6 混凝土轴心抗压强度对轴压承载力的影响

Fig. 6 The effect of axial compressive strength on axial compressive load capacity

由于圆钢管煤矸石混凝土短柱承重的主要部分为核心混凝土区域,因此混凝土轴心抗压强度 f_c 对试件承载力的影响程度较大。由于煤矸石粗骨料较传统粗骨料强度低^[3],故在煤矸石混凝土轴心抗压强度相同时,构件承载力随煤矸石粗骨料取代率的增加而降低。

综上可知,不同取代率下钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力随含钢率、钢材屈服强度和混凝土轴心抗压强度的提高而增加,其中混凝土轴心抗压强度和含钢率对承载力的影响程度较大,是承载力的关键影响因素。在其他参数相同的情况下,随煤矸石骨料取代率的提高会使得承载力的增加量降低,且随着煤矸石取代率的不断增加,承载力降低程度将逐渐增大。

4 承载力计算式

4.1 公式的拟合

由叠加原理可知,钢管和煤矸石混凝土单独作用时的承载力之和等于构件的轴压承载力,即 $N_{u0} = f_c A_c + f_y A_y$ 。但实际由于煤矸石骨料的增加以及钢管和混凝土的相互作用,都会影响构件的承载力。结合上文中不同取代率下试件随含钢率、钢材屈服强度和混凝土轴心抗压强度对承载力的影响,考虑煤矸石粗骨料取代率与关键影响因素,结合有限元模拟结果提出圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱承载力简化计算式。

$$N_u = 0.78\beta c N_{u0} + 236, \tag{3}$$

$$N_{u0} = f_c A_c + f_y A_y. \tag{4}$$

式中: N_u 为圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱承载力; N_{u0} 为构件叠加承载力; β 为煤矸石骨料取代率影响系数; $r = 0$ 时, $\beta = 1.324$, $r = 50\%$ 时, $\beta = 1.26$, $r = 100\%$ 时, $\beta = 1.08$,中间部分线性取值; $c = 1.158\alpha + 1.03$,表示含钢率提升系数。

β 可根据煤矸石粗骨料取代率 r 与模拟承载力和叠加承载力比值 N_{uc}/N_{u0} 的关系图像确定,如图7所示。由图可知, N_{uc}/N_{u0} 随

取代率的增加而下降且以50%为转折点呈双折线形,拟合结果显示:当 $r = 0$ 时, $N_{uc}/N_{u0} = 1.32$;当 $r = 50\%$ 时, $N_{uc}/N_{u0} = 1.26$;当 $r = 100\%$ 时, $N_{uc}/N_{u0} = 1.08$ 。

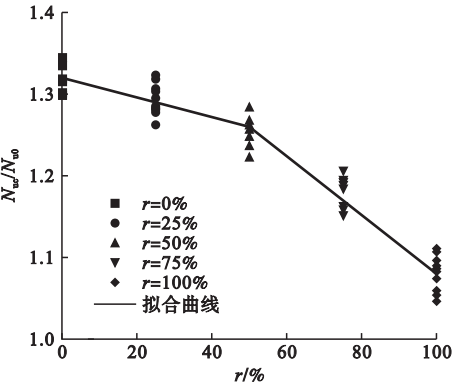


图7 N_{uc}/N_{u0} 与 r 关系

Fig. 7 The $N_{uc}/N_{u0} - r$ curve

表征外钢管对核心煤矸石混凝土约束效应的含钢率提升系数 c 可根据含钢率 α 和 N_{uc}/N_{u0} 的关系确定,如图8所示,其拟合关系式如下:

$$N_{uc}/N_{u0} = 1.158\alpha + 1.03. \tag{5}$$

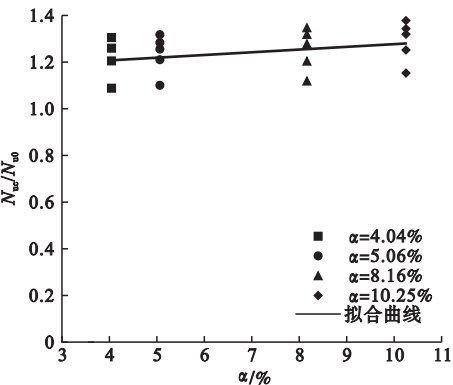


图8 α 与 N_{uc}/N_{u0} 图像

Fig. 8 The $N_{uc}/N_{u0} - \alpha$ curve

结合图7、图8的拟合结果,考虑取代率对承载力的影响,将各构件叠加承载力 N_{u0} 分别乘以其含钢率和取代率所对应的 N_{uc}/N_{u0} ,得到的叠加承载力修正值 N_{u1} 。 N_{u1} 和 N_{uc} 的拟合关系如图9所示,拟合得到修正系数为0.78,截距修正量为236。

4.2 计算式验算

轴压承载力计算结果与试验结果的对比

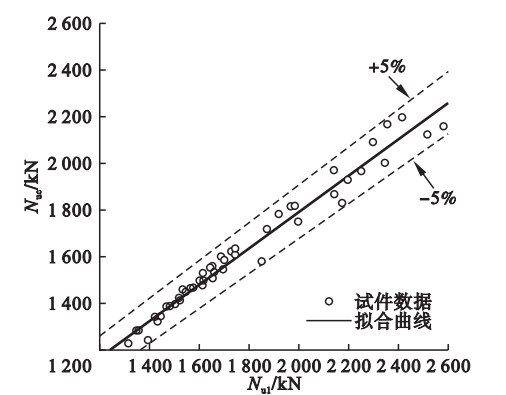


图9 N_{ul} 与 N_{uc} 图像

Fig. 9 The $N_{ul} - N_{uc}$ curve

如表3所示。由表3可知,承载力计算值与试验值的误差小于6%, N_{uc}/N_u 平均值为1.02,标准差为0.056,提出的承载力计算式精度较高。

表3 轴压承载力计算结果与试验结果比较

Table 3 The comparison between the calculated and the experimental results

试件编号	承载力 试验值 N_{uc}/kN	承载力 计算值 N_u/kN	N_{uc}/N_u
SCGA-0.0-2.75-278	1 327	1 352	0.981
SCGA-0.5-2.75-278	1 246	1 250	0.996
SCGA-1.0-2.75-278	1 181	1 040	1.106
SCGA-0.0-3.75-285	1 492	1 554	0.960
SCGA-0.5-3.75-285	1 432	1 441	0.994
SCGA-1.0-3.75-285	1 265	1 201	1.053
SCGA-0.0-4.50-304	1 710	1 752	0.976
SCGA-0.5-4.50-304	1 656	1 629	1.017
SCGA-1.0-4.50-304	1 536	1 361	1.128

注:试件编号 SCGA-0-2.75-278,0 表示取代率,% ; 2.75 表示钢管厚度,mm;278 表示钢材屈服强度,MPa; SCGA-0,SCGA-0.5 和 SCGA-1 的轴心抗压强度 f_c 分别为 40.3 MPa,37.5 MPa 和 33.0 MPa;试件长度和直径均为 420 mm 和 140 mm。

5 结 论

(1)试件的荷载-位移曲线与试验结果吻合良好,模拟值与试验值的误差在10%以内;钢管的应力主要集中在柱中部区域,煤矸石混凝土的应力主要集中在端部外围和中部

核心区域,试件破坏模态呈鼓形。

(2)含钢率、煤矸石混凝土轴心抗压强度的提高会显著增强试件的承载力;不同取代率下,含钢率从4.04%提升到10.25%或 f_c 从20 MPa提升到40 MPa,都使试件承载力平均提升约为41%;钢材屈服强度对承载力的影响较小,不同取代率下, f_y 从345 MPa提升至460 MPa,承载力平均提升12.90%。

(3)圆钢管煤矸石混凝土轴压承载力随煤矸石粗骨料取代率的提升而降低,且降低程度随着取代率的增加而增大。25%取代率下,承载力降低较小,未超过3%;100%取代率下,承载力降低程度最大,约为16%。与圆钢管混凝土柱相比,圆钢管煤矸石混凝土轴压短柱仍具有较高承载力。

(4)依据叠加原理,笔者提出了考虑含钢率和煤矸石骨料取代率影响的轴压承载力简化计算式,计算结果与试验值误差小于6%,可为工程提供参考。

参考文献

[1] 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: Chinese Building Materials Press,2021.)

[2] 杨尚谕,周梅,张玉琢,等. 自燃煤矸石粗集料取代率对混凝土断裂韧性的影响[J]. 建筑材料学,2020,23(4):858-864.
(YANG Shangyu,ZHOU Mei,ZHANG Yuzhuo, et al. Effect of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate replacement ratio on fracture properties of three-point bending concrete beam [J]. Journal of building materials, 2020, 23 (4): 858 - 864.)

[3] 王庆贺,李喆,张玉琢,等. 基于两相复合材料的煤矸石混凝土弹性模量研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(2):254-261.
(WANG Qinghe, LI Zhe, ZHANG Yuzhuo, et al. Prediction formula of elastic modulus of coal gangue concrete based on two-phase composite materials [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37 (2):254 - 261.)

[4] 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,2018.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular

- structures: theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.)
- [5] 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 steel tube coal gangue concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2018.)
- [6] 李幅昌, 龙海波, 王兆强. 钢管煤矸石混凝土轴压中长柱的非弹性屈曲荷载[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2004, 20(4): 291-293.
(LI Guochang, LONG Haibo, WANG Zhaoqiang. Inelastic yield load of gangue concrete filled steel tubular middle long columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2004, 20(4): 291-293.)
- [7] 王晴, 冉坤, 王继博, 等. 自燃型煤矸石混凝土界面过渡区微观特性研究[J]. 混凝土, 2021(8): 69-71.
(WANG Qing, RAN Kun, WANG Jibo, et al. Study on the microscopic properties of the interfacial transition zone in spontaneous combustion coal gangue concrete [J]. Concrete, 2021(8): 69-71.)
- [8] 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.
- [9] 周梅, 李国栋, 窦艳伟, 等. 自燃煤矸石骨料混凝土单轴受压破坏特征及强度分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(11): 3528-3532.
(ZHOU Mei, LI Guodong, DOU Yanwei, et al. Failure characteristics and strength analysis of spontaneous combustion gangue aggregate concrete under uniaxial compression [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2018, 37(11): 3528-3532.)
- [10] ZHANG Y Z, WANG Q H, ZHOU Mei, et al. Mechanical properties of concrete with coarse spontaneous combustion gangue aggregate (SCGA): experimental investigation and prediction methodology [J]. Construction and building material, 2020(255): 119337.
- [11] 李幅昌, 舒铮, 张春雨, 等. 钢管煤矸石混凝土压弯构件的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 1052-1057.
(LI Guochang, SHU Zheng, ZHANG Chunyu, et al. Finite element analysis of gangue concrete-filled steel tubular beam-columns [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(6): 1052-1057.)
- [12] 周梅, 张院强, 杨尚谕, 等. 自燃煤矸石砂轻混凝土单向叠合板受弯性能[J]. 建筑材料学报, 2021(5): 1066-1072.
(ZHOU Mei, ZHANG Yuanqiang, YANG Shangyu, et al. Flexural behavior of unidirectional laminated plate of spontaneous combustion gangue sand light concrete [J]. Journal of building materials, 2021(5): 1066-1072.)
- [13] 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.)
- [14] 王庆贺, 李喆, 周梅, 等. 自燃煤矸石骨料取代率对煤矸石混凝土梁受弯性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 64-74.
(WANG Qinghe, LI Zhe, ZHOU Mei, et al. Effects of spontaneous-combustion coal gangue aggregate (SCGA) replacement ratio on flexural behavior of SCGA concrete beams [J]. Journal of building structures, 2020, 41(12): 64-74.)
- [15] 张霓, 郑晨阳, 赵中伟, 等. GFRP管-煤矸石混凝土-钢管空心柱轴压试验[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 571-577.
(ZHANG Ni, ZHENG Chenyang, ZHAO Zhongwei, et al. Experimental investigations on axial compression behavior of GFRP tube-coal gangue concrete-steel tube hollow columns [J]. Journal of building materials, 2021, 24(3): 571-577.)
- [16] 闫亚杰, 赵强. 装配式自燃煤矸石细石混凝土夹层楼板设计与试验研究[J]. 混凝土, 2019(6): 130-133.
(YAN Yajie, ZHAO Qiang. Design and experimental study on assembled spontaneous combustion coal gangue fine stone concrete sandwich floor [J]. Concrete, 2019(6): 130-133.)
- [17] ZHANG Y Z, XU Q, WANG Q H, et al. Axial compressive behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns prepared with spontaneous-combustion coal gangue aggregate [J]. Journal of building engineering, 2022, 48(103987): 1-28.
- [18] 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.
(LI Bing, ZHANG Qi, MENG Shuang. Finite element analysis of recycled concrete filled circular steel tube short columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(6): 1037-1043.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)