

方钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力 有限元分析

张玉琢¹, 姬婷婷¹, 刘进隆², 黄怡萌¹, 路林翰¹

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要 目的 研究各设计参数在不同煤矸石粗骨料取代率对方钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的影响规律, 提出轴压承载力计算式。方法 利用 ABAQUS 有限元分析软件建立方钢管煤矸石混凝土短柱轴压有限元模型, 并与试验结果对比, 验证模型的准确性; 分析试件应力分布与荷载分配, 并采用控制变量法分析试件在 5 种煤矸石粗骨料取代率下主要参数对其轴压承载力的影响。结果 相同设计参数下, 试件轴压承载力随煤矸石粗骨料取代率的提高而降低, 且最大降幅未超过 14%; 当试件截面边长一定时, 含钢率对试件轴压承载力的影响最显著, 其中, 含钢率由 7.4% 增加至 20.3% 使试件轴压承载力在不同取代率下平均提升 68.85%。结论 掺入煤矸石粗骨料不会使构件轴压承载力显著劣化, 依据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014), 引入煤矸石粗骨料取代率影响系数后的计算误差小于 5%, 可为相关研究提供参考。

关键词 方钢管混凝土; 煤矸石粗骨料; 轴压承载力; 有限元分析

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式: 张玉琢, 姬婷婷, 刘进隆, 等. 方钢管煤矸石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), 2024, 40(2): 284-292. (ZHANG Yuzhuo, JI Tingting, LIU Jinlong, et al. Finite element analysis of spontaneous-combustion coal gangue concrete filled square steel tube short columns under axial compressive [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2): 284-292.)

Finite Element Analysis of Spontaneous-Combustion Coal Gangue Concrete Filled Square Steel Tube Short Columns under Axial Compressive

ZHANG Yuzhuo¹, JI Tingting¹, LIU Jinlong², HUANG Yimeng¹, LU Linhan¹

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, China, 211189)

Abstract: In order to study the influence of design parameters on the axial bearing capacity of

收稿日期: 2023-02-25

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

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等方面研究。

spontaneous-combustion coal gangue (SCGA) concrete filled square steel tube short columns under different replacement rates of coal gangue coarse aggregate and propose the axial bearing capacity calculation formula, the finite element (FE) model is established by ABAQUS, and the accuracy of the model is verified by comparing with the experimental results. According to the FE model, this paper analyzed the stress distribution and load distribution of the specimens, and the influence of the main parameters of the specimens on its ultimate strength under 5 kinds of SCGA replacement ratios is analyzed by the control variable method. The results show that under the same design parameters, the ultimate strength of the specimen decreases with the increase of the replacement ratio of SCGA, and the maximum reduction is not more than 14%. When the section size of the specimen is fixed, the influence of the steel content on the ultimate strength of the specimen is the most significant. The increase of the steel ratio from 7.4% to 20.3% makes the ultimate strength of the specimen increase by 68.85% on average under different replacement ratios. The addition of SCGA does not significantly deteriorate the axial bearing capacity of the components. According to the 'Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures' (GB 50936—2014), the calculation error after introducing the influence coefficient of coal gangue coarse aggregate replacement rate is within 5%, which can provide reference for related research.

Key words: concrete-filled square steel tubes; spontaneous-combustion coal gangue coarse aggregate; ultimate bearing capacity; finite element analysis

我国采煤过程中产生的煤矸石固体废弃物累计总量已超过 70 亿吨,并以每年 3 ~ 3.5 亿吨的速度增加^[1-2]。将煤矸石筛选破碎后作为粗骨料配置煤矸石混凝土,既可以有效消纳煤矸石固废,又可以降低天然砂石资源的消耗^[3-4]。煤矸石相较于天然碎石而言,其强度低且具有多孔、吸水等特性,导致煤矸石混凝土结构化应用受到限制^[5-6]。将煤矸石混凝土灌入方钢管中,既继承钢管混凝土柱诸多优点,又弥补了煤矸石粗骨料耐久性与强度方面的不足^[7-8]。

目前,众多学者针对钢管普通混凝土结构的力学性能进行了大量研究。任庆新等^[9]采用有限元方法对圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯性能进行分析,研究了不同参数对构件抗弯承载力的影响;张素梅等^[10]通过轴压试验研究了不同参数对钢管约束的钢管混凝土轴压力学性能的影响;王文达等^[11]利用有限元模拟压弯剪试验,研究了内配型钢方钢管混凝土构件压弯剪复合受力工作机理。此外,学者们在煤矸石混凝土材料性能与结构化应用方面进行了研究。

李幅昌等^[12]利用有限元模型分析了钢管煤矸石混凝土柱在标准火灾作用下的温度场分布规律,研究了不同参数对温度场的影响;王庆贺等^[13]通过建立钢筋煤矸石混凝土梁受弯构件有限元模型,研究了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;张玉琢等^[14]利用 ABAQUS 有限元分析软件对圆钢管煤矸石混凝土短柱的轴压性能进行了研究。

目前针对方钢管煤矸石混凝土短柱的受力机理与承载力的研究不多。对此,在课题组前期方形钢管煤矸石混凝土短柱轴向压缩试验^[15]基础上,利用 ABAQUS 有限元分析软件建立有限元模型,研究不同煤矸石粗骨料取代率下不同对方钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的影响,并在《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)基础上,量化煤矸石粗骨料对构件轴压承载力的影响,提出适用于方钢管煤矸石混凝土短柱的承载力计算式;研究表明:煤矸石粗骨料的掺入不会显著劣化构件的轴压承载力,所提出的修正式计算精度良好。

1 有限元模型的建立

1.1 材料本构关系模型

1.1.1 钢 材

方钢管本构选择为二次塑流模型,其在多轴应力状态下满足 Von Mises 屈服准则,包括弹性段、弹塑性段、塑性段、强化段和二次塑流段五个阶段,其表达式如下:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e; \\ -A\varepsilon_s^2 + B\varepsilon_s + C, & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1}; \\ f_y, & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2}; \\ f_y \left[1 + 0.6 \times \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e1}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right], & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3}; \\ 1.6f_y, & \varepsilon_s \geq \varepsilon_{e3}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_y 为钢材的屈服强度; E_s 为钢材的弹性模量; $\varepsilon_e = 0.8f_y/E_s$; $\varepsilon_{e1} = 1.5\varepsilon_e$; $\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{e1}$; $\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{e1}$; $A = 0.2f_y/(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2$; $B = 2A\varepsilon_{e1}$; $C = 0.8f_y + A\varepsilon_e^2 - B\varepsilon_e$.

1.1.2 煤矸石混凝土

核心煤矸石混凝土选用 ABAQUS 有限元分析软件中提供的塑性损伤模型,该模型能够模拟中低围压条件下混凝土在拉力作用下的开裂失效和压力作用下的受压破碎。目前尚未有学者提出钢管煤矸石混凝土约束本构,笔者选用韩林海提出的方钢管混凝土约束本构,并根据试验数据修正了煤矸石混凝土轴心抗压强度、弹性模量随煤矸石粗骨料取代率的计算式。

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x = \varepsilon/\varepsilon_0$; $y = \sigma/\sigma_0$; $\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$; $\varepsilon_c = (1\,300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6}$; $\beta_0 = f'_c{}^{0.1}/1.2\sqrt{1+\xi}$; $E_c = (1 - 0.32r) \times 10^5/(2.2 + 34.7/f_{cu})$; $\sigma_0 = f'_c = f_c \cdot \alpha$; $\alpha = -0.1413r^2 - 0.027\,12r + 1$; $\eta = 1.6 + 1.5/x$; r 为自燃煤矸石粗骨料取代率。

1.2 有限元计算模型

1.2.1 单元类型和网格划分

钢管选用四节点减缩积分的壳单元 S4R,壳单元厚度方向采用 9 个积分点的 Simpson 积分。核心煤矸石混凝土均采用八节点缩减积分的三维实体单元 C3D8R。通过网格敏感性分析确定了有效网格密度为 20 mm,以兼顾计算精度与计算效率。

1.2.2 边界条件与相互作用

构件上端面设置为 $U_1 = U_2 = 0$,竖向位移加载 $U_3 = 20\text{ mm}$, $UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$; 下端面设置 $U_1 = U_2 = U_3 = 0$, $UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ 。核心煤矸石混凝土与方钢管在法向方向上通过“硬接触”相互作用,切向方向上采用库伦摩擦模型,摩擦系数取 0.6 可以模拟钢管与混凝土界面低速滑移的实际状态。端板与核心混凝土法向之间采用绑定约束,上下端板与钢管采用壳与实体耦合约束。模型边界约束和荷载施加如图 1 所示。

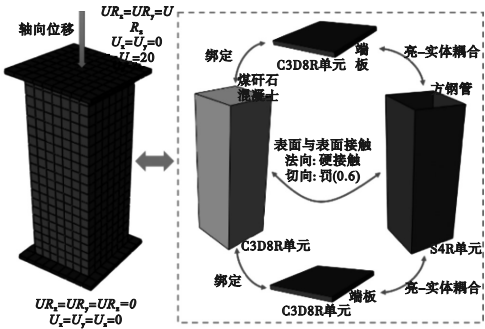


图 1 模型相互作用

Fig. 1 The interaction of model

2 有限元模型的验证

2.1 荷载-纵向应变曲线

为验证所建模型的可靠性,按照表 1 的试件参数进行方钢管煤矸石混凝土短柱轴心受压的有限元计算。将通过有限元建模计算得到的荷载-纵向应变曲线与课题组前期的试验结果^[15]进行比较,如图 2 所示。

表 1 试件参数设计表

Table 1 The design table of specimen parameters

序号	试件编号	$D \times t \times L/\text{mm}$	$\alpha/\%$	$r/\%$	f_y/MPa	$f_{cu,\text{test}}/\text{MPa}$	N_u/kN
1	S-1.0-2.75-a/b	$150 \times 2.75 \times 450$	7.8	100	278	43.4	1 593
2	S-0.5-2.75-a/b	$150 \times 2.75 \times 450$	7.8	50	278	49.8	1 746
3	S-0.0-2.75-a/b	$150 \times 2.75 \times 450$	7.8	0	278	53.0	2 041
4	S-1.0-3.75-a/b	$150 \times 3.75 \times 450$	10.8	100	287	43.4	1 547
5	S-0.5-3.75-a/b	$150 \times 3.75 \times 450$	10.8	50	287	49.8	1 675
6	S-0.0-3.75-a/b	$150 \times 3.75 \times 450$	10.8	0	287	53.0	2 011

注:以 S-1.0-2.75-a/b 为例,S 表示方形截面,1.0 表示煤矸石取代率为 100%,2.75 表示钢管厚度,a/b 分别表示同组参数下 a、b 两个试件; D 、 t 、 L 分别表示试件截面边长、钢管壁厚和试件高度。

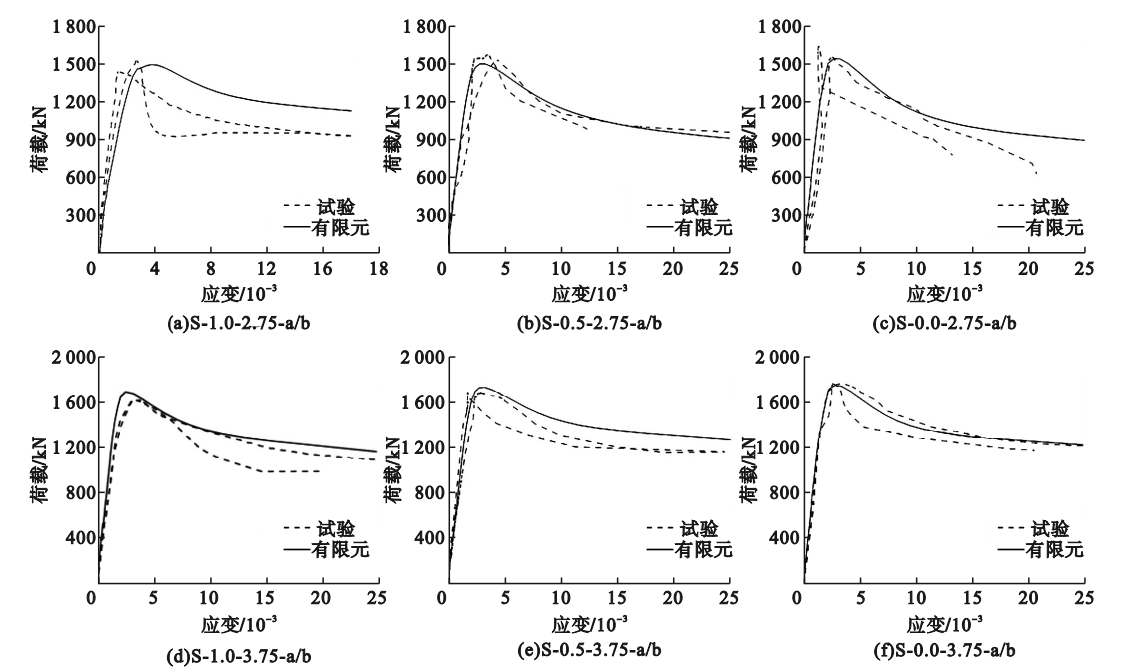


图 2 试件的荷载 - 纵向应变曲线

Fig. 2 The load-longitudinal strain curves of the specimen

由图 2 可以看出,各试件荷载 - 纵向应变曲线模拟值与试验值吻合良好。

2.2 轴压承载力

方钢管煤矸石混凝土构件的极限轴压承载力模拟值 N_{uc} 与试验值 N_{ue} 的对比如图 3 所示。由图 3 可知,模拟值与试验值的最大相对误差为 8.295%,平均误差在 5% 以内, N_{uc}/N_{ue} 的平均值为 1.061,标准差为 0.034。即有限元计算结果与试验结果吻合较好,利用有限元模型研究方形钢管煤矸石混凝土短柱的分析性能是合理的。

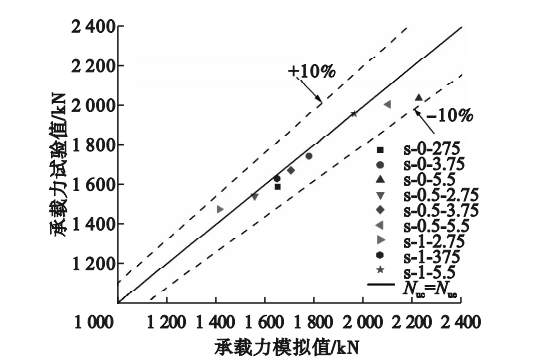


图 3 承载力模拟值与试验值的比较

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

3 有限元模拟结果

3.1 应力分布

以混凝土轴心抗压强度 30 MPa、钢管屈服强度 235 MPa、壁厚 6 mm、煤矸石粗骨料取代率 100% 时的试件 S-1-6 为例,分析竖向位移 20 mm 加载后构件的应力分布特征。图 4 为煤矸石混凝土横截面应力分布情况,可见核心煤矸石混凝土横截面应力呈轴对称分布。同时由于煤矸石混凝土四个角点处受到钢管的侧壁约束作用最强,而越靠近四边中部,钢管对混凝土的约束作用越弱。因此,相同轴向应力下侧向约束力最大的混凝土四

个角点处的 Mises 应力最大并逐渐向各边的中部减小。图 4(a)、(b)为试件的荷载处于弹性与弹塑性阶段的交界点处,混凝土上下端部的四个角点处 Mises 应力值为 $1.15 f_c$, 四边中部处为 $0.48 f_c$;图 4(d)试件的荷载达到了峰值点,核心煤矸石混凝土中截面的四个角部出现应力集中,此时 Mises 应力值达到了 $1.92 f_c$ 。由图 4(e)、(f)可以看出,煤矸石混凝土端面的四个角点处应力还在不断增加,而混凝土中截面的角部应力不断减小,由 $1.92 f_c$ 减小到了 $1.50 f_c$,此时试件的荷载处于塑性与收敛阶段的交界点处。

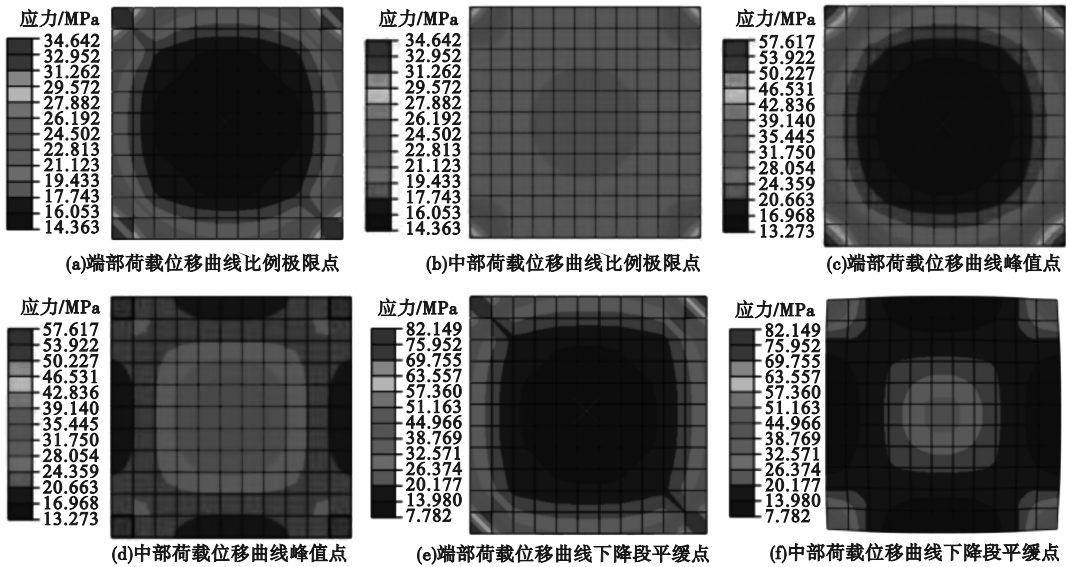


图 4 煤矸石混凝土横截面应力分布

Fig. 4 The cross-section stress distribution of coal gangue concrete

完全加载后的钢管、煤矸石混凝土外部以及内部纵截面的应力云图如图 5 所示。由

图 5 可以看出,由于有限元模型为材料分布且无初始缺陷的理想状态,钢管腰腹上下处

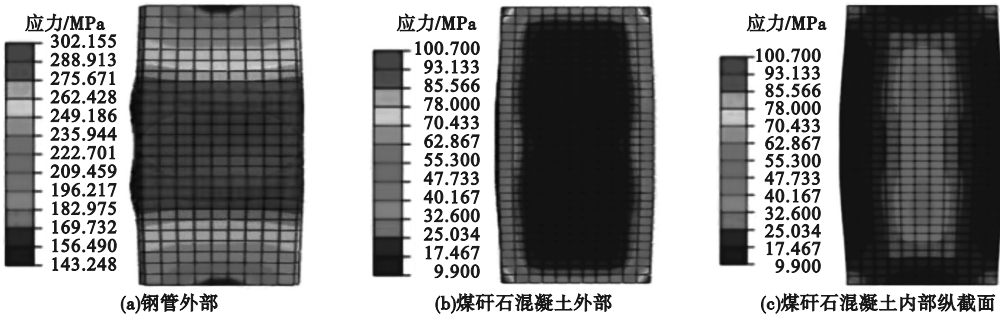


图 5 钢管与煤矸石混凝土的应力分布

Fig. 5 The stress distribution of steel pipe and coal gangue concrete

的四个角部出现了明显的鼓曲变形而并无剪切破坏,此时 Mises 应力最大值为 302 MPa;煤矸石混凝土外部的最大应力处于混凝土上下端面的四个角部区域,并沿着柱高方向向腰腹处不断减小,Mises 应力值由 $3.36 f_c$ 减小到了 $1.59 f_c$;煤矸石混凝土纵截面云图中最大应力主要集中在中上部与中下部,此时 Mises 应力值达到了 $1.34 f_c$,可以看出中间核心区域为完全加载后的煤矸石混凝土的主要工作区域。

3.2 荷载分配

以试件 S-1-6 为例,分析组合构件的荷载分配规律(见图 6)。由图可知,随着轴向应变的不断增加,钢管达到荷载峰值的速率最快。当方钢管煤矸石混凝土短柱达到极限荷载时,煤矸石混凝土仍处于弹塑性阶段,而钢管端面已达到屈服应力并后续变化较小。荷载达到峰值点后,煤矸石混凝土所受的荷载随应变的增加不断减小,而试件所受的荷载随着应变的增加前期明显减小后期略微增大。

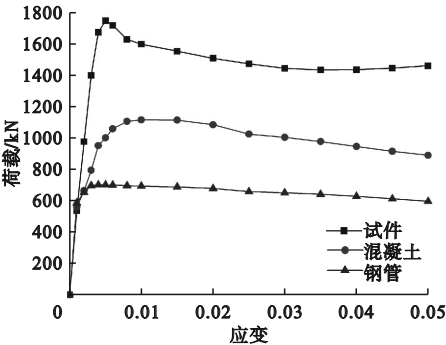


图 6 钢管与混凝土的荷载分配

Fig. 6 The load distribution of steel pipes and concrete

4 轴压承载力参数分析

方钢管煤矸石混凝土短柱的轴压承载力会受到煤矸石粗骨料取代率 r 、钢管屈服强度 f_y 、混凝土轴心抗压强度 f_c 、含钢率 α 以及相对截面边长等因素的影响。因此,笔者利用所建立的有限元模型分析不同煤矸石粗骨料取代率下各参数对试件轴压承载力的影响

规律,各参数取值见表 2。根据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)给出的矩形钢管混凝土柱边长不宜小于 168 mm,设定所有试件的默认截面边长 170 mm,高 510 mm,并始终保持 $L/D = 3$ 。

表 2 参数取值范围

Table 2 The range of parameters					
项目	$r/\%$	f_y/MPa	f_c/MPa	$\alpha/\%$	D/mm
范围	0,25,50,100	235,345,390,420	30,35,40,45	7.4,11.5,15.8,20.3	170,255,340,425
默认值	100	235	30	7.4	170

4.1 方钢管屈服强度

方钢管屈服强度在不同煤矸石粗骨料取代率下对试件轴压承载力的影响如图 7 所示。由图 7 可知,随着煤矸石粗骨料取代率的增加,试件的承载力逐渐减小。当 $r = 0\%$ 和 100% 时,与钢管屈服强度为 235 MPa 的方形试件相比,钢管屈服强度为 345 MPa、390 MPa 和 420 MPa 的方形试件轴压承载力分别提升了 18.19%、24.78%、31.32% 以及 16.68%、31.49%、38.64%。在轴心受压过程中,只增加钢管的屈服强度,其套箍系数相应增大,从而使得核心煤矸石混凝土受到钢管的侧向约束力增强,使核心混凝土处于三向受压状态且纵向应力增加,延缓了内部裂缝的开展,试件承载力逐渐提高。

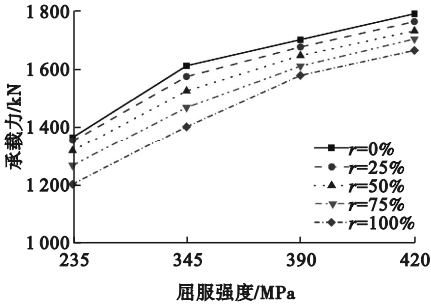


图 7 钢管屈服强度对轴压承载力的影响

Fig. 7 The effect of steel yield strength on axial bearing capacity

4.2 混凝土轴心抗压强度

试件的轴压承载力与混凝土轴心抗压强

度的关系如图 8 所示。由图 8 可知,试件承载力随着取代率的增加而不断降低,且降幅不断增加,当抗压强度从 30 MPa 增加到 35 MPa、40 MPa 和 45 MPa 时,承载力分别提升了 8.44%~10.10%、16.15%~18.74% 和 24.26%~26.15%。增加立方体抗压强度可以直接提高核心煤矸石混凝土截面所承担的荷载,从而使得方钢管煤矸石混凝土短柱的轴压承载力增加。

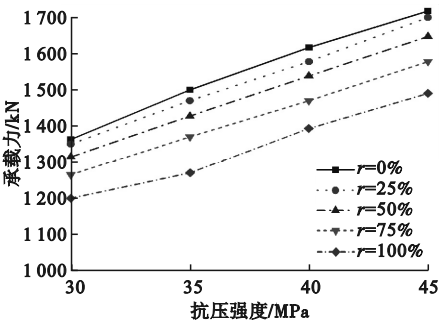


图 8 混凝土轴心抗压强度对轴压承载力的影响

Fig. 8 The effect of axial compressive strength on axial compressive load capacity

4.3 含钢率

含钢率对方钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的影响如图 9 所示。由图 9 可知,取代率对试件轴压承载力影响较小,随取代率增加,承载力逐渐降低。当煤矸石取代率为 0%、25%、50% 和 100% 时,含钢率从 7.4% 增加至 20.3% 使得试件承载力分别提升了 64.39%、64.08%、66.32%、70.41%、76.50%。随着取代率的提升,核心混凝土骨

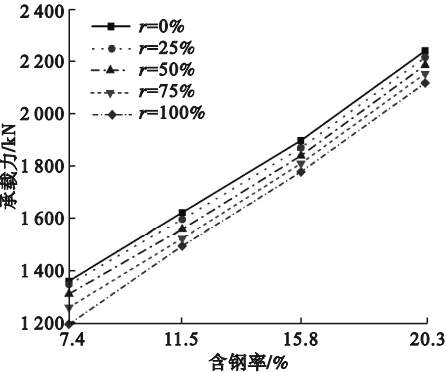


图 9 含钢率对轴压承载力的影响

Fig. 9 The effect of steel ratios on axial bearing capacity

料强度逐渐降低,从而使试件在含钢率不断增加的情况下随取代率的提升而导致的试件承载力下降幅度越来越小。

4.4 截面边长

图 10 为截面边对方钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力的影响。由图 10 可知,试件承载力随取代率的提高而降低,且取代率对承载力的影响随着试件截面边长的增加而增大。当煤矸石粗骨料取代率为 100%、截面边长为 170 mm 时,与截面边长为 255 mm、340 mm 和 425 mm 的方柱相比,试件轴压承载力分别降低了 82.03%、187.92% 和 306.48%。

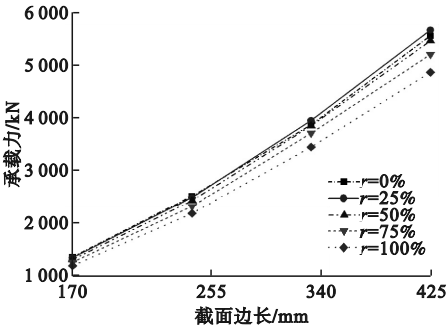


图 10 试件截面边长对轴压承载力的影响

Fig. 10 The effect of specimen section side length on axial compression capacity

由于截面边长的增加,使得试件在钢管屈服强度、混凝土轴心抗压强度、钢管壁厚以及 $L/D=3$ 保持不变的情况下,增大了整个试件截面内核心混凝土的截面面积,而该区域为试件的主要承重部分,因此方钢管煤矸石混凝土短柱的轴压承载力会相应提高。

综上可知,在其他参数相同的情况下,方钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力随煤矸石粗骨料取代率的提高而降低,且降幅随着取代率的增加而增大。此外,试件承载力在不同取代率下随钢管屈服强度 f_y 、混凝土轴心抗压强度 f_c 、含钢率 α 和截面边长的增加而提高,其中在截面边长相同的前提下,含钢率对轴压承载力的影响最大。

5 轴压承载力计算方法

根据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)给出的钢管混凝土短柱的轴心受压强度承载力设计值计算式,引入煤矸石粗骨料取代率影响系数 β ,提出方钢管煤矸石混凝土轴压短柱承载力修正式。其中, β 由有限元模拟数据回归分析确定,如图 11 所示。

$$N_u = \beta N_{u0}. \tag{3}$$

$$N_{u0} = A_{sc} f_{sc}. \tag{4}$$

$$f_{sc} = (1.212 + B\theta + C\theta^2) f_c. \tag{5}$$

$$\beta = -0.014r + 0.83. \tag{6}$$

式中: A_{sc} 为实心或空心钢管混凝土构件的截面面积,等于钢管和管内混凝土面积之和; f_{sc} 为实心或空心钢管混凝土抗压强度; f_c 为混凝土的抗压强度; θ 为实心或空心钢管混凝土构件的套箍系数, $\theta = \alpha_{sc} f / f_c$; f 为钢材的抗压强度; α_{sc} 为实心或空心钢管混凝土构件的含钢率, $\alpha_{sc} = A_s / A_c$; A_s 、 A_c 分别为钢管、管内混凝土的面积; B 、 C 为截面形状对套箍效应的影响系数, $B = 0.131f / 213 + 0.723$, $C = -0.070 f_c / 14.4 + 0.026$ 。

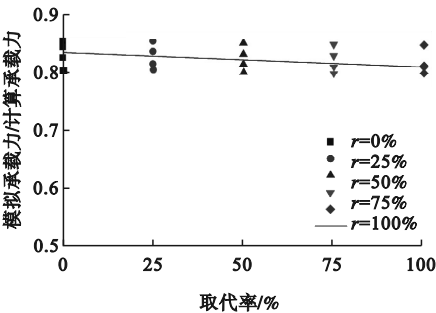


图 11 N_{uc}/N_{u0} 与 r 关系
Fig. 11 The N_{uc}/N_{u0} - r curve

图 12 为试件承载力的试验模拟值 N_{uc} 与修正后计算值 N_{ui} 的比较。由图 12 可知, N_{uc} 与 N_{ui} 二者误差在 5% 以内,二者之比的平均值为 0.999,标准差为 0.022。总体上,二者吻合较好,表明提出的承载力修正式具有一定精度,可为其工程应用提供理论参考。

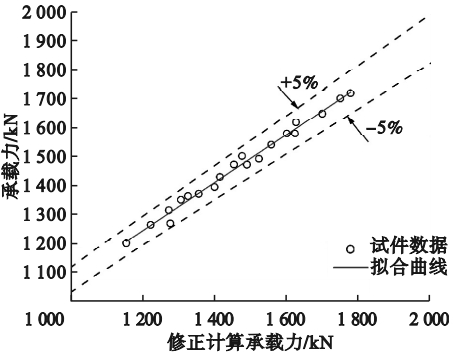


图 12 试验模拟值与修正计算值的比较
Fig. 12 The comparison between simulated results and modified calculated values

6 结 论

(1) 试件的荷载 - 纵向应变曲线与试验结果吻合良好,轴压承载力的模拟值与试验值的平均误差在 5% 以内。

(2) 在其他参数相同的情况下,方钢管煤矸石混凝土短柱轴压承载力随煤矸石粗骨料取代率的提高而降低,但最大降低幅度未超过 14%。相较于取代率为 0% 的试件而言,当煤矸石粗骨料取代率为 25%、50%、75% 和 100% 时,默认参数下的试件承载力分别降低了 0.95%、3.71%、7.84%、13.59%。

(3) 试件的承载力均随钢管屈服强度、混凝土轴心抗压强度、含钢率以及试件截面边长的增加而增大。其中,在试件截面边长相同的情况下,含钢率对承载力的影响最大,当试件截面边长为 170 mm 时,含钢率由 7.4% 增加到 20.3% 使得试件承载力提升了 64.08% ~ 76.50%。

(4) 依据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014),引入煤矸石粗骨料取代率影响系数,建立方钢管自燃煤矸石混凝土轴压短柱承载力计算值与试验值误差均在 5% 以内,精度良好。

参考文献

[1] SU Z N, LI X H, ZHANG Q. Influence of thermally activated coal gangue powder on the

- structure of the interfacial transition zone in concrete [J]. Journal of cleaner production, 2022,363:1-10.
- [2] LI J Y, WANG J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: a review [J]. Journal of cleaner production, 2019,239:117946.
- [3] 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.)
- [4] HAO Y, GUO X M, YAO X H, et al. Using Chinese coal gangue as an ecological aggregate and its modification: a review [J]. Materials, 2022,15(13):4495.
- [5] 李少伟,周梅,张莉敏. 自燃煤矸石粗骨料特性及其对混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报,2020,23(2):334-340.
(LI Shaowei, ZHOU Mei, ZHANG Limin. Characteristics of spontaneous combustion coal gangue coarse aggregate and its influence on concrete performance [J]. Journal of building materials, 2020,23(2):334-340.)
- [6] 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.)
- [7] 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.
- [8] MA H, ZHU H, WU C, et al. Study on compressive strength and durability of alkali-activated coal gangue-slag concrete and its mechanism [J]. Powder technology, 2020,368:112-124.
- [9] 任庆新,魏秋宇,丁纪楠. 圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(3):437-444.
(REN Qingxin, WEI Qiuyu, DING Ji'nan. Research on pure bending performance of concrete-filled circular hollow steel tubular composite members [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021,37(3):437-444.)
- [10] 张素梅,李孝忠,卢炜,等. 钢管约束的钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(6):21-33.
(ZHANG Sumei, LI Xiaozhong, LU Wei, et al. Experimental study on axial compression performance of concrete-filled steel tubular short columns restrained by steel tubes [J]. Journal of building structures, 2022,43(6):21-33.)
- [11] 王文达,纪孙航,史艳莉,等. 内配型钢方钢管混凝土构件压弯剪性能研究[J]. 土木工程学报,2021,54(1):76-87.
(WANG Wenda, JI Sunhang, SHI Yanli, et al. Research on the compression, bending and shear properties of concrete-filled square steel tubular members with internal steel sections [J]. Journal of civil engineering, 2021,54(1):76-87.)
- [12] 李幅昌,李龙,李晓. 火灾作用下钢管煤矸石混凝土柱的温度场分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(4):577-584.
(LI Guochang, LI Long, LI Xiao. Analysis of temperature field of coal gangue concrete filled steel tube column under fire [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022,38(4):577-584.)
- [13] 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.)
- [14] 张玉琢,刘进隆,徐倩,等. 圆钢管煤矸石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),2022,38(4):636-644.
(ZHANG Yuzhuo, LIU Jinlong, XU Qian, et al. Finite element analysis of bearing capacity of round steel tube gangue concrete short column under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022,38(4):636-644.)
- [15] XU Q, ZHANG Y Z, LIU H Q, et al. Effect of spontaneous-combustion coal gangue aggregate on axial performance of square concrete-filled steel tube stub columns [J]. Structures, 2022,44:216-235.
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)