

圆钢管煤矸石混凝土中长柱轴压性能 有限元分析

张玉琢¹,黄怡萌¹,刘进隆²,姬婷婷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 研究圆钢管煤矸石混凝土中长柱的轴压性能,找到各设计参数对试件轴压承载力的影响规律,提出轴压承载力计算式,推广钢-煤矸石混凝土组合结构。**方法** 采用 ABAQUS 有限元分析软件建立圆钢管煤矸石混凝土中长柱轴压有限元模型,分析典型试件受力全过程的应力分布、荷载分配以及不同参数变化对其轴压承载力的影响。**结果** 相同设计参数下,钢材屈服强度与含钢率是承载力的关键影响因素;而随煤矸石粗骨料取代率的增加,试件的承载力降低幅度未超过3.6%。**结论** 掺入煤矸石粗骨料后的试件仍具有较高承载力,依据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)中的方法对计算式进行修正后的误差在10%以内,适用于圆钢管煤矸石混凝土中长柱,能够满足实际需求。

关键词 圆形钢管混凝土;中长柱;煤矸石粗骨料;轴压承载力;长细比

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式:张玉琢,黄怡萌,刘进隆,等.圆钢管煤矸石混凝土中长柱轴压性能有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):697-705.(ZHANG Yuzhuo,HUANG Yimeng,LIU Jinlong,et al. Finite element analysis of spontaneous-combustion coal gangue concrete filled round steel tube medium-length columns under axial compressive[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(4):697-705.)

Finite Element Analysis of Spontaneous-Combustion Coal Gangue Concrete Filled Round Steel Tube Medium-Length Columns under Axial Compressive

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

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

Abstract: To investigate the axial compression performance of circular steel tube-coal gangue concrete medium-length columns and discern the influence patterns of various design parameter variations on specimen axial load-bearing capacity, a formulation for axial load-bearing capacity is

收稿日期:2023-03-08

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(Inqn202024)

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。

proposed. A computational model is developed using ABAQUS software. After verifying the accuracy and effectiveness of the finite element model, the entire process of load analysis for typical components and the variation of axial load-bearing capacity under different conditions are analyzed. It is observed that the increase in self-ignition coal gangue aggregate(SCGA) content has a negligible influence on the axial load-bearing capacity of the components, with an impact of no more than 3.6%. The calculated bearing capacity formula, considering the aspect ratio, stability factor, and SCGA substitution coefficient, exhibits an error within 10%.

Key words: CFST; medium-length column; SCGA; axial compression capacity; slenderness ratio

煤矸石作为煤炭开采过程中的大宗固废,堆积占地且严重污染环境^[1-2]。而钢管混凝土结构具有的良好塑性和韧性性能,使其在工程领域得到了广泛应用^[3-6],在钢管混凝土结构中用煤矸石代替传统粗集料用于配制核心混凝土^[7-8],减少天然砂石用量的同时可降低煤矸石污染风险,是钢-固废混凝土组合结构发展的主要方向^[9-10]。

众多学者已对普通钢管混凝土结构进行了广泛研究。王文达等^[11]对构件进行压弯剪试验,采用有限元模拟对内配型钢的方钢管混凝土试件压弯剪受力机理进行了研究;任庆新等^[12]利用有限元模型分析了试件抗弯承载力的变化规律,研究了试件的纯弯性能。此外,研究人员对煤矸石混凝土的各种性能也作了初步研究。王庆贺等^[13]通过改变试件中自燃煤矸石骨料含量来探究其对受弯性能的影响,发现试用阶段的煤矸石骨料的添加对抗弯刚度的影响明显;张玉琢等^[14]探究了普通圆钢管混凝土和圆钢管煤矸石混凝土短柱的受力全过程的荷载-应变曲线,提出了承载力计算式的修正系数。

从已有研究中发现,钢管煤矸石混凝土柱的轴压性能会受到添加骨料的影响,且目前没有明确的承载力计算式。鉴于此,笔者利用 ABAQUS 有限元分析软件建立模型,探究钢材屈服强度、混凝土抗压强度、煤矸石取代率、含钢率和长细比对轴压承载力的影响规律;通过对相关参数分析,明确煤矸石骨料的掺入对轴压承载力的劣化程度,进一步提出具有较高精度的承载力修正计算式,以期

推广钢-煤矸石混凝土组合结构的应用。

1 有限元模型的建立

1.1 材料本构关系

在多轴向加载作用下,圆钢管的应力-应变关系及相应的参数应符合 Von Mises 屈服准则,即本构选用五段式二次塑流模型来描述钢材的塑性性能^[15]。对于核心煤矸石混凝土,软件中提供的塑性损伤模型多用于分析普通混凝土力学性能。笔者采用的试件涉及自燃煤矸石粗骨料取代率对轴压性能的影响,故依据文献^[16]建立模型的本构关系。

1.2 相互作用和边界条件

试件外包钢管选用 4 节点壳单元,核心煤矸石混凝土及端板选用 8 节点的三维实体单元。利用 ABAQUS 有限元分析软件中的结构化网格划分技术,划分的有效网格密度为 20 mm。采用位移加载的方式,按结构一阶模态确定初始缺陷为柱长的 1/1 000。有限元分析模型如图 1 所示。

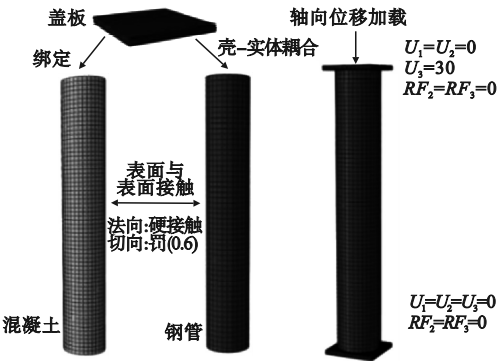


图 1 模型相互作用

Fig. 1 The interaction of model

1.3 模型参数

模拟试件分为5组。考虑钢材屈服强度、混凝土抗压强度、煤矸石取代率、含钢率和长细比5个影响参数对试件承载力的影响。

依据《钢管混凝土结构技术规范》(GB

50936—2014)中限制试件的长径比 $L/D\leq 20$,及《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)规定圆钢管混凝土柱长细比 λ 取10~60等相关内容来确定参数值。试件相关参数见表1。

表1 参数设计表

Table 1 Parameter design table of the test piece

编号	D/mm	L/mm	t/mm	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	$r/\%$	$\alpha/\%$	λ
1	220	1 320	6	235	30	100	5.69	24
2	220	1 320	6	345	30	100	5.69	24
3	220	1 320	6	390	30	100	5.69	24
4	220	1 320	6	420	30	100	5.69	24
5	220	1 320	6	460	30	100	5.69	24
6	220	1 320	6	235	40	100	5.69	24
7	220	1 320	6	235	50	100	5.69	24
8	220	1 320	6	235	60	100	5.69	24
9	220	1 320	6	235	70	100	5.69	24
10	220	1 320	6	235	30	0	5.69	24
11	220	1 320	6	235	30	25	5.69	24
12	220	1 320	6	235	30	50	5.69	24
13	220	1 320	6	235	30	75	5.69	24
14	220	1 320	9	235	30	100	8.71	24
15	220	1 320	12	235	30	100	11.87	24
16	220	1 320	15	235	30	100	15.17	24
17	220	1 320	18	235	30	100	18.62	24
18	220	1 760	6	235	30	100	5.69	32
19	220	2 200	6	235	30	100	5.69	40
20	220	2 640	6	235	30	100	5.69	48
21	220	3 080	6	235	30	100	5.69	56

注: D 为外径; L 为长度; t 为钢管壁厚; f_y 为钢材屈服强度; f_{cu} 为混凝土抗压强度; r 为煤矸石粗骨料取代率; α 为含钢率;两端铰接柱的长细比 $\lambda=4L/D$ 。

2 有限元模型验证

2.1 模型验证参数

为验证所建模型的可靠性,首先利用有限元模型对课题组前期试验^[16]中的圆钢管煤矸石混凝土短柱 C30-1-2.75-b、C30-1-

3.75-b、C30-1-4.5-b 和文献[17]中的圆钢管混凝土长柱 GZSJ 1-2、GZSJ 2-2、GZSJ 3-2、GZSJ 4-2 的试验结果和模拟结果进行验证,模型验证参数见表2。验证后发现二者曲线吻合较好,说明笔者所建有限元计算模型对试件的分析是合理的,可以应用到研究中。

表2 模型验证参数

Table 2 The parameter table of model validation

试件编号	$D \times t \times L/\text{mm}$	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	$r/\%$	λ
C30-1-2. 75-b	140 × 2. 75 × 420	278	45. 7	100	—
C30-1-3. 75-b	140 × 2. 75 × 420	278	45. 7	100	—
C30-1-4. 5-b	140 × 4. 5 × 420	278	45. 7	100	—
GZSJ 1-2	219 × 7. 0 × 990	273	40. 9	0	18
GZSJ 2-2	219 × 7. 0 × 1 200	273	40. 9	0	22
GZSJ 3-2	219 × 7. 0 × 1 420	273	40. 9	0	26
GZSJ 4-2	219 × 7. 0 × 1 640	273	40. 9	0	30

2.2 承载力对比分析

圆钢管煤矸石混凝土短柱、圆钢管混凝土长柱轴压承载力的模拟值与试验值对比如图2所示。由图可知,模拟值与试验值的误差保持在10%内,验证了模型在试件承载力预测方面的准确性。

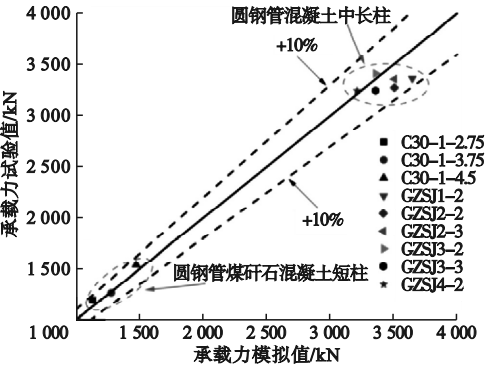


图2 轴压承载力对比

Fig. 2 The comparison diagram of axial compression capacity

3 有限元结果与分析

3.1 受力过程

选取表1中试件1为典型算例进行轴压全过程的受力分析。图3为该试件跨中截面的荷载-挠度曲线图,选取其上3个特征点A、B、C,对全过程进行了如下分析。

弹性阶段(OA):A点之前引入初始缺陷对中长柱的影响较小,承担荷载的情况同普通钢管混凝土试件基本一致。此阶段钢管、煤矸石混凝土分别独立承担荷载产生的轴向力,试

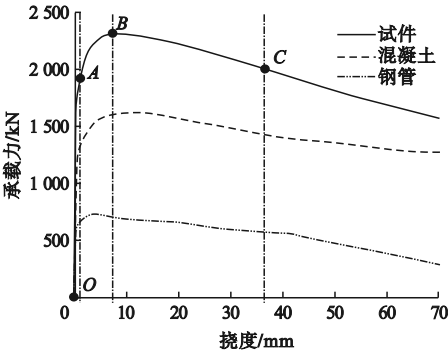


图3 钢管与混凝土的荷载分配

Fig. 3 Load distributions of the steel pipes and concrete

件所承受荷载约为峰值荷载的85%。核心煤矸石混凝土由于未达到抗压强度因此对钢管具有稳定作用,其承担荷载的67%。混凝土和钢管二者承担的荷载比例为1.89:1。

弹塑性阶段(AB):这一阶段荷载增长速率减缓,并出现了钢管对煤矸石混凝土的约束效应。试件发生偏心受力,开始产生侧移,在很小的荷载增量下侧向挠度迅速增加。钢管对混凝土的套箍效应使试件承载力在此阶段明显提高,B点处混凝土承担荷载1617.89 kN,已达其峰值压应变,钢管受拉逐渐屈服,二者承担的荷载比例为2.31:1。

下降阶段(BC):峰值点后煤矸石混凝土持荷能力明显下降,在C点处承担荷载1487.96 kN,试件产生较大的侧向变形,钢管持续受拉进入塑性变形阶段,承担67%的荷载。混凝土和钢管在C点处承担的荷载

比例为 2.02:1, 加载至试件破坏。

3.2 应力分析

3.2.1 钢 材

钢管各特征点的 Mises 应力云图如图 4 所示。钢管截面在 A 点时跨中受力相对均

匀, 边缘处仍处于弹性阶段。在 B 点时, 钢管产生弯曲变形, 两端和左侧应力进一步发展, 跨中受压侧(右侧)应力逐渐集中, 但受拉侧(左侧)部分仍未屈服。在 C 点时, 试件的跨中侧向挠度迅速开展, 发生了明显弯曲变形。

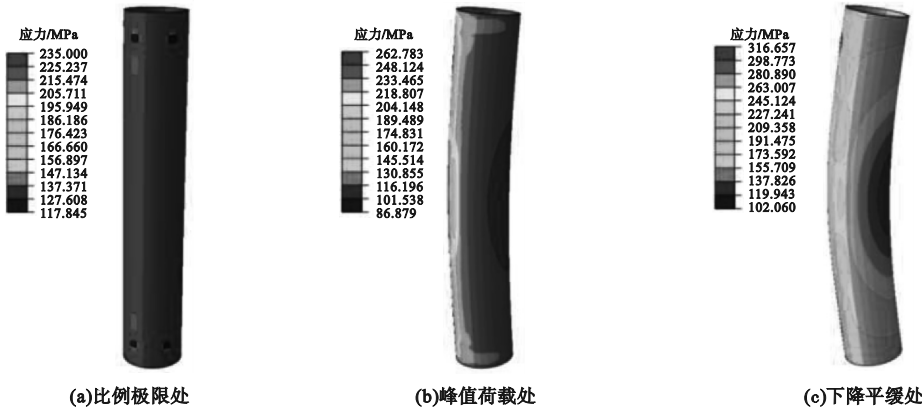


图 4 钢管的应力分布

Fig. 4 Stress distribution of the steel tubes

3.2.2 煤矸石混凝土

煤矸石混凝土的应力分布如图 5 所示。加载至特征点 A 前, 核心煤矸石混凝土应力发展与普通核心混凝土应力发展基本一致。到达峰值荷载 B 点时, 钢管对核心煤矸石混凝土的约束应力不断增加, 此阶段钢管煤矸

石混凝土中长柱的约束作用充分发挥。当试件加载至 C 点时, 核心煤矸石混凝土在钢管约束作用下的纵向应力分布逐渐向内部发展, 核心煤矸石混凝土由全截面受压逐渐变为远离中心侧受拉。

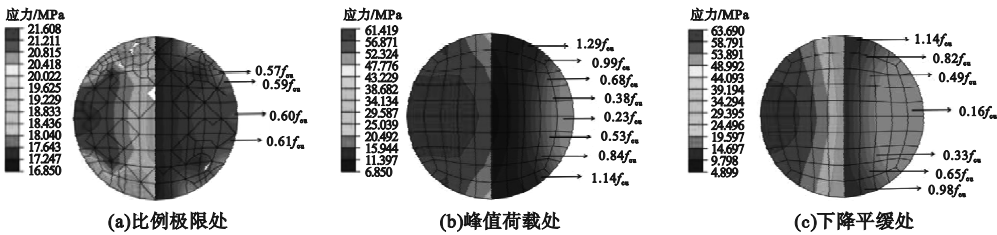


图 5 煤矸石混凝土的应力分布

Fig. 5 Stress distribution of the coal gangue concrete

4 轴压承载力参数分析

4.1 钢材屈服强度

屈服强度对轴压承载力的影响如图 6 所示。以煤矸石粗骨料取代率为 100% 的试件为例, 钢材的屈服强度越高时, 试件所能承受的极限承载力也越大。加载至极限承载力处, 试件挠度均在 75 mm 左右, 最终破坏形态基本相同。当钢管屈服强度从 235 MPa

增加到 345 MPa、390 MPa、420 MPa 和 460 MPa 时, 极限承载力依次增加 28.81%、40.10%、47.41%、57.09%。因此, 增加钢材强度可有效提升试件的轴压承载力。

4.2 混凝土抗压强度

煤矸石粗骨料取代率为 100% 时不同混凝土抗压强度试件的荷载-跨中挠度曲线如图 7 所示。由图可知, 煤矸石混凝土强度越高试件整体刚度越大, 加载前期不同煤矸石

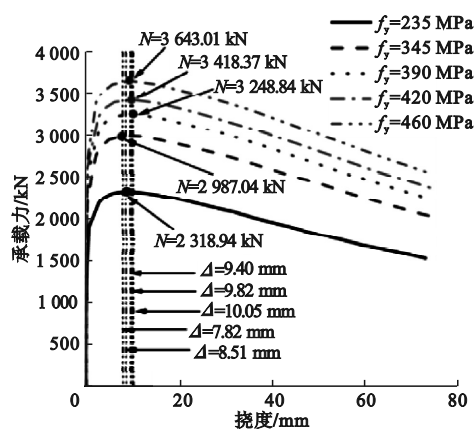


图6 屈服强度对轴压承载力的影响
Fig. 6 The effect of yield strength on the axial bearing capacity of specimens

混凝土抗压强度试件的曲线基本重合,近似弹性阶段。当煤矸石混凝土的抗压强度由30 MPa提升到40 MPa、50 MPa、60 MPa和70 MPa时,试件的极限承载力分别提升了6.48%、15.27%、22.95%和32.02%,增幅较小。因此,混凝土的抗压强度对圆钢管煤矸石混凝土中长柱的轴压承载力无明显影响。

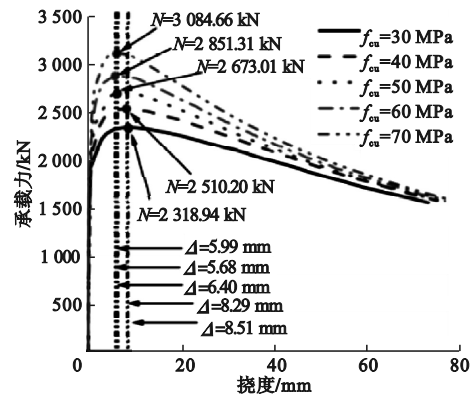


图7 混凝土轴心抗压强度对轴压承载力的影响
Fig. 7 The effect of concrete compressive strength on axial bearing capacity

4.3 煤矸石粗骨料取代率

不同煤矸石粗骨料取代率试件的荷载-跨中挠度曲线如图8所示。由图可知,当取代率由0%依次增加到25%、50%和100%时,试件极限承载力随取代率的增加而减小,依次为2 589.98 kN、2 544.03 kN、

2 482.85 kN、2 404.86 kN和2 318.94 kN。取代率由75%增加到100%时,承载力随取代率增加而降低的幅度为3.57%,最为明显。由于煤矸石粗骨料自身强度的降低对试件极限承载力降低的影响程度较小,使得试件加载前期和加载后期的荷载-挠度曲线基本重合,无明显差异。故煤矸石粗骨料取代率对试件轴向刚度和最终侧向挠度无明显影响。

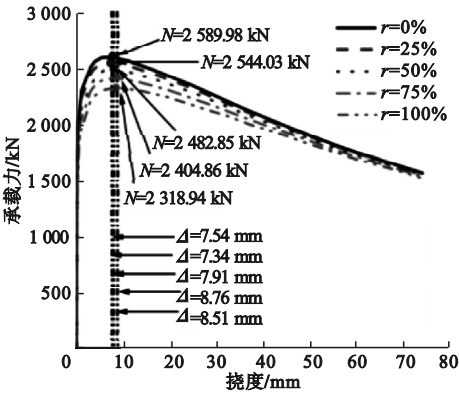


图8 煤矸石取代率对轴压承载力的影响
Fig. 8 The effect of replacement rate of coal gangue on axial bearing capacity

4.4 含钢率

煤矸石粗骨料取代率为100%时,试件在不同含钢率条件下的荷载-跨中挠度曲线如图9所示。

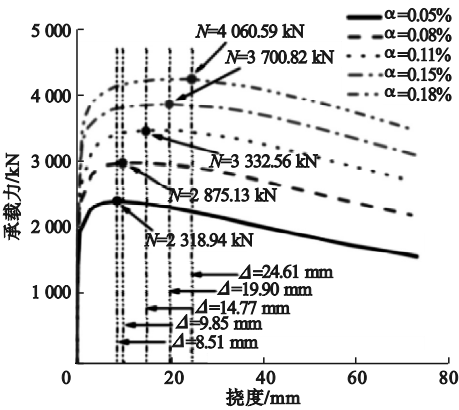


图9 含钢率对轴压承载力的影响
Fig. 9 The effect of steel content on axial compression capacity

由图9可知,含钢率的提升使得极限荷载对应的跨中挠度显著增加。随着钢管壁厚的增加,试件荷载-挠度曲线对应的极限承载力的增幅分别为23.98%、43.71%、59.59%和75.11%。可见,随含钢率增加,试件受影响程度逐渐减小,但整体上钢管壁厚的改变对试件轴压承载力的影响较大。

4.5 长细比

煤矸石粗骨料取代率为100%时,不同长细比条件下的荷载-跨中挠度曲线如图10所示。由图可知,随着试件长细比由24依次增加到32、40、48和56,试件的极限承载力由2318.94kN分别降低到2134.44kN、1970.99kN、1820.17kN和1673.37kN,降幅依次为7.96%、15.02%、21.51%和27.84%,较为明显。加载前期不同长细比试件的曲线基本重合,跨中侧向变形值较小。

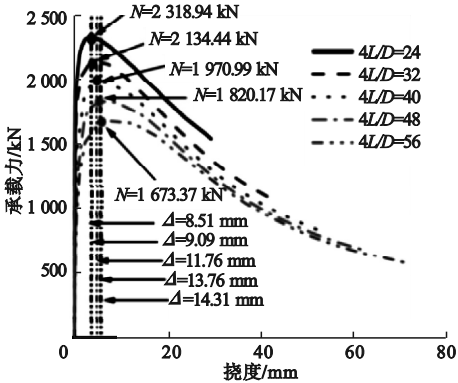


图10 长细比对轴压承载力的影响
Fig. 10 The effect of slenderness ratio on axial compression capacity

采用ABAQUS有限元软件中的单元删除方法,按照塑性应变大于混凝土开裂应变的删除准则,对不同长细比试件的破坏趋势进行了分析。各特征点处混凝土的PEEQ应变云图如图11所示。由图可知,随着长细比的增加,破坏形态从轴压破坏逐渐转变为压弯破坏,纵向变形趋势占主导。

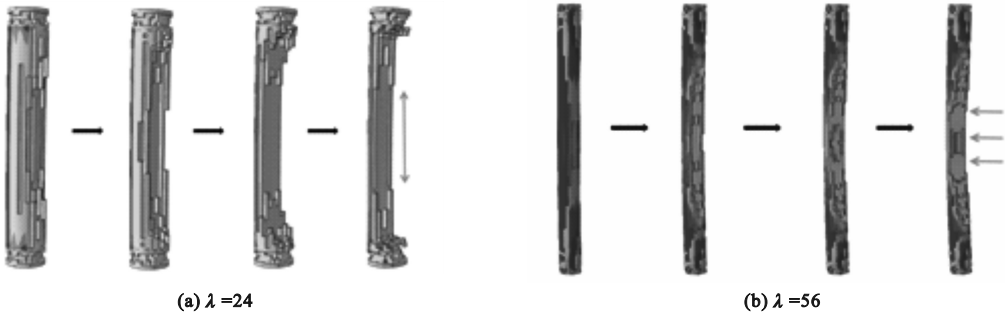


图11 不同长细比时混凝土试件破坏趋势

Fig. 11 Failure tendency of concrete for components with different slenderness ratios

5 轴压承载力计算方法

对于稳定系数 ψ_1 的变化规律,钢管混凝土中长柱的核心混凝土强度等级对其影响不显著。依据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014),引入稳定系数 ψ_1 ,确定长细比影响的承载力折减计算式。

$$\psi_1 = 1 - 0.0226(L/D - 4). \tag{1}$$

式中: D 为钢管的外径; L 为柱的实际长度。

结合试验数据与蔡绍怀推导的短柱极限强度计算公式^[18],引入煤矸石粗骨料取代率

影响系数 β ,得到圆钢管煤矸石混凝土柱轴压承载力 N 的计算式。 β 由模拟承载力 N_{uc} 、计算承载力 N_{u0} 的比值与取代率 r 进行回归分析确定(见图12),进而确定试件轴压承载力的计算公式。

$$N_0 = \psi_1(A_c f_c + 2A_s f_s). \tag{2}$$

$$N_{u0} = \beta N_0. \tag{3}$$

$$\beta = -0.0935r + 0.894. \tag{4}$$

式中: A_c, A_s 分别为核心混凝土合钢管的横截面面积; f_c, f_s 分别为混凝土和钢材的抗压强度设计值; r 为煤矸石粗骨料取代率。

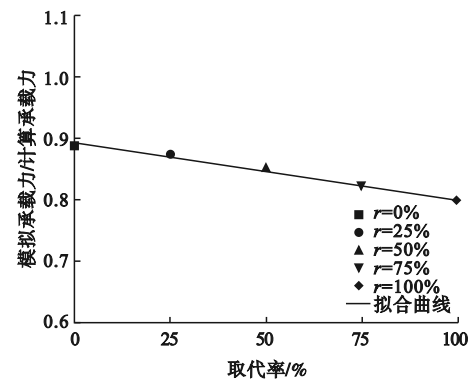


图 12 N_{uc}/N_{u0} 与 r 关系

Fig. 12 The relationship between N_{uc}/N_{u0} and r

在应用过程中,使用煤矸石混凝土 f_c 的试验值只需要考虑长细比影响的承载力折减,若无试验值,则按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2014)选取设计值,同时考虑长细比影响系数和煤矸石粗骨料取代率影响系数。

为了进一步验证上述公式的准确性,将试件承载力的软件模拟值与计算式结果进行比较,如图 13 所示。由图可知,修正计算式针对各个样本的计算误差均未超过 10%,并且所有样本 N_{uc}/N_{u0} 的平均值为 0.95,总体吻合较好,表明笔者所提出的公式精度较好,可为实际工程提供参考。

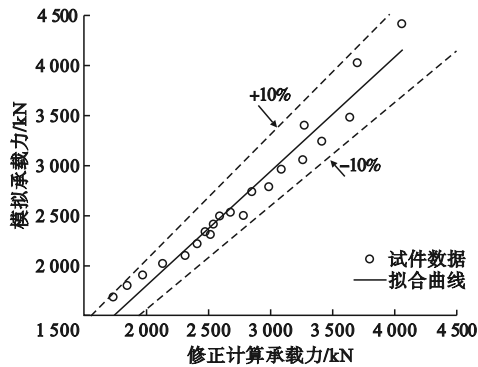


图 13 模拟值与修正计算值的比较

Fig. 13 Comparison of simulated test values and modified calculated results

6 结 论

(1)考虑钢管与煤矸石混凝土之间的接触问题及初始缺陷,发现试件的荷载-跨中

挠度曲线与试验结果吻合良好,有限元模拟结果和试验结果之间的误差在 10% 以内,验证了所建模型的有效性与可靠性。

(2)煤矸石粗骨料取代率为 100% 时,对试件极限承载力影响较大的因素为钢材屈服强度和含钢率;随着钢材屈服强度的提升和含钢率的增高,试件极限承载力增幅最大分别达到 28.82% 和 23.98%。

(3)煤矸石粗骨料掺入量和长细比对试件极限承载力均有影响。其中煤矸石取代率对试件极限承载力的影响较小,不同取代率下,降低幅度最大为 3.57%,与圆钢管混凝土中长柱极限承载力无较大差异。随着长细比的增大,试件极限承载力逐渐减小,降低幅度最大为 7.96%,破坏形态从轴压破坏逐渐转变为压弯破坏。

(4)基于《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)引入长细比影响的承载力折减系数,修正的圆钢管煤矸石混凝土中长柱的轴压承载力计算公式精度良好,通过计算结果与试验数据对比,误差在 10% 以内。

参考文献

[1] HAO Y, GUO X N, YAO X H, et al. Using Chinese coal gangue as an ecological aggregate and its modification: a review [J]. Materials, 2022, 15(13): 4495.

[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 Kuizhen. Coal gangue resource utilization technology [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2021.)

[3] HAN L H, LI W. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 100: 211 - 228.

[4] LUO W, WANG H J, LI X W, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete with coal gangue as sand replacement [J]. Materials, 2022, 15(5): 1807 - 1807.

[5] LI Y F, LIU S H, GUAN X M. Multitechnique investigation of concrete with coal gangue [J]. Construction and building materials, 2021, 301: 124114.

[6] 罗才松, 王枫轩, 付朝江, 等. 圆钢管再生镍铁渣混凝土中长柱轴压性能研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41

- (4):329-336.
(LUO Caisong, WANG Fengxuan, FU Chaojiang, et al. Study on axial compression performance of recycled aggregate concrete with ferronickel slag filled steel tubular middle long column [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2022, 41 (4): 329-336.)
- [7] 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. Temperature field analysis of coal gangue concrete-filled steel tubular column under fire [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38 (4): 577-584.)
- [8] WANG S X, LIU H Q, WANG Y, et al. Experimental study on the seismic performance of shear walls with different coal gangue replacement rates [J]. Applied sciences, 2022, 12 (20): 10622.
- [9] 任志刚,张铭,刘闯,等.圆端形钢管混凝土中长柱轴心受压承载性能试验研究[J].建筑结构,2021,51(14):62-68.
(REN Zhigang, ZHANG Ming, LIU Chuang, et al. Experimental study on behavior of intermediate long RCFST columns under axial loads [J]. Building structure, 2021, 51 (14): 62-68.)
- [10] 李明伦,任庆新,王庆贺,等.方中空夹层钢管混凝土叠合长柱轴压性能[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(1):35-43.
(LI Minglun, REN Qingxin, WANG Qinghe, et al. Axial compressive performance of square hollow concrete-encased double-skin steel tubular composite slender column [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2023, 39 (1): 35-43.)
- [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. Mechanical behavior of square steel-reinforced concrete-filled steel tubular (SRCFST) members under compression-bending-shear loads [J]. Journal of civil engineering, 2021, 54 (1): 76-87.)
- [12] 任庆新,魏秋宇,王鹏,等.圆中空钢管混凝土叠合长柱轴压性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(3):410-417.
(REN Qingxin, WEI Qiuyu, WANG Peng, et al. Research on circle hollow concrete-encased CFST slender column under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38 (3): 410-417.)
- [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.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.)
- [15] 李幅昌,夏秀斌,邱增美,等.方钢管-木-混凝土中长柱轴压性能有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(6):961-969.
(LI Guochang, XIA Xiubin, QIU Zengmei, et al. Finite element analysis of axial compression performance on square steel tube-timber-concrete medium long column [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38 (6): 961-969.)
- [16] 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.
- [17] 李斌,闻洋.钢管混凝土轴压长柱承载力的试验研究[J].地震工程与工程振动,2003(5):130-133.
(LI Bin, WEN Yang. Experimental study on bearing capacity of long concrete filled steel tubular columns with axial compression [J]. Seismic engineering and engineering vibration, 2003 (5): 130-133.)
- [18] 蔡绍怀.套箍混凝土轴心受压构件的强度计算[J].建筑结构,1980(4):23-29.
(CAI Shaohuai. Strength calculation of hoop concrete axial compression member [J]. Building structure, 1980 (4): 23-29.)
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)