

引用本文:张慧洁,胡晨,王静峰,等.部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱轴压性能数值分析[J].建筑科学与工程学报,2022,39(5):53-62.

ZHANG Hui-jie, HU Chen, WANG Jing-feng, et al. Numerical Analysis of Axial Compression Behavior of Partially-encased Lightweight Aggregate Concrete Composite Stub Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 53-62.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08085

部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱轴压性能 数值分析

张慧洁¹, 胡晨¹, 王静峰^{2,3}, 钱正昊², 刘用^{2,3}

(1. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽合肥 230061; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009; 3. 合肥工业大学先进钢结构技术与产业化安徽省协同创新中心, 安徽合肥 230009)

摘要:为研究部分包覆钢-轻骨料混凝土组合(PELC)短柱的轴压性能,采用ABAQUS软件建立了轴压作用下部分包裹钢-轻骨料混凝土组合短柱的有限元模型。通过典型构件揭示了部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱在轴压荷载作用下的全过程受力机理与破坏模式;分析了轻骨料混凝土强度、系杆间距、含钢率以及翼缘宽厚比等参数对部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱轴压性能的影响规律;基于规范AISC 360并考虑轻骨料混凝土约束效应,提出了一种部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱轴压承载力的计算公式。结果表明:部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱在轴压荷载作用下的主要破坏模式为轻骨料混凝土压溃、H型钢正弦半波状鼓曲以及系杆屈服;部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱的极限承载力将随着轻骨料混凝土强度与含钢率的增加而提高,延性将随着含钢率的增加而提高,随着系杆间距和轻骨料混凝土强度的增加而降低;研究结果将为轻骨料混凝土组合柱在实际工程中的设计与应用提供理论依据。

关键词:部分包覆钢-混凝土组合柱;轻骨料混凝土;轴压性能;数值分析;承载力

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2022)05-0053-10

Numerical Analysis of Axial Compression Behavior of Partially-encased Lightweight Aggregate Concrete Composite Stub Columns

ZHANG Hui-jie¹, HU Chen¹, WANG Jing-feng^{2,3}, QIAN Zheng-hao², LIU Yong^{2,3}

(1. Economic Technical Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, Anhui, China; 2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 3. Advanced Steel Structure Technology and Industrialization Collaborative Innovation Center of Anhui, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: In order to investigate the axial compression behavior of partially-encased lightweight aggregate concrete composite (PELC) stub columns, the finite element analysis model of PELC stub column under axial compression load was established by the software ABAQUS. Through the analysis of typical members, the whole process stress mechanism and failure mode of PELC

收稿日期: 2021-08-21

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0838); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2019-005);

安徽省自然科学基金项目(2108085QW248); 国家电网科研资助项目(W2020JSKF0559)

作者简介: 张慧洁(1992-), 女, 安徽合肥人, 工程师, 工学硕士, E-mail: 844697045@qq.com。

通信作者: 王静峰(1976-), 男, 安徽合肥人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: jfwang008@163.com。

stub columns under axial compression were revealed. The effects of parameters such as lightweight concrete strength, tie bar spacing, steel ratio and flange width-thickness ratio on the axial compression behavior of PELC stub columns were analyzed. Based on AISC 360 and considering the restraint effect of lightweight aggregate concrete, a calculation method of axial compressive capacity of PELC stub column was proposed. The results show that the main failure modes of PELC stub column under axial compression are lightweight aggregate concrete crushing, H-shaped steel sinusoidal half wave bulging and tie bar yielding. The ultimate bearing capacity of PELC stub columns increase with the rise of the lightweight aggregate concrete strength and steel ratio, and the ductility increase with the improvement of steel ratio, and decrease with the rise of tie bar spacing and lightweight aggregate concrete strength. The research results will provide a theoretical basis for the design and application of lightweight aggregate concrete composite columns in practical engineering.

Key words: partially-encased concrete composite column; lightweight aggregate concrete; axial compression behavior; numerical analysis; bearing capacity

0 引言

在国家“碳达峰,碳中和”的可持续发展目标指导下,装配式建筑因其高效、环保等优势成为了建筑行业发展的新风向标^[1]。部分包覆钢-混凝土组合(PEC)柱是一种在 H 型钢的翼缘与腹部间填充混凝土的新型组合结构柱^[2-3]。PEC 柱在具备优良性能的同时,可以较高程度实现结构构件的预制化与装配化,因此其在装配式建筑中具有广泛的应用前景。目前,国内外对 PEC 柱受力性能的研究初具成果^[4-8],并已成功应用在绍兴市行政中心配套住宅、盘锦市实验小学等实际工程中。

目前采用普通混凝土的装配式 PEC 部件因自重较大,存在着运输过程成本消耗大、装配过程施工难度高等问题,有悖于装配式建筑设计合理化、施工人性化的初衷。另一方面,轻骨料混凝土是一种干表观密度小于 $1\ 950\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的新型绿色混凝土材料^[9-10],在保证强度的同时又能降低构件自重,与装配式建筑的发展理念不谋而合^[11]。因此,将轻骨料混凝土应用在装配式构件中具有较高的研究意义与工程应用价值。

本文拟将轻骨料混凝土应用在 PEC 构件中形成部分包覆钢-轻骨料混凝土组合(PELC)短柱。然而,现有轻骨料混凝土构件的研究主要集中在钢筋轻骨料混凝土构件以及钢管轻骨料混凝土构件^[12-17],对部分包覆钢-轻骨料混凝土组合构件的研究尚未见报道。考虑到轻骨料混凝土与普通混凝土材料性能的差异,PELC 构件和 PEC 构件中钢材和混凝土的相互作用机理并不完全相同,因此有必要

对 PELC 构件的受力性能展开深入研究与分析。

本文将对轴压荷载作用下的 PELC 短柱受力性能进行研究。首先通过 ABAQUS 软件建立轴压荷载下 PELC 短柱的有限元模型,开展 PELC 短柱的全过程受力分析,揭示 PELC 短柱在不同阶段的应力发展过程以及典型破坏模式,在此基础上研究不同参数对 PELC 短柱轴压性能的影响规律。最后,基于规范 AISC 360^[18]以及轻骨料混凝土约束本构提出了一种能够预测 PELC 短柱的轴心承载力的计算公式。PELC 短柱的截面如图 1 所示,本文研究成果拟为部分包裹轻骨料混凝土组合柱在实际工程中的应用提供理论依据。

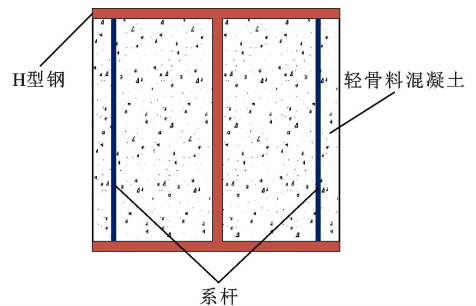


图 1 PELC 短柱截面

Fig. 1 Section of PELC Stub Column

1 数值分析模型

1.1 材料模型

根据规范^[19]要求,将轻骨料混凝土应用于 PEC 构件中时,须采用 LC25 以上的混凝土强度等级,属于高强轻骨料混凝土。对于高强轻骨料混凝土,宜采用文献^[20]提出的轻骨料混凝土应力-应变($\sigma-\epsilon$)

曲线,数学表达式为

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \begin{cases} \alpha_a \frac{\epsilon}{\epsilon_c} + (3-2\alpha_a) \frac{\epsilon^2}{\epsilon_c^2} + (\alpha_a-2) \frac{\epsilon^3}{\epsilon_c^3} & \epsilon \leq \epsilon_c \\ \frac{\epsilon/\epsilon_c}{\alpha_{d1}(\epsilon/\epsilon_c-1)^2 + \epsilon/\epsilon_c} & \epsilon > \epsilon_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_c 为轻骨料混凝土压应力; f_c 为轻骨料混凝土轴心抗压强度标准值; ϵ_c 为轻骨料混凝土峰值压应变; α_a 、 α_{d1} 为和轻骨料混凝土等级相关的系数。

α_a 、 α_{d1} 、 ϵ_c 的具体取值如表 1 所示。

表 1 轻骨料混凝土应力-应变曲线系数

Table 1 Stress-strain Curve Coefficient of Lightweight Aggregate Concrete

混凝土强度等级	LC25	LC35	LC45
ϵ_c	0.002 470	0.002 530	0.002 558
α_a	1.7	1.4	1.1
α_{d1}	2.64	8.19	13.64

轻骨料混凝土受拉本构关系模型参考文献[21]中提供的曲线进行计算,即

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \begin{cases} 1.2 \frac{\epsilon}{\epsilon_t} - 0.2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_t}\right)^6 & \epsilon \leq \epsilon_t \\ \frac{\epsilon/\epsilon_t}{\alpha(\epsilon/\epsilon_t-1)^{1.4} + \epsilon/\epsilon_t} & \epsilon > \epsilon_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_t 为轻骨料混凝土拉应力; f_t 为轻骨料混凝土轴心抗拉强度标准值; ϵ_t 为轻骨料混凝土的峰值拉应变, $\epsilon_t=0.00 049 f_t$, $f_t=0.26 f_{cu}^{2/3}$, f_{cu} 为轻骨料混凝土立方体抗压强度; $\alpha=1.1 f_t^2$ 。

构件中系杆、H 型钢以及端板均为钢材,其中系杆和端板采用简化的双折线模型。H 型钢采用文献[22]建议的二次塑流模型,其应力-应变关系曲线如图 2 所示,其中, f_b 为钢材弹性阶段最大应力, f_u 为钢材的极限强度。具体表达式为

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon_s & \epsilon_s \leq \epsilon_e \\ -A\epsilon_s^2 + B\epsilon_s + C & \epsilon_e < \epsilon_s \leq \epsilon_{e1} \\ f_y & \epsilon_{e1} < \epsilon_s \leq \epsilon_{e2} \\ f_y(1+0.6 \frac{\epsilon_s - \epsilon_{e2}}{\epsilon_{e3} - \epsilon_{e2}}) & \epsilon_{e2} < \epsilon_s \leq \epsilon_{e3} \\ 1.6 f_y & \epsilon_s > \epsilon_{e3} \end{cases} \quad (3)$$

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

1.2 有限元分析模型

本文建立的 PELC 短柱有限元模型尺寸为 400 mm×400 mm×1 600 mm,构件的主要组成部分为端板、H 型钢、轻骨料混凝土以及系杆。系杆采用

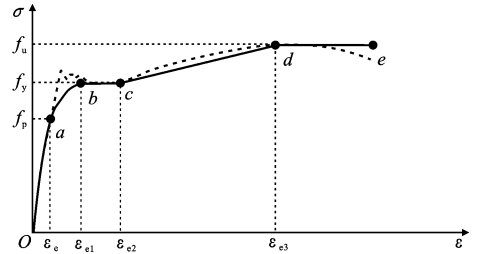


图 2 钢材应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain Curve of Steel

三维桁架单元 T3D2,其余部分均采用三维实体单元 C3D8R。以标准试件 PELC12-S200-35 为例,端板、H 型钢与轻骨料混凝土的网格尺寸为 30 mm×30 mm,系杆的网格尺寸为 20 mm×20 mm。PELC 短柱有限元分析模型如图 3 所示。

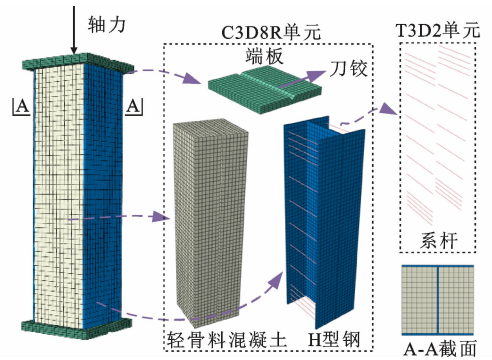


图 3 PELC 短柱有限元分析模型

Fig. 3 Finite Element Analysis Model of PELC Stub Column

在 PELC 短柱有限元模型中,轻骨料混凝土与 H 型钢间的接触行为通过法向的“硬接触”与切向的“罚函数”进行模拟,其摩擦因数设置为 0.6^[23]。为简化分析模型,通过“Embedded”行为将系杆内置到整个模型中用来模拟杆与轻骨料混凝土、型钢间的复杂接触行为。同时,由于端板与 H 型钢是通过焊接连接的,不发生相对滑移,因此采用“Tie”绑定进行模拟。端板与端部轻骨料混凝土的法向行为为“硬接触”,切向行为的摩擦因数为 0.4。为保证轴向荷载竖直作用在构件上,通过在端板中部的刀铰中部施加位移进行加载。同时,约束上端板处 X、Y 方向的平动以及 Z 方向的转动,下端板处约束 X、Y、Z 方向的平动。

2 试验验证

目前国内外尚缺乏部分包覆钢-轻骨料混凝土组合构件的力学性能试验研究。因此,本文选取文献[24]中薄壁钢管轻骨料混凝土柱偏压试验和文献

[25]中 PEC 柱轴压试验进行数值分析验证,从而确保轻骨料混凝土本构关系曲线的准确性与 PEC 柱有限元模型的合理性。对构件的荷载-位移($N-\Delta$)曲线以及典型破坏模式进行对比,如图 4~6 所示。

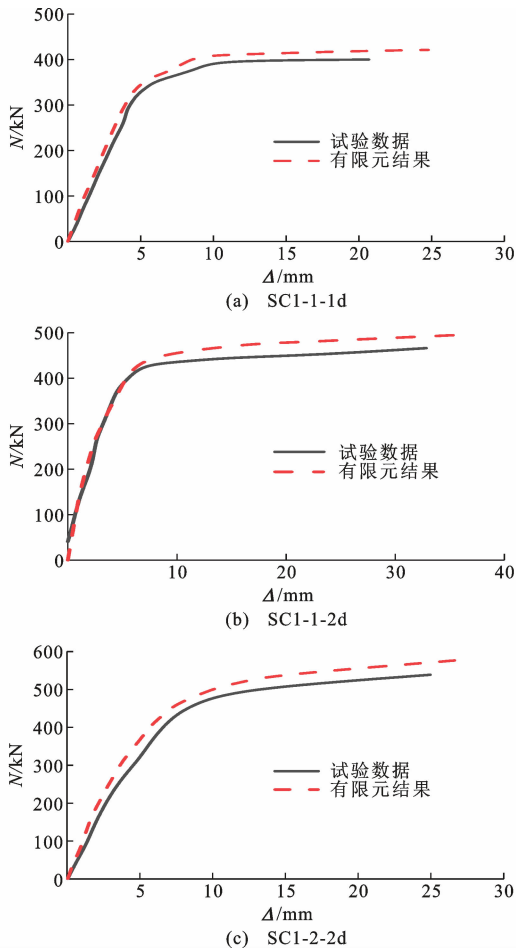


图 4 薄壁圆钢管轻骨料混凝土柱偏压试验曲线与计算曲线比较

Fig. 4 Comparison of Eccentric Compression Test and Calculation Curves of Lightweight Aggregate Concrete Column with Thin Wall Round Steel Tube

对比结果表明:有限元分析模型计算曲线与试验曲线的整体误差较小;有限元计算与试验的典型破坏模式较为吻合。因此,本文建立的 PEC 结构模型与轻骨料混凝土材料模型可为部分包覆钢-轻骨料混凝土组合(PELC)短柱的轴压性能分析奠定了基础。

3 PEC 与 PELC 短柱轴压性能对比

为探究普通混凝土与轻骨料混凝土对部分包覆钢-混凝土组合短柱的影响,本节将采用标准模型分别建立 PEC 与 PELC 短柱模型,混凝土强度均取

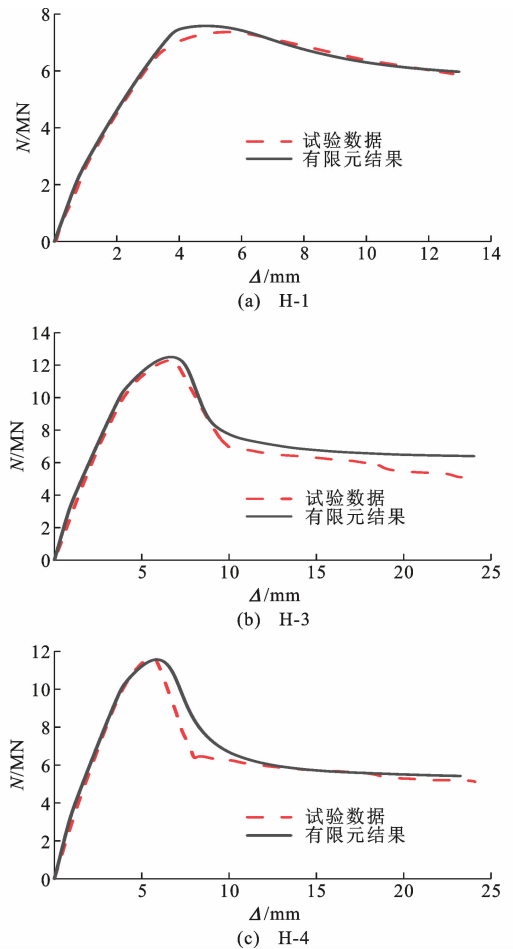
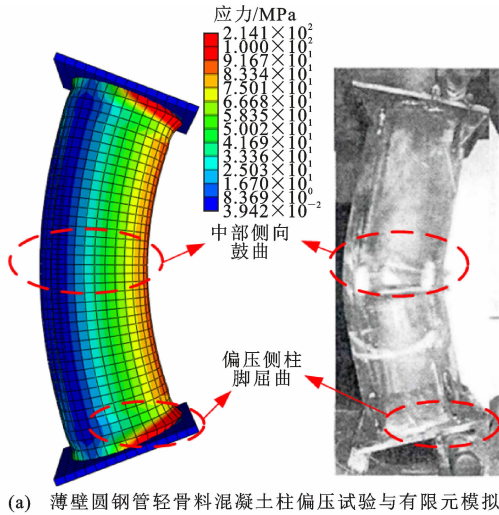


图 5 部分包覆钢-混凝土组合柱轴压试验曲线与计算曲线比较

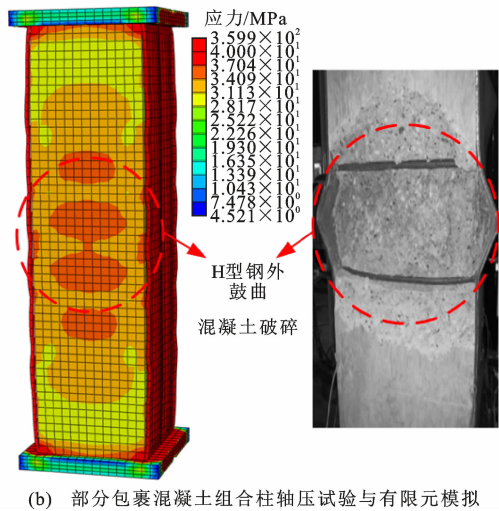
Fig. 5 Comparison of Axial Compression Test and Calculation Curves of Partially-encased Concrete Composite Column

35 MPa,普通混凝土本构模型的选用根据规范^[26]确定。标准试件尺寸的信息如下:截面长度为 400 mm,宽度为 400 mm,柱长为 1 600 mm。H 型钢的腹板厚度为 10 mm,翼缘厚度为 12 mm,系杆直径为 12 mm,系杆间距为 200 mm。H 型钢屈服强度为 355 MPa,系杆选用强度等级为 HRB400 的钢筋。

PEC 与 PELC 短柱的荷载-位移曲线对比如图 7 所示。由图 7 可知,与 PEC 短柱相比,PELC 短柱的峰值位移有着较大的提高,这是由于轻骨料混凝土的峰值应变更大引起的。轻骨料混凝土脆性破坏特性相比于普通混凝土更加明显,这造成了 PELC 短柱的峰值荷载与极限荷载均有一定程度降低。对比结果表明,采用轻骨料混凝土的 PEC 构件中 H 型钢性能将得到更好地利用,更能发挥组合结构钢与混凝土结构协同受力的独特优势。



(a) 薄壁圆钢管轻骨料混凝土柱偏压试验与有限元模拟



(b) 部分包裹混凝土组合柱轴压试验与有限元模拟

图 6 试验与有限元典型破坏模式对比

Fig. 6 Comparison of Typical Failure Modes Between Test and Finite Element Model

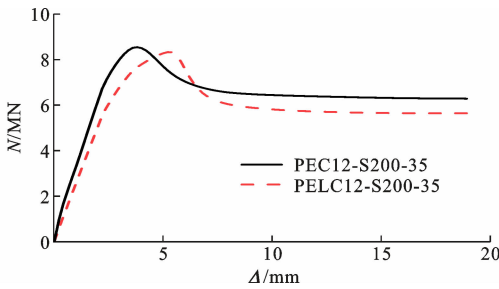


图 7 PEC 与 PELC 短柱荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of Load-displacement Curves Between PEC and PELC Stub Columns

4 典型试件全过程受力分析

为探究部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱在轴压荷载作用下的受力机理,本节以标准试件 PELC12-S200-35 为例,建立部分包覆钢-混凝土组合短柱的有限元数值分析模型,并对 PELC 短柱的

$N-\Delta$ 曲线展开全过程受力分析。PELC 短柱的 $N-\Delta$ 曲线(图 8)按线段特征可大致分为 3 个阶段:弹性阶段(OM 段)、弹塑性阶段(MN' 段)以及下降阶段(N'P 段)。在此基础上,对曲线不同特征的应力展开分析,其中轻骨料混凝土选用纵向平均应力,型钢及系杆选用 Mises 应力。为了更好地分析 PELC 短柱在各阶段的受力特点,本节将 PELC 短柱的变形进行了放大,放大系数为 8,试件 PELC12-S200-35 的特征点应力云图如图 9 所示。

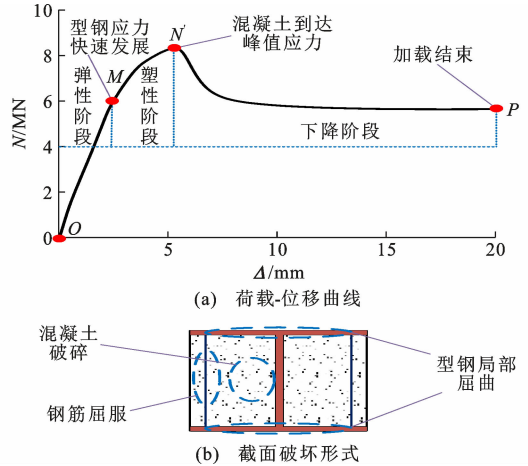


图 8 轴压荷载作用下 PELC 短柱的典型轴向荷载-位移曲线

Fig. 8 Typical Axial Load-displacement Curves of PELC Stub Column Under Axial Compression Load

(1)弹性阶段(OM 段):构件各组成部分基本处于弹性状态,构件的 $N-\Delta$ 曲线处于线性增长状态。

曲线达到 M 点时,试件各组成部分的应力发展情况如图 9(a)所示。此时,轻骨料混凝土的应力未充分发展,但由于受到系杆的拉结作用,系杆周围的轻骨料混凝土产生较大的应力。同时,H 型钢应力有了一定的发展,但尚未屈服。另一方面,H 型钢与轻骨料混凝土均未产生较大变形,两者可以较好地协同变形。系杆的应力发展较慢,其最大应力分布在与混凝土最大应力相对处的中部区域。

(2)弹塑性阶段(MN' 段):随着荷载的持续增加,构件各组成部分均有了一定的塑性发展。构件的 $N-\Delta$ 曲线呈现非线性发展状态。此阶段,H 型钢应力逐渐增长至屈服。轻骨料混凝土受压膨胀,但其横向变形受到 H 型钢翼缘与系杆的约束。系杆将发挥拉结作用,应力快速增长。

曲线到达 N' 点时,试件各组成部分的应力发展情况如图 9(b)所示。此时,构件中的大部分轻骨料混凝土已经到达峰值应力。H 型钢主体部分已经

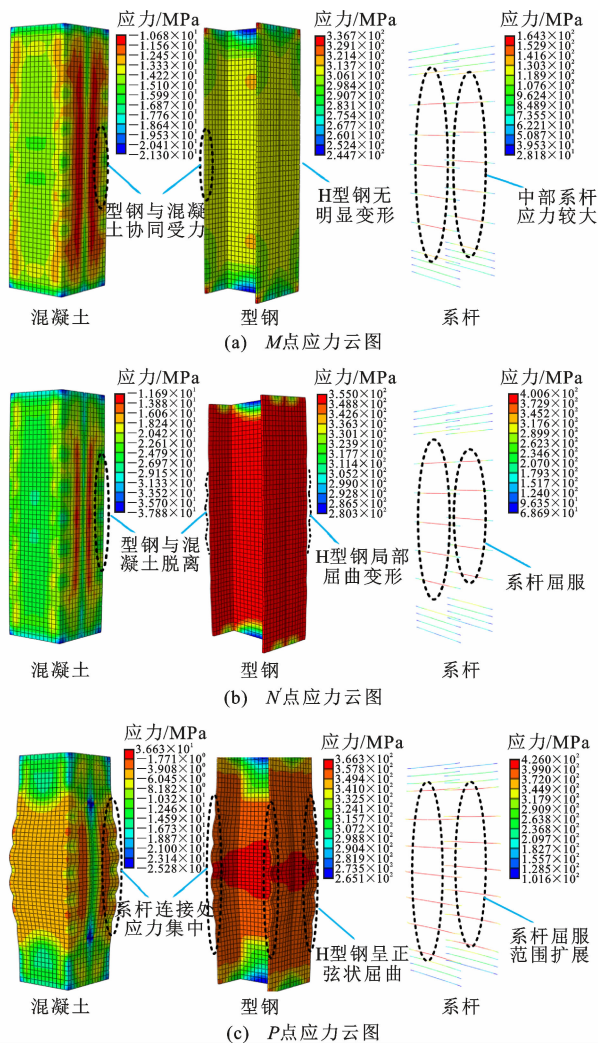


图9 试件 PELC12-S200-35 的特征点应力云图

Fig. 9 Stress Nephogram at Characteristic

Points of Specimen PELC12-S200-35

屈服,且腹板由于轻骨料混凝土的包裹作用并未产生明显的变形,但翼缘部分由于系杆的拉结作用出

表2 部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱有限元计算参数

Table 2 Finite Element Calculation Parameters of Partially-encased Lightweight Aggregate Concrete Composite Stub Columns

试件编号	D/mm	B/mm	L/mm	轻骨料混凝土 强度等级	腹板厚度 t_w/mm	翼缘厚度 t_f/mm	含钢 率/%	翼缘 宽厚比	系杆间距 s/mm	延性系数	峰值承载力 N_{ue}/kN
PELC12-S200-35	400	400	1 600	LC35	10	12	8.35	33.33	200	1.21	8 326.61
PELC12-S200-25	400	400	1 600	LC25	10	12	8.35	33.33	200	1.32	7 386.15
PELC12-S200-45	400	400	1 600	LC45	10	12	8.35	33.33	200	1.15	9 203.08
PELC12-S100-35	400	400	1 600	LC35	10	12	8.35	33.33	100	1.23	8 379.36
PELC12-S400-35	400	400	1 600	LC35	10	12	8.35	33.33	400	1.19	8 260.85
PELC14-S200-35	400	400	1 600	LC35	10	14	9.33	28.57	200	1.22	8 849.60
PELC16-S200-35	400	400	1 600	LC35	10	16	10.30	25.00	200	1.23	9 390.65
RPELC12-S200-35-1	445	360	1 600	LC35	14	8	8.37	31.79	200	1.21	8 302.37
RPELC12-S200-35-2	500	320	1 600	LC35	12	12	8.37	41.67	200	1.21	8 284.32

注: D 和 B 分别为部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱截面的长度与宽度; L 为部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱的高度。

现了局部屈曲变形现象,导致了轻骨料混凝土与型钢间出现了一定的分离。系杆中部的应力已经达到屈服强度。

(3)下降阶段($N-P$ 段):峰值点后,轻骨料混凝土的应力处于下降段,H型钢与系杆渐渐进入强化阶段。此阶段轻骨料混凝土的应力不断下降。系杆与H型钢的应力小幅度增加,但变形不断增长。

曲线到达 P 点时,试件各组成部分的应力发展情况如图9(c)所示。此时,中部轻骨料混凝土产生了严重的鼓曲变形,应力大幅度下降,表明轻骨料混凝土基本退出工作。受到系杆拉结作用的影响,H型钢外翼缘呈现正弦半波状鼓曲。系杆屈服的范围由非加密区扩张到了加密区,系杆的横向伸长量较大,处于强化阶段。

5 参数分析

为研究轴压荷载下部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱的受力性能,本文对轻骨料混凝土强度、系杆间距、含钢率以及截面形状等参数影响下PELC短柱的受力性能展开了深度分析。各试件的尺寸信息、峰值承载力以及延性如表2所示,轴向荷载-位移($N-\Delta$)曲线如图10所示。延性系数 γ 的定义如式(4)所示。

$$\gamma = \frac{\Delta_{85\%}}{\Delta_u} \quad (4)$$

式中: Δ_u 为构件峰值承载力对应的竖向位移; $\Delta_{85\%}$ 为轴向荷载降至85%峰值承载力时对应的竖向位移。

(1)轻骨料混凝土强度。表2与图10(a)分别给出了轻骨料混凝土强度为LC25、LC35、LC45对应的PELC短柱在轴压荷载作用下的峰值承载力、

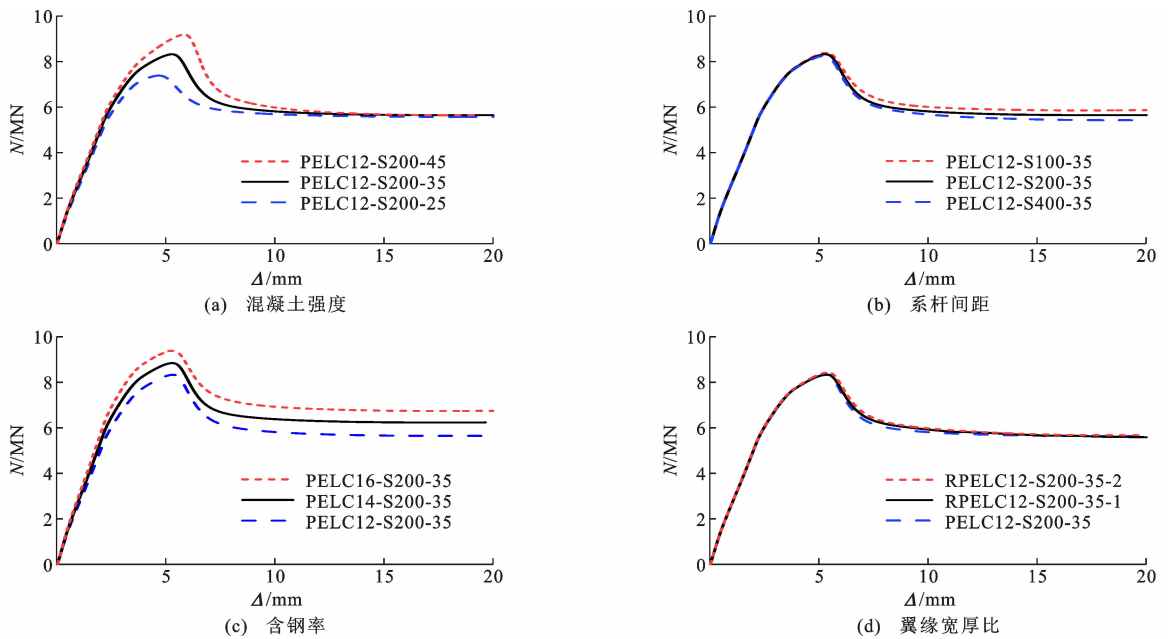


图 10 轴压荷载下部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱轴向荷载-位移曲线

Fig. 10 Axial Load-displacement Curves of Partially-encased Lightweight Aggregate Concrete Composite Stub Columns

延性系数和 $N-\Delta$ 曲线。与轻骨料混凝土强度等级为 LC25 的 PELC 短柱相比,轻骨料混凝土强度为 LC35 和 LC45 的试件峰值承载力分别提高了 12.73% 和 24.60%。延性系数分别降低了 8.33% 和 12.88%。结果表明,随着轻骨料混凝土强度的增加,PELC 短柱的峰值承载力将不断增长,延性会逐渐降低。这是由于轻骨料混凝土强度越高,变形能力越差。

(2) 系杆间距。表 2 与图 10(b) 分别给出了系杆间距为 100、200、400 mm 对应的 PELC 短柱在轴压荷载作用下的峰值承载力、延性系数和 $N-\Delta$ 曲线。与系杆间距为 100 mm 的 PELC 短柱相比,系杆间距为 200 mm 和 400 mm 的试件峰值承载力分别降低了 0.63% 和 1.38%。延性系数分别降低了 1.65% 和 3.25%。在本文限定的范围内,PELC 短柱的峰值承载力与延性会随着系杆间距的减小渐渐增加。从第 2 节的分析可知,系杆的拉结作用能延缓 H 型钢的鼓曲变形,可以有效提高 PELC 短柱的延性。另一方面,系杆不参与 PELC 短柱的截面承载力计算,但系杆与 H 型钢的套箍作用能约束轻骨料混凝土的变形,能够小幅度提高 PELC 短柱的峰值承载力。

(3) 含钢率。表 2 与图 10(c) 分别给出了含钢率为 8.35%、9.33%、10.30% 对应的 PELC 短柱在轴压荷载作用下的峰值承载力、延性系数和 $N-\Delta$ 曲线。与含钢率为 8.35% 的 PELC 短柱相比,含钢

率为 9.33% 和 10.30% 的试件峰值承载力分别提高了 6.28% 和 12.78%。延性系数分别增长了 0.83% 和 1.65%。结果表明,随着含钢率的增加,PELC 短柱的峰值承载力将会增加,延性会有略微的提升。这是由于含钢率的增大将降低轻骨料混凝土的用量,PELC 短柱的峰值承载力与延性将有一定的提升。

(4) 翼缘宽厚比。考虑到轻骨料混凝土的强度可能与翼缘的约束效应有关,本节在含钢率和截面面积不变的情况下探索翼缘宽厚比对 PELC 短柱轴压性能的影响。表 2 与图 10(d) 分别给出了翼缘宽厚比为 33.33、31.79、41.67 对应的 PELC 短柱在轴压荷载作用下的峰值承载力、延性系数和 $N-\Delta$ 曲线。与翼缘宽厚比为 33.33 的 PELC 短柱相比,翼缘宽厚比为 31.79 和 41.67 的试件峰值承载力分别降低了 0.29% 和 0.51%。延性系数无明显变化。因此,在本文分析的常用参数范围内,可忽略翼缘宽厚比对 PELC 短柱的轴压性能的影响。

6 PELC 短柱轴压承载力计算公式

根据前文分析可知,系杆与 H 型钢的联合作用能够起到类似箍筋的约束效应,提高轻骨料混凝土的强度。因此,本节将根据规范 AISC 360^[18] 中有关部分包覆钢-混凝土组合短柱的计算规定对 PELC 短柱的轴压承载力进行预测。图 11(a) 为考虑了腹板、翼缘以及系杆约束作用后的 PELC 短柱

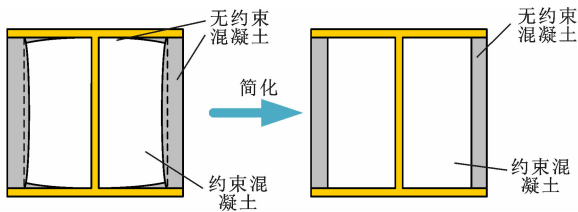


图 11 PELC 短柱混凝土截面区域划分

Fig. 11 PELC Stub Column Concrete Section Area Division

截面混凝土约束。为方便计算,本文将混凝土近似简化划分为图 11(b)所示无约束混凝土与约束混凝土 2 个区域。约束区采用 Khaloo 等^[27]提出的轻骨料混凝土约束模型进行计算,无约束区采用素混凝土强度进行计算,则 PELC 轴压承载力 N_{uc} 可由式(5)计算。

$$N_{uc} = f_y A_y + 0.85(f_{cc} A_{cc} + f_{co} A_{co}) \quad (5)$$

式中: A_y 为 H 型钢的截面面积; f_{cc} 和 A_{cc} 分别为受约束混凝土的圆柱体轴心抗压强度及截面面积; f_{co} 和 A_{co} 分别为无约束混凝土的圆柱体轴心抗压强度及截面面积。

Khaloo 等^[27]提出的受约束轻骨料混凝土抗压强度可由式(6)~(8)计算。

$$f_{cc} = f_{co} + 3.1 \left[2 - \left(\frac{f_{co}}{f_{le}} \right)^{0.06} \right] f_{le} \quad (6)$$

$$f_{le} = k_e \frac{2f_{hcc} A_{st}}{sh} \quad (7)$$

$$k_e = (1 - 2 \frac{\omega^2 + h^2}{\alpha \omega h}) [\tau \omega - 0.5s' \tan(\theta)] \cdot [h - 0.5s' \tan(\theta)] / (\omega h) \quad (8)$$

式中: f_{le} 为有效侧向约束力; f_{hcc} 为峰值点处箍筋实际应力,取为箍筋屈服强度; k_e 为有效约束系数; A_{st} 为系杆截面面积; h 为 H 型钢半截面净高; ω 为系杆至 H 型钢腹板的距离; s' 为系杆净距; α 和 θ 分别为约束曲线常数及角度,根据文献[28]分别取为 6.5 及 45° 。

为验证计算公式的适用性与准确性,将公式计算的承载力与有限元模拟的结果进行比较,结果如表 3 所示。对比发现,公式计算结果与有限元模拟数据比值的平均值为 1.016,标准差为 0.005 0。对比结果表明,本节提出的计算公式能够精确且保守地预测 PELC 短柱的轴压承载力。综上所述,本文提出的计算公式具有一定的安全储备,能够为 PELC 柱在实际工程的应用提供理论基础。

7 结 语

(1) 本文建立了部分包覆钢-轻骨料混凝土组合

表 3 PELC 短柱轴压承载力对比
Table 3 Comparison of PELC Stub Column Axial Compression Bearing Capacity

试件编号	有限元峰值承载力 N_{ue}/kN	公式计算承载力 N_{uc}/kN	N_{ue}/N_{uc}
PELC12-S200-35	8 326.61	8 201.93	1.02
PELC12-S200-25	7 386.15	7 249.95	1.02
PELC12-S200-45	9 203.08	9 110.23	1.01
PELC12-S100-35	8 379.36	8 287.52	1.01
PELC12-S400-35	8 260.85	8 174.18	1.01
PELC14-S200-35	8 849.60	8 719.94	1.01
PELC16-S200-35	9 390.65	9 237.53	1.02
RPELC12-S200-35-1	8 342.37	8 209.16	1.02
RPELC12-S200-35-2	8 354.32	8 226.79	1.02
平均值			1.016
标准差			0.005 0

短柱在轴压荷载作用下的有限元模型,并通过已有试验结果对模型的正确性以及轻骨料混凝土本构模型的适用性进行了验证。结果表明该有限元模型与实际情况具有较好的吻合度,能够用于轴压荷载下 PELC 短柱的计算与分析。

(2) PELC 短柱在轴压荷载作用下的全过程受力曲线可分为弹性阶段、弹塑性阶段以及下降阶段 3 个阶段。PELC 短柱的最终破坏形式为构件中部的轻骨料混凝土鼓曲破坏,H 型钢屈服且外翼缘呈现正弦半波状鼓曲,系杆被拉长且进入强化阶段。

(3) 提高 PELC 短柱的含钢率对其峰值承载力有较大的影响,但是对其延性的影响较小;提高轻骨料混凝土强度对其峰值承载力及延性均有较大的影响;另外,在本文分析的常用参数范围内改变系杆间距和翼缘宽厚比对 PELC 短柱峰值承载力和延性的影响较小。

(4) 本文基于规范 AISC 360 以及轻骨料混凝土箍筋约束模型提出了部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱轴压承载力计算公式。计算结果与数值分析结果吻合较好,可为部分包覆钢-轻骨料混凝土组合短柱的实际应用提供理论指导。

参考文献:

References:

[1] 李元齐,杜志杰,路志浩,等. 装配式钢结构体系建筑一体化建造技术研发和实践[J]. 建筑钢结构进展, 2021,23(10):12-25.

LI Yuan-qi, DU Zhi-jie, LU Zhi-hao, et al. Research and Practice on an Integrated Construction Technology for Prefabricated Steel Structure Buildings [J].

- Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(10): 12-25.
- [2] 赵根田,张宇鸣,曹芙波,等. 焊接 H 形钢部分包裹高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 116-122.
ZHAO Gen-tian, ZHANG Yu-ming, CAO Fu-bo, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Welded H-section Steel Partially Encased Columns with High Strength Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 116-122.
- [3] BEGUM M, DRIVER R G, ELWI A E. Parametric Study on Eccentrically-loaded Partially Encased Composite Columns Under Major Axis Bending[J]. Steel and Composite Structures, 2015, 19(5): 1299-1319.
- [4] BEGUM M, DRIVER R G, ELWI A E. Behaviour of Partially Encased Composite Columns with High Strength Concrete[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1718-1727.
- [5] SONG Y C, WANG R P, LI J. Local and Post-local Buckling Behavior of Welded Steel Shapes in Partially Encased Composite Columns[J]. Thin-walled Structures, 2016, 108: 93-108.
- [6] 简思敏. 部分外包再生混合混凝土组合柱的轴压和偏压性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
JIAN Si-min. Study on Mechanical Behaviors of Axially- and Eccentrically-loaded Partially Encased Composite Columns Cast with Demolished Concrete Blocks and Fresh Concrete [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [7] PEREIRA M F, DE NARDIN S, EL DEBS A L H C. Structural Behavior of Partially Encased Composite Columns Under Axial Loads[J]. Steel and Composite Structures, 2016, 20(6): 1305-1322.
- [8] 吴长清. 碳纤维布加固 H 型钢部分包裹混凝土柱试验研究与理论分析[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
WU Chang-qing. Experimental Research and Theoretic Analysis of CFRP-reinforced H-beam Partially Encased Concrete Columns[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [9] 轻骨料混凝土应用技术标准: JGJ/T 12—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Technical Standard for Application of Lightweight Aggregate Concrete: JGJ/T 12—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [10] 王怀亮, 谢宝. 高性能轻骨料混凝土三轴压强度和变形特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(2): 308-323.
WANG Huai-liang, XIE Bao. Strength and Deformation Properties of High Performance Lightweight Concrete Under True Triaxial Compression[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(2): 308-323.
- [11] SHORT A, KINNIBURGH W. Lightweight Concrete [M]. 3rd ed. London: Applied Science Publishers, 1978.
- [12] 傅中秋, 吉伯海, 胡正清, 等. 钢管轻集料混凝土长柱轴压性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 546-551.
FU Zhong-qiu, JI Bo-hai, HU Zheng-qing, et al. Experimental Study on Behavior of Lightweight Aggregate Concrete-filled Steel Tube Long Columns Under Axial Compression[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2009, 39(3): 546-551.
- [13] 傅中秋, 吉伯海. 长细比对钢管轻集料混凝土轴压柱受力性能的影响[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 112-115.
FU Zhong-qiu, JI Bo-hai. Influence of Slenderness Ratio Upon Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Filled Steel Tube Column Under Axial Compression [J]. Industrial Construction, 2010, 40(1): 112-115.
- [14] 傅中秋, 吉伯海, 马麟, 等. 偏心率对钢管轻集料混凝土受压性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 624-629.
FU Zhong-qiu, JI Bo-hai, MA Lin, et al. Impact of Eccentricity Ratio on Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Filled Steel Tube Columns Under Eccentricity Compression[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(3): 624-629.
- [15] 张程远, 邵永健, 朱爱萍, 等. HRB500 钢筋轻骨料混凝土轴心受压构件试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(12): 61-65.
ZHANG Cheng-yuan, SHAO Yong-jian, ZHU Ai-ping, et al. Experimental Research on Axial Compression of Lightweight Aggregate Concrete Columns with HRB500 Steel Bar[J]. China Concrete and Cement Products, 2018(12): 61-65.
- [16] 翁晓红, 张程远, 劳裕华, 等. HRB500 钢筋轻骨料混凝土偏心受压构件试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(6): 67-71.
WENG Xiao-hong, ZHANG Cheng-yuan, LAO Yu-hua, et al. Experimental Research on Lightweight Aggregate Concrete Members with HRB500 Steel Bars Under Eccentric Loading[J]. Industrial Construction, 2018, 48(6): 67-71.
- [17] 周悦志. 自密实轻骨料混凝土柱轴心受压承载力研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2019.

- ZHOU Yue-zhi. Self-compacting Lightweight Aggregate Concrete Column Axial Compression Bearing Capacity Study[D]. Liuzhou:Guangxi University of Science and Technology,2019.
- [18] Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 360-16[S]. Chicago:AISC,2016.
- [19] 部分包覆钢-混凝土组合结构技术规程: T/CECS 719—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020. Technical Specification for Partially-encased Composite Structures of Steel and Concrete: T/CECS 719—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2020.
- [20] 王振宇,丁建形,郭玉顺. 结构轻骨料混凝土的应力-应变全曲线[J]. 混凝土,2005(3):39-41,66. WANG Zhen-yu, DING Jian-tong, GUO Yu-shun. Stress-strain Curves of Structural Lightweight Aggregate Concretes[J]. Concrete,2005(3):39-41,66.
- [21] 叶列平,孙海林,陆新征,等. 高强轻骨料混凝土结构——性能、分析与计算[M]. 北京:科学出版社,2009. YE Lie-ping, SUN Hai-lin, LU Xin-zheng, et al. High-strength Lightweight Aggregate Concrete Structures: Behaviors, Analysis and Calculation[M]. Beijing: Science Press,2009.
- [22] 王静峰,肖强,沈奇罕,等. CFRP包裹带脱空缺陷钢管混凝土短柱的轴压性能分析[J]. 建筑钢结构进展,2021,23(6):44-53,70. WANG Jing-feng, XIAO Qiang, SHEN Qi-han, et al. Analysis on the Axial Behavior of CFRP Wrapped Circular CFST Stub Columns with Initial Concrete Imperfection[J]. Progress in Steel Building Structures,2021,23(6):44-53,70.
- [23] 宋顺龙,王静峰,江汉,等. 椭圆钢管混凝土受扭性能及抗扭承载力计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(7):952-959. SONG Shun-long, WANG Jing-feng, JIANG Han, et al. Torsional Behavior and Ultimate Torsional Strength Calculation of ECFST[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(7):952-959.
- [24] 朱振. 薄壁圆钢管轻骨料混凝土柱受压性能研究[D]. 南宁:广西大学,2019. ZHU Zhen. Research on Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Filled Thin-walled Steel Tube Columns Under Compression[D]. Nanning:Guangxi University,2019.
- [25] BRENT S P. Behaviour of Partially Encased Composite Columns Made with High Performance Concrete [D]. Edmonton:University of Alberta,2006.
- [26] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011. Code for Design of Concrete Structures:GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.
- [27] KHALOO A R, BOZORGZADEH A. Influence of Confining Hoop Flexural Stiffness on Behavior of High-strength Lightweight Concrete Columns [J]. ACI Structural Journal,2001,98(5):657-664.
- [28] BASSET R, UZUMERI S M. Effect of Confinement on the Behaviour of High-strength Lightweight Concrete Columns[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,1986,13(6):741-751.