

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.006



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱轴压性能 试验研究

陶清林<sup>1</sup>, 王文超<sup>1</sup>, 胡义<sup>2</sup>, 丁以兵<sup>1</sup>, 张辰啸<sup>1</sup>, 高志杰<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 中国十七冶集团有限公司技术中心,  
安徽 马鞍山 243000)

**摘要:**为解决传统钢-混凝土组合结构施工工序烦琐、耐久性不佳的问题,提出 PVC-FRP 管约束型钢混凝土新型组合结构(PVC-FRP 管内嵌型钢并填充混凝土),并基于 9 根 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱轴压试验和有限元模型,探究长细比、混凝土强度、含钢率、CFRP 条带间距、CFRP 条带层数及 PVC 管厚对其轴压性能的影响规律。结果表明:所有试件破坏集中于柱身 1/4~1/2 高度范围,破坏形态表现为 CFRP 条带被拉断、PVC 管破裂、混凝土被压碎;随着长细比、CFRP 条带间距的增加和混凝土强度、含钢率、CFRP 条带层数、PVC 管厚的降低,试件极限承载力逐渐降低,其中长细比影响最为敏感,通过回归长细比与稳定系数的二次函数关系,给出了 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱轴压承载力计算公式,理论计算值与实验值吻合良好。

**关键词:** PVC-FRP 管约束型钢混凝土; 中长柱; 轴压性能; 长细比; 承载力计算; 有限元模型

**中图分类号:** TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

## Experimental analysis of axial compression performance of medium-long steel concrete columns confined by PVC-CFRP pipes

TAO Qinglin<sup>1</sup>, WANG Wenchao<sup>1</sup>, HU Yi<sup>2</sup>, DING Yibing<sup>1</sup>, ZHANG Chenxiao<sup>1</sup>,  
GAO Zhijie<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, P. R. China;  
2. Technology Center, China MCC17 Group Co., Ltd, Ma'anshan 243000, Anhui, P. R. China)

**Abstract:** To address the complex construction techniques and poor durability of traditional steel-concrete composite structures, this paper proposes steel concrete columns confined by PVC-CFRP pipes, that is a new type of composite structures with steel sections embedded in PVC-FRP tubes and concrete filled inside. Based on axial compression tests and finite element analysis of nine medium-length concrete columns confined by PVC-CFRP pipes, the influence patterns of slenderness ratio, concrete strength, steel content ratio, CFRP strip spacing, number of CFRP strip layers, and PVC pipe thickness on the axial compression performance of medium-to-long columns are investigated. Results indicate that all specimens failed within the range of 1/4 to 1/2

**收稿日期:** 2025-11-06

**基金项目:** 安徽省高校委托重点项目(2022AH050342); 安徽省博士后研究人员科研活动经费资助项目(2021B525)

**作者简介:** 陶清林(1986-), 女, 博士, 副教授, 主要从事钢筋混凝土结构研究, E-mail: taoqinglin@ahut.edu.cn.

**Received:** 2025-11-06

**Foundation items:** Anhui University Commissioned Key Projects(No. 2022AH050342); Anhui Postdoctoral Researchers' Scientific Research Activity Funding Project(No. 2021B525)

**Author brief:** TAO qinglin (1986-), PhD, associate professor, main research interest: reinforced concrete structure, E-mail: taoqinglin@ahut.edu.cn.

of the column height, with the failure modes of CFRP strip rupture, PVC pipe fracture, and concrete crushing. As the slenderness ratio and CFRP strip spacing increased, and as concrete strength, steel content, number of CFRP layers, and PVC pipe thickness decreased, the ultimate bearing capacity of specimens gradually decreased. Among which the slenderness ratio has the most sensitive influence. By regressing the quadratic function relationship between slenderness ratio and stability coefficient, a calculation formula for the axial compression bearing capacity of medium-long steel concrete columns confined by PVC-CFRP pipes is proposed. Theoretical calculations showed good agreement with experimental results.

**Keywords:** steel concrete columns confined by PVC-CFRP pipes; medium-long columns; axial compression performance; slenderness ratio; bearing capacity calculation; finite element mode

型钢混凝土结构因其延性好、防火性能佳的优点,在各类建筑及桥梁工程中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。随着现代结构向重载、大跨方向发展,对结构及构件的承载能力提出了更高要求;同时,工业化建造发展进程也迫使建筑结构需具备更高的施工效率。然而,传统型钢混凝土结构,现场施工工序繁杂、湿作业多,影响了建造速度和质量控制。因此,亟须研发承载能力更高且施工便捷的新型型钢混凝土柱,例如采用增强约束形式、优化组合结构构造等。

学者在型钢混凝土和钢管混凝土结构的基础上,提出钢管约束型钢混凝土结构,并开展了试验、有限元模拟等研究<sup>[4-5]</sup>。马辉等<sup>[6]</sup>基于钢管约束型钢混凝土结构轴压试验,采用统一强度理论提出了该结构轴压承载力计算公式。刘坚等<sup>[7]</sup>根据极限分析法和双剪统一强度理论,通过引入等效约束折减系数、再生混凝土强度折减系数,提出钢管约束型钢再生混凝土结构承载力理论计算公式。

然而,此结构虽承载能力高、延性好,但存在钢材易腐蚀、自重较大等缺陷。为此部分学者探索纤维复合材料(FRP)的工程应用研究<sup>[8-9]</sup>。FRP材料轻质高强、耐腐蚀性好,却受限于造价高而未得到广泛应用<sup>[10-11]</sup>。笔者基于现有PVC-CFRP管研究成果<sup>[12]</sup>,提出PVC-CFRP管约束型钢混凝土组合结构,即将CFRP条带缠绕于聚氯乙烯(PVC)管上,管内内嵌型钢并填充混凝土的新型组合结构,其中,型钢与混凝土共同承受外部轴向荷载,CFRP条带承担较高的环向约束力并通过PVC管均匀传递至混凝土表面。PVC-CFRP管不仅有效提高了混凝土强度,且具有轻质耐腐,成本可控的优点,并兼具模板作用,简化了混凝土结构施工工艺,适用于对耐久性要求严苛的沿海地区桥梁墩柱、码头与工业建筑结构。

Tao等<sup>[13]</sup>、牛犇<sup>[14]</sup>、陶清林等<sup>[15]</sup>开展了PVC-CFRP管约束型钢混凝土短柱轴压力学性能及其影响因素研究。然而,在实际工程中,尚需考虑结构的稳定承载力,以为为构件的合理选型、结构整体

稳定性设计及工程安全防控提供更完备的技术支撑。笔者聚焦PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱,通过PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱轴压试验和有限元数值模拟,针对其稳定承载力特性、破坏机制与受力机理及关键影响因素,研究轴压柱承载性能的影响规律,分析中长柱稳定系数与长细比之间的非线性关系,提出PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱轴压承载力计算公式。

## 1 试验概况

### 1.1 试件参数设计

共设计9根PVC-CFRP管约束型钢混凝土柱,考虑了长细比(24、32、40)、混凝土强度(C30、C40、C50)、含钢率(5.03%、6.94%、8.85%)及CFRP条带距宽比(1、2、3)等因素的影响。所有试件采用圆形PVC管(250 mm×9.6 mm),管外缠绕20 mm宽的CFRP条带,内嵌Q235型钢,试件具体设计参数如表1所示。为确保型钢准确位于试件中心位置,试件制作时,先使用量尺确定型钢与PVC-CFRP组合管的预设位置,随后采用钉子与木条搭设固定框架,将型钢及组合管定位并固定。同时为确保PVC-CFRP管只提供横向约束作用,分别在试件端部5 cm处开1 cm宽的凹槽,试件示意图如图1所示。

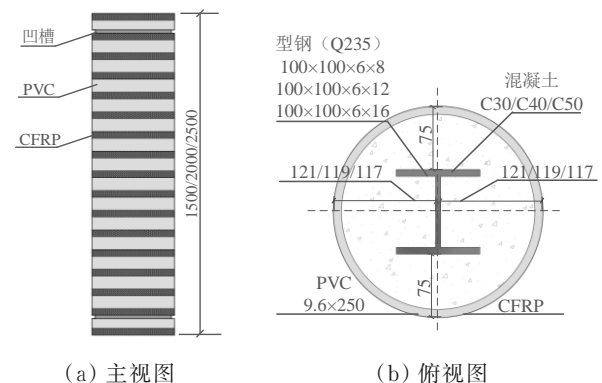


图1 试件示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of test piece

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

试件编号	截面直径/mm	高度 L/mm	长细比 λ	混凝土强度等级	型钢截面尺寸	含钢率/%	CFRP 条带缠绕间距/mm	CFRP 条带距宽比
Z-1	250	1 500	24	C30	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	5.03	40	2
Z-2	250	2 000	32	C30	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	5.03	40	2
Z-3	250	2 500	40	C30	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	5.03	40	2
Z-4	250	1 500	24	C30	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	5.03	20	1
Z-5	250	1 500	24	C30	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	5.03	60	3
Z-6	250	1 500	24	C40	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	5.03	40	2
Z-7	250	1 500	24	C50	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	5.03	40	2
Z-8	250	1 500	24	C30	100 mm×100 mm×6 mm×12 mm	6.94	40	2
Z-9	250	1 500	24	C30	100 mm×100 mm×6 mm×16 mm	8.85	40	2

1.2 试验装置及测试内容

试验在安徽工业大学结构试验室 500 t 拟静力液压伺服长柱试验机上开展,加载装置如图 2 所示。试验采用位移控制加载方案,加载速率为 0.1 mm/min,当试件出现明显破坏或荷载降至最大荷载的 80% 时,宣告试件破坏,停止加载。正式加载前按试件预估承载力的 3% 进行预加载,以检查量测装置是否运行正常。

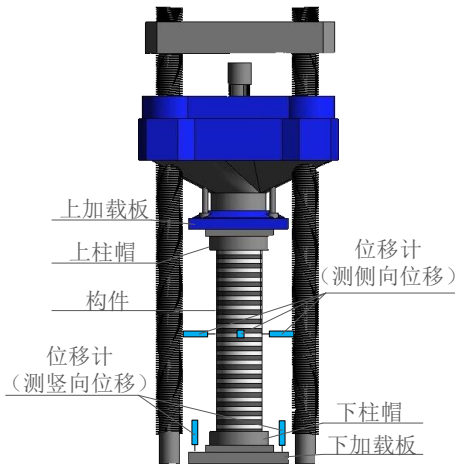


图 2 试验加载装置图

Fig. 2 Diagram of the test loading device

试件的竖向位移和轴向荷载主要由试验机自动采集的荷载-竖向位移曲线获取。为验证数据的准确性,在下加载板对角位置另布置两个位移计,同步测量竖向位移。在柱身中部对称放置 4 个位移计分别测量试件在型钢强轴和型钢弱轴方向的侧向位移。

1.3 材料力学性能

1.3.1 混凝土力学性能

根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[16]</sup>,试件浇筑时,每种等级混凝土预留一组标准土立方体试块,与试件同条件养护,得到 28 d 后混凝土各项力学性能指标,如表 2 所示。

表 2 混凝土力学性能测试结果

Table 2 Concrete mechanical properties

混凝土强度	$f_{cu}$ /MPa	$f_c$ /MPa	$E_c/10^4$ MPa
C30	37.9	28.8	3.21
C40	43.8	33.3	3.34
C50	51.1	38.8	3.47

1.3.2 型钢力学性能

根据《钢及钢产品 力学性能取样位置及试样制备》<sup>[17]</sup>及《金属材料 拉伸试验 第一部分:室温试验方法》<sup>[18]</sup>,设计型钢片材拉伸测试试样,设计参数如图 3 所示,得到型钢各项力学性能指标,如表 3 所示,拉伸前后对比如图 4 所示。

表 3 型钢力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel sections

钢材型号	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$E_s$ /MPa
Q235B	382	490	$2.02 \times 10^5$

注: $f_y$ 、 $f_u$ 、 $E_s$ 分别是型钢的屈服强度、抗拉强度和弹性模量。

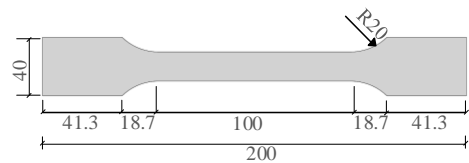


图 3 型钢片材设计图(单位/mm)

Fig. 3 Design of steel profile sheets(Unit: mm)

1.3.3 PVC 管理学性能

根据《热塑性塑料管材 拉伸性能测定 第一部分:试验方法总则》<sup>[19]</sup>,设计 PVC 片材拉伸测试试样,设计参数如图 5 所示,得到 PVC 片材力学性能测试结果如表 4 所示,拉伸前后对比如图 6 所示。

1.3.4 CFRP 布力学性能

试验采用的 CFRP 布厚度均为 0.167 mm。按照《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》规定<sup>[20]</sup>,设计 CFRP 布片材拉伸试样,设计参

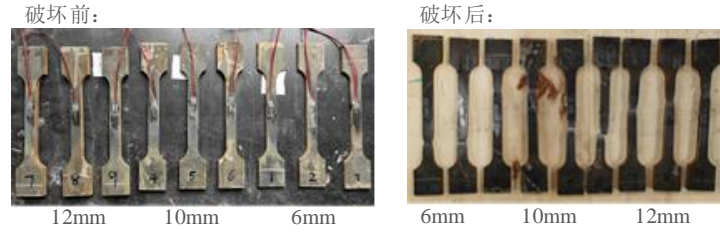


图4 型钢片材拉伸前后对比图

Fig. 4 Comparison of section steel sheet before and after stretching

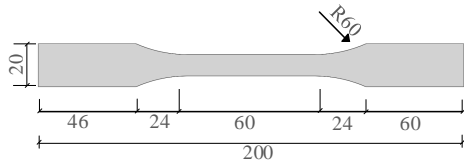


图5 PVC片材设计图(单位/mm)

Fig. 5 PVC sheet design (Unit: mm)

数如图7所示,将其粘满环氧树脂胶,得到CFRP各

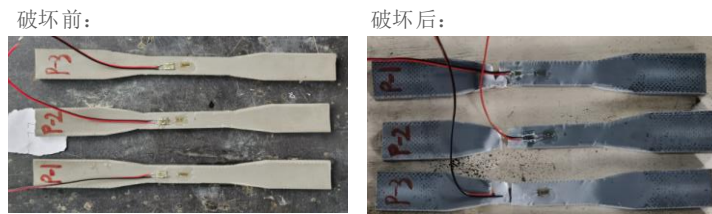


图6 PVC片材拉伸前后对比图

Fig. 6 Comparison of PVC sheet before and after stretching

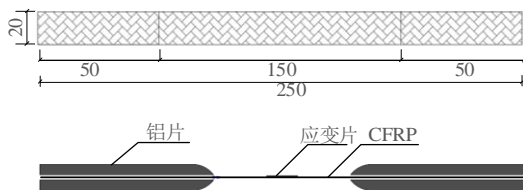


图7 CFRP片材设计图(单位/mm)

Fig. 7 CFRP sheet design (Unit: mm)

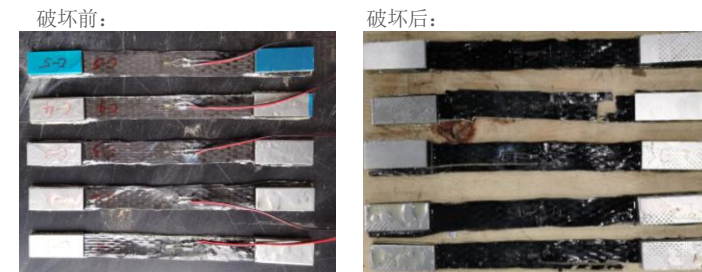


图8 CFRP片材拉伸前后对比图

Fig. 8 Comparison of CFRP sheet before and after stretching

加载初期,试件处于弹性阶段,试件表面无明显变化,核心区混凝土和型钢共同承担轴向荷载,PVC-CFRP管因混凝土横向变形极小而约束作用微弱;随着荷载的增长,试件进入带裂缝工作阶段,

表4 PVC材料力学性能

Table 4 Mechanical properties of PVC materials

材料名称	$f_{py}/\text{MPa}$	$E_p/\text{MPa}$
PVC	56.72	$2.98 \times 10^3$

注: $f_{py}$ 、 $E_p$ 分别是PVC管的抗拉强度和弹性模量。

项性能指标如表5所示,拉伸结果对比如图8所示。

## 2 试验结果与机理分析

### 2.1 试件破坏过程与破坏形态

大部分试件在1/4~1/2高度范围内发生破坏,破坏形态大致相似,表现为部分CFRP条带被拉断、PVC管破裂、混凝土被压碎,破坏形态如图9所示。

此时试CFRP条带因环向拉应力逐渐增大而发出纤维撕扯声,PVC管则因承受环向拉力与局部受压而出现微小变形与轻微劈裂声;继续增加荷载,由于核心区混凝土产生横向膨胀变形,CFRP条带环向

表 5 CFRP 材料力学性能

Table 5 Mechanical properties of CFRP material

材料名称	厚度/mm	$f_{\text{pcfrp}}/\text{MPa}$	$E_{\text{cfrp}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{cfrp}}$
CFRP	0.167	2 403	$2.44 \times 10^5$	0.009 9

注: $f_{\text{pcfrp}}$ 、 $E_{\text{cfrp}}$ 、 $\sigma_{\text{cfrp}}$ 分别是CFRP条带的抗拉强度、弹性模量和极限应变。

应力迅速达到其抗拉强度,发生脆性断裂;PVC管在双向应力达到塑性极限时出现细小裂缝;随着荷载的进一步增加,直至荷载达到极限承载力时,PVC管发生爆裂,并于试件中上部位置出现明显斜向裂缝,此时多数CFRP条带断裂,内部混凝土表面出现明显的贯穿裂缝,局部混凝土被压碎,试件承载力出现急速下降,此后,由于内部型钢未屈服,试件仍能继续承担荷载,直至内部型钢屈服,试件宣布破坏。

## 2.2 荷载-竖向位移曲线

所有试件的荷载-竖向位移曲线如图10(a)所示。可以看出,所有曲线发展趋势基本一致,大致分为4个阶段:弹性段、塑性段、下降段和平缓段,典型荷载-竖向位移曲线如图10(b)所示。弹性段(OA段):加载初期,所有材料均处于线弹性阶段,此时荷载-竖向位移曲线表现为线性增长趋势。塑性段(AB段):随着荷载增加,试件产生横向变形,PVC和CFRP条带环向应力显著增加,荷载表现为非线性增长;起初由于PVC-CFRP管的有效约束,荷载-竖向位移曲线塑性特征不明显,随着CFRP条带的陆续断裂和PVC管裂缝的产生,塑性特征开始显现,此时随着荷载的增加,竖向位移增长速率逐渐加快。下降段(BC段):随着荷载的继续增加,荷载达到峰值荷载,CFRP条带和PVC管相继破坏,此时PVC-CFRP管约束效应突然下降,荷载-竖向位移曲线出现陡降。平缓段(CD段):由于此时型钢并未屈服,在管内骨料的咬合作用下,试件尚有

一定的承载能力,荷载-竖向位移曲线进入平台阶段,此时荷载下降速度相对缓慢,直至型钢截面相继屈服。

## 2.3 荷载-侧向位移曲线

根据柱身位移计所测的数据发现,试件侧向位移主要沿型钢弱轴方向,强轴方向侧向位移变化不大。因此,选择PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱型钢弱轴方向的侧向位移进行分析。

所有试件的荷载-侧向位移曲线如图11所示。可以看出,曲线变化模式基本相似,可分为3个阶段:加载初期,材料均处于弹性阶段,此时试件的刚度较大,侧向位移呈线性增长,从数据看来,试件长细比越大,线刚度越小,荷载-侧向位移曲线初始斜率越小;随着荷载的增大,混凝土开裂并产生横向膨胀变形,位移计开始有位移增长数据,此外虽然部分CFRP条带断裂、PVC管出现微裂缝,使得试件刚度下降,但荷载-侧向位移曲线非线性变化并不明显,直到PVC-CFRP管破坏愈发严重,试件弯曲现象开始显现,荷载-侧向位移曲线出现明显非线性增长趋势,且随着长细比的增加,非线性增长趋势越明显。荷载到达峰值后,PVC-CFRP管破坏严重,此时荷载出现骤降,由于PVC-CFRP管丧失横向约束作用,试件侧向位移增长较快,荷载-侧向位移曲线出现间断性增长趋势。可以看出长细比为24的试件侧向位移均不大。

## 3 PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱轴压过程有限元建模理论

### 3.1 材料本构关系

#### 1)混凝土受压本构

研究对象核心混凝土处于三向受压状态,采用杨有福<sup>[21]</sup>提出的适用于ABAQUS的约束混凝土本

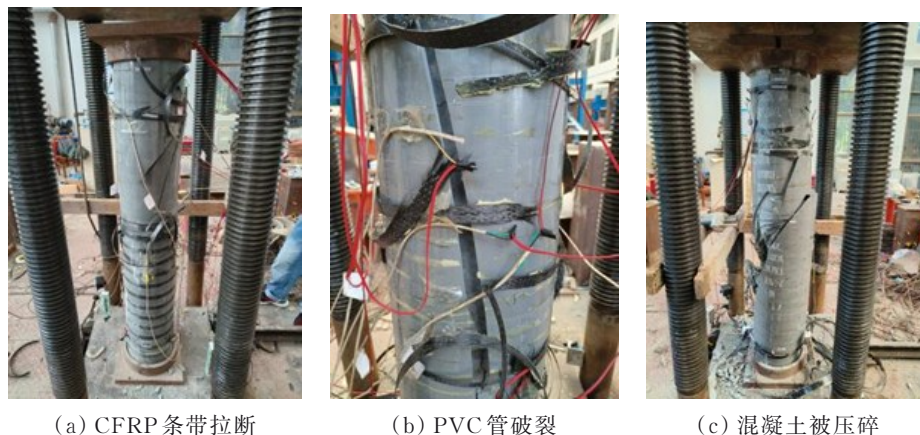
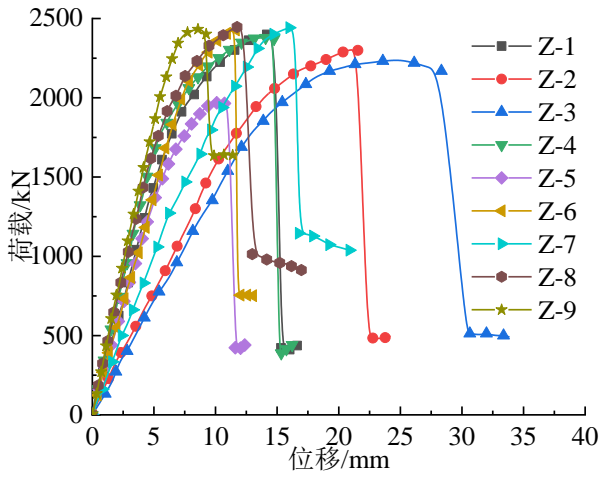
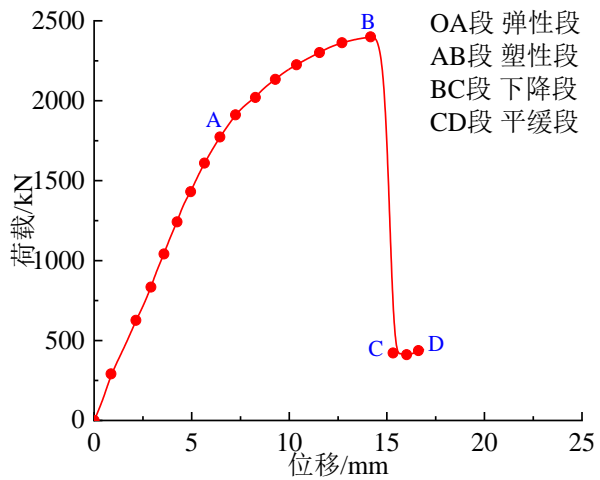


图9 轴压试件破坏模式

Figure 9 Damage pattern of axial compression specimen



(a) 试件荷载-竖向位移曲线



(b) 典型荷载-竖向位移曲线与损伤演化过程示意图

图 10 试件荷载-竖向位移曲线

Fig. 10 Specimen load-vertical displacement curves

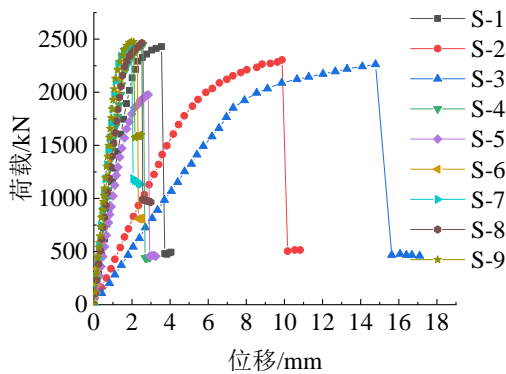


图 11 试件荷载-侧向位移曲线

Fig. 11 Specimen load-lateral displacement curve

构模型。

$$y = \begin{cases} 2x_1 - x_1^2, x_1 \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0(x_1 - 1)^2 + x_1}, x_1 > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$x_1 = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_0}, y = \frac{\sigma_{cu}}{\sigma_0} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = f_{cu} \quad (3)$$

$$\epsilon_0 = (\epsilon_c + 800\zeta^{0.2}) \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$\beta_0 = 0.0348(2.36 \times 10^{-5})^{\zeta - 0.5} \cdot (f_{cu})^{0.5} \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{A_p f_{py}}{A_c f_{cu}} \quad (6)$$

式中： $\sigma_{cu}$ 、 $\epsilon_{cu}$ 分别为核心混凝土的压应力、压应变； $\sigma_0$ 、 $\epsilon_0$ 分别为核心混凝土的峰值压应力、峰值压应变； $\epsilon_c$ 为同等级普通混凝土的峰值压应变； $\beta_0$ 为PVC管初应力系数； $\zeta$ 为约束效应系数， $A_p$ 、 $A_c$ 分别为PVC管、核心混凝土的截面面积。

### 2) 混凝土的受拉本构

混凝土受拉本构模型选择《混凝土结构设计标准》<sup>[22]</sup>中的混凝土单轴受拉应力-应变本构模型。

$$\sigma_{ct} = (1 - d_t) E_c \epsilon_{ct} \quad (7)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x_2^5], x_2 \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t(x_2 - 1)^{1.7} + x_2}, x_2 > 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$x_2 = \epsilon_{ct} / \epsilon_t \quad (9)$$

$$\rho_t = \frac{f_t}{E_c \epsilon_t} \quad (10)$$

式中： $\sigma_{ct}$ 、 $\epsilon_t$ 分别为单轴受拉混凝土的应力、应变； $d_t$ 为混凝土单轴受拉损伤演化参数； $\alpha_t$ 为混凝土受拉本构曲线下降段参数值，按规范取值； $f_t$ 、 $\epsilon_t$ 分别为混凝土单轴抗拉强度设计值以及对应的混凝土峰值拉应变。

### 3) 型钢本构关系

采用的Q235级热轧H型钢，属于各向同性均质材料，服从Von Mises屈服准则，强化准则为各向同性强化。钢材本构模型选择图12所示的双折线随动强化模型<sup>[23]</sup>，具体表达式为

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s, \epsilon_s < \epsilon_y \quad (11)$$

$$\sigma_s = f_y + (\epsilon_s - \epsilon_y) \alpha E_s, \epsilon_s \geq \epsilon_y \quad (12)$$

式中： $\sigma_s$ 、 $\epsilon_s$ 分别为型钢的应力与应变； $\epsilon_y$ 为型钢屈服应变， $\alpha$ 取0.01。

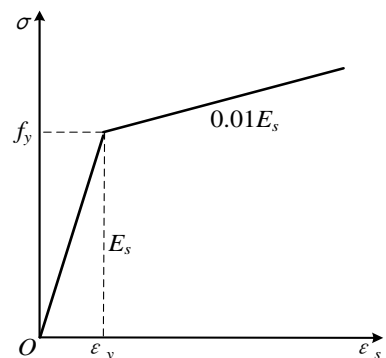


图 12 双折线随动强化应力-应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curve of bifurcated line following reinforcement

4)PVC管本构关系

PVC管本构模型采用试验实测数据拟合所得的应力-应变本构,如图13所示,假定PVC管为理想线弹性模型,其本构关系表达式见式(13)。

$$\sigma_{pvc} = 674.142\epsilon_{pvc} \quad (13)$$

式中: $\sigma_{pvc}$ 、 $\epsilon_{pvc}$ 分别为PVC管的拉应力和拉应变。

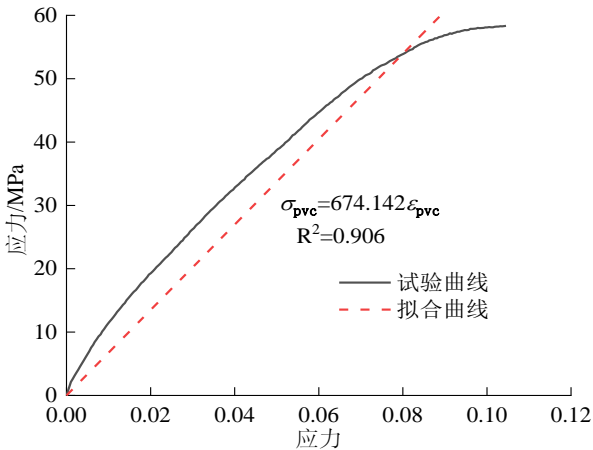


图13 PVC管应力-应变关系曲线

Fig. 13 Stress-strain relationship curve of PVC pipe

5)CFRP条带本构关系

CFRP达到极限应变就会出现断裂,可按线弹性材料考虑<sup>[24]</sup>。采用试验实测数据拟合得到应力-应变本构,如图14所示。其本构关系表达式见式(14)。

$$\sigma_{cfpr} = 1.179 \times 10^5 \epsilon_{cfpr} \quad (14)$$

式中: $\sigma_{cfpr}$ 、 $\epsilon_{cfpr}$ 分别为CFRP条带的拉应力、拉应变。

3.2 计算参数设置与网格划分

三维实体单元是描述复杂三维几何形状最通用、最自然的方式,在涉及面面接触、自接触的分析

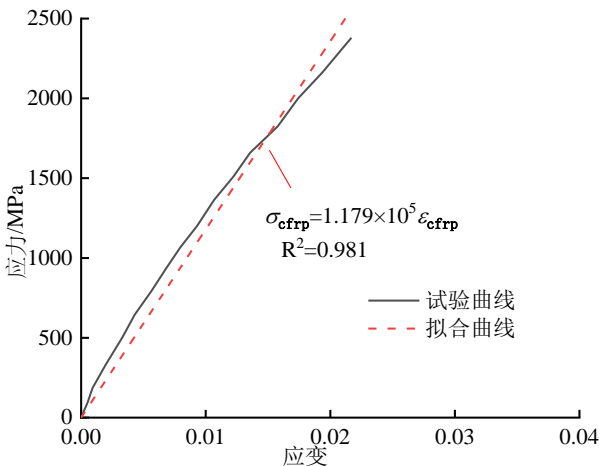


图14 CFRP条带应力-应变关系曲线

Fig. 14 Stress-strain relationship curve for CFRP strips

中,实体单元能够更真实地模拟接触面的相互作用、渗透和压力分布。模型中所有材料均采用三维实体单元(C3D8R);PVC管与CFRP条带表面为绑定约束(Tie);PVC管与混凝土为面与面接触,切向力设置为库伦摩擦,摩擦系数取0.25,法向设置为硬接触;混凝土与型钢之间不考虑黏结滑移,采用Tie(约束)。为了模拟出试验出现的破坏模式,先对试件进行一阶屈曲模态分析,运用弧长法(Riks法)施加 $L/1000$ 的初始缺陷。分析步骤选择“静力-通用”类型,通过位移控制加载方式施加轴向荷载。

3.3 破坏模式对比及模型合理性确定

根据以上方法对9根PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱进行静力加载全过程模拟,得到组合柱模拟破坏模式,将其与试验破坏模式进行对比,如图15所示。由图15可见,二者破坏位置相近,均发生在组合柱上端1/4处。将模拟所得荷载-竖向位移关系曲线其与试验结果进行对比,如图16所示。由图16可见,荷载-竖向位移曲线模拟结果与试验结果趋势相近,但试验曲线下降段陡降更明显,主要是因为模拟未考虑材料的断裂破坏。模拟所得的峰值荷载及对应竖向位移与试验数据对比如表6所示。可以看出,模拟结果和试验结果吻合良好,误差均在13%以内, $N_{fe}/N_{ue}$ 的均值、标准差、变异系数分别为0.990、0.062和0.063, $\Delta_{fe}/\Delta_{ue}$ 的均值、标准差、变异系数分别为0.963、0.014和0.015,说明模型能有效模拟PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱全过程轴压力学性能。

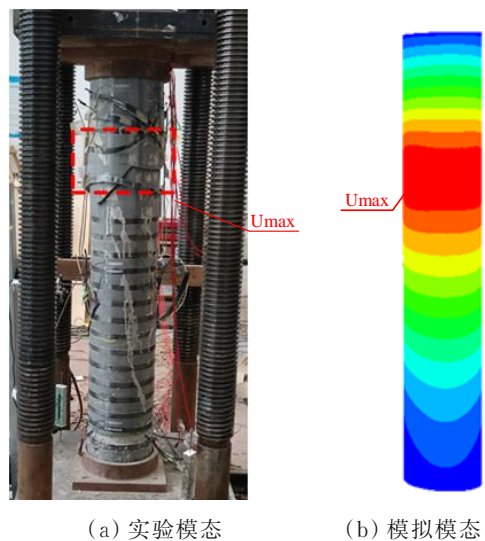


图15 破坏模式对比

Fig. 15 Comparison of damage modes

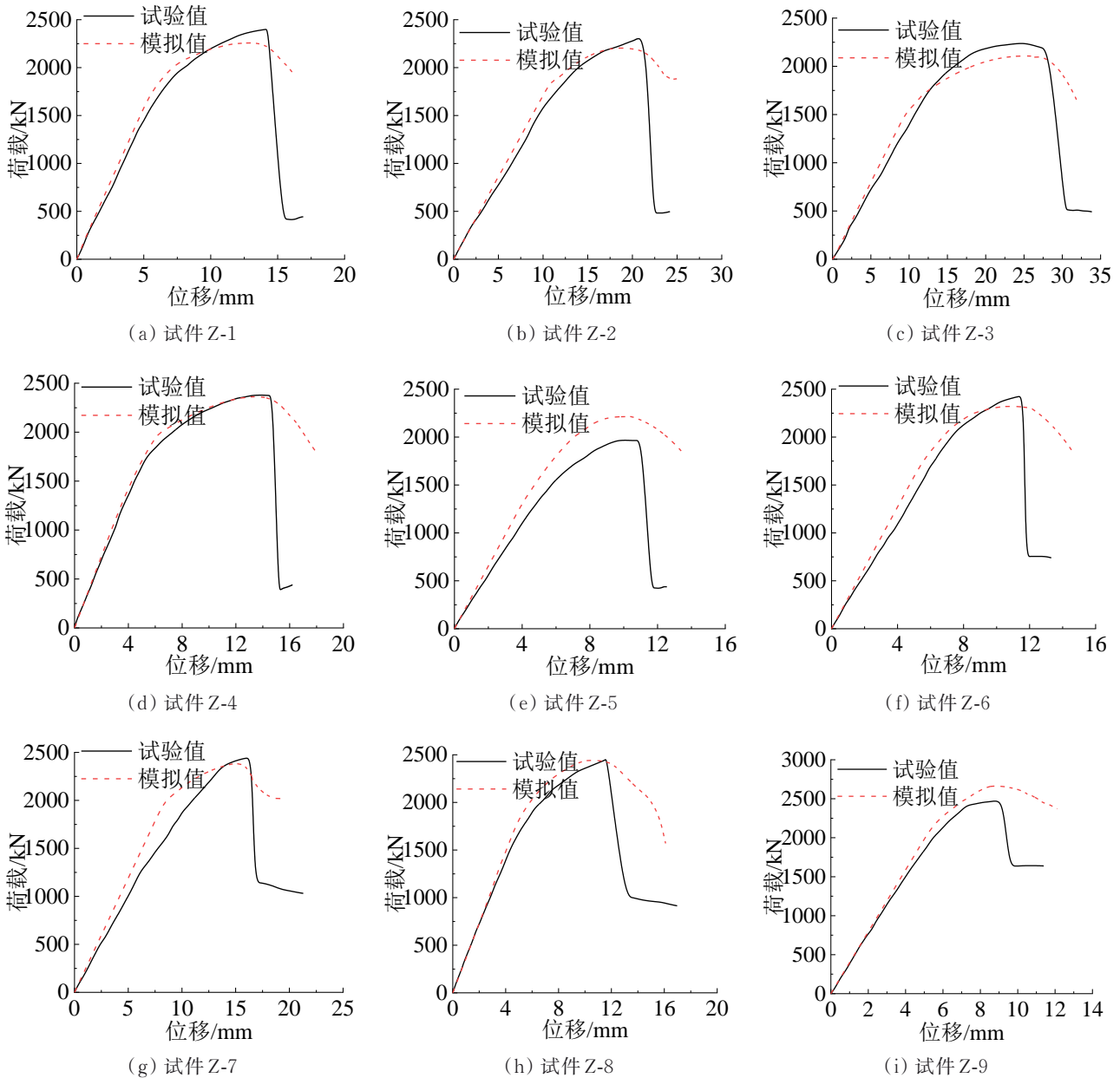


图 16 荷载-竖向位移曲线对比图

Fig. 16 Load-Vertical Displacement Comparison Diagram

#### 4 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱轴压稳定性能研究

稳定系数是用以评价受压构件在轴向荷载作用下稳定性能的重要指标。参考《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)<sup>[25]</sup>中受压构件承载力计算公式

$$N_u = \phi N_{u0} \quad (15)$$

式中： $N_u$ 为混凝土中长柱在轴压状态下的承载力； $N_{u0}$ 为混凝土短柱在轴压状态下的承载力； $\phi$ 为稳定系数。

根据 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土短柱轴压力学性能试验，得到短柱承载力计算方法如式(16)所示<sup>[13]</sup>。

$$N_{u0} = 0.9(f_{uc}A_c + f_yA'_a) + 3.6k_eA_c(f_r + f_{pl}) \quad (16)$$

式中： $A'_a$ 为型钢的截面面积； $k_e$ 为 PVC-CFRP 管对混凝土的有效约束系数； $f_r$ 、 $f_{pl}$ 分别为 CFRP 条带和 PVC 管的约束效应。

##### 4.1 稳定系数现有理论计算公式

现有研究认为，轴压构件稳定系数主要与长细比、约束比及截面尺寸有关。部分长细比计算模型如下。

1)《混凝土结构设计标准》(GB 50010—2010)模型<sup>[22]</sup>

$$\phi = [1 + 0.002(\frac{l_0}{b} - 8)^2]^{-1} \quad (17)$$

式中： $l_0$ 为试件长度， $b$ 为矩形截面边长较小值。

2)EN 1994-1-1:2004

表 6 模拟-试验结果数值对比

Table 6 Numerical comparison of simulation-test results

编号	$N_{ue}/\text{kN}$	$N_{fe}/\text{kN}$	$\Delta_{ue}/\text{mm}$	$\Delta_{fe}/\text{mm}$	$N_{fe}/N_{ue}$	$\Delta_{fe}/\Delta_{ue}$	荷载误差/%	位移误差/%
Z-1	2 403	2 257	14.30	12.91	0.939	0.903	6	10
Z-2	2 306	2 200	20.49	18.83	0.954	0.919	5	8
Z-3	2 240	2 112	24.98	25.11	0.943	1.005	6	1
Z-4	2 379	2 362	14.07	13.61	0.993	0.967	1	3
Z-5	1 968	2 214	10.10	10.40	1.125	1.030	13	3
Z-6	2 428	2 321	11.65	10.90	0.956	0.936	4	6
Z-7	2 442	2 388	15.71	15.42	0.978	0.982	2	2
Z-8	2 467	2 341	11.67	10.79	0.949	0.925	5	8
Z-9	2 479	2 664	8.92	8.90	1.075	0.998	7	1
均值					0.990	0.963		
标准差					0.062	0.014		
变异系数					0.063	0.015		

注: $N_{ue}$ 、 $N_{fe}$ 分别为试验值与模拟值的极限承载力; $\Delta_{ue}$ 、 $\Delta_{fe}$ 分别为试验值与模拟值的极限承载力对应的竖向位移。

Eurocode 4 钢与混凝土组合结构设计模型<sup>[26]</sup>

$$\phi = (\varphi + \sqrt{\varphi^2 + \bar{\lambda}^2})^{-1} \quad (18)$$

$$\varphi = 0.5[1 + \chi(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (19)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{u0}}{N_{cr}}} \quad (20)$$

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 (E_c I_c + E_s I_s + E_p I_p) \quad (21)$$

式中: $\chi$ 为缺陷系数按规范取值为 0.34; $I_c$ 、 $I_s$ 、 $I_p$ 分别为混凝土、型钢及 PVC 管截面惯性矩; $\lambda$ 为长细比; $\lambda = l_0/i$ , $i = d/4$ , $d$ 为截面直径。

3) 潘景龙模型<sup>[27]</sup>

潘景龙等对外包 FRP 矩形截面钢筋混凝土柱进行轴压试验,分析长细比及约束比对该类柱稳定系数的影响规律,同时考虑了截面形状的影响,提出了 FRP 强约束配筋混凝土中长柱稳定系数计算模型

$$\phi = [1 + \alpha \frac{\xi}{l_0/b} (\frac{l_0}{b} - 4.5)^2]^{-1} \quad (22)$$

其中: $\xi$ 为约束比按文献取值为 0.198, $\alpha$ 为截面形状影响系数圆形截面取 0.35。

4) 王文炜模型<sup>[28]</sup>

王文炜基于潘景龙模型,提出了 FRP 强约束配筋混凝土柱(矩形截面)稳定系数简化计算模型

$$\phi = 1.1745 - 0.0315 \frac{l_0}{b} \quad (23)$$

5) 丁磊模型<sup>[29]</sup>

丁磊采用一次函数对稳定系数与长细比进行线性拟合,得到了 CFRP 加固型钢混凝土柱稳定系数计算式

$$\phi = 1.034 - 0.019 \frac{l_0}{b} \quad (24)$$

6) Yu 模型<sup>[30]</sup>

Yu 等通过对试验数据进行二次函数回归分析,得到 PVC-FRP 管混凝土中长柱稳定系数计算式

$$\begin{cases} \phi = 0.0031(\frac{l_0}{d})^2 - 0.0616(\frac{l_0}{d}) + 1.13 \\ \frac{l_0}{d} < 10 \end{cases} \quad (25)$$

式中: $d$ 为圆形截面的直径。

可以看出,所有模型均认为长细比是影响稳定系数的主要因素。根据《混凝土结构设计标准》(GB 50010—2010)模型<sup>[22]</sup>,矩形截面与圆形截面的换算方法为

$$\phi = 1.034 - 0.019 \frac{l_0}{b} \quad (26)$$

## 4.2 稳定系数影响因素分析

为了探索各因素对稳定系数的影响,基于有限元建模理论,对试验中中长柱截面参数相对应的短柱,开展有限元模拟分析,各试件的参数及轴压极限承载力如表 7 所示(编号 DZ 代表短柱)。其中,短柱不考虑初始缺陷,短柱模拟方法的有效性已通过试验验证<sup>[14]</sup>。

根据式(15),计算得到 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱稳定系数  $\phi$ ,具体模拟结果如表 8 所示。

为了便于观察各影响因素对 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱稳定系数的影响规律,对各影响因素进行归一化处理,得到无量纲设计参数与稳定系数之间的关系,如图 17 所示,其中, $X_i$ 、 $X_{MAX}$ 分别为各参数设计值及各参数最大值; $\phi_i$ 、 $\phi_{XMAX}$ 分别为对应稳定系数。

由图 17 可以看出:PVC-CFRP 管约束型钢混

表7 试件承载力模拟结果

Table 7 Simulation results of specimen bearing capacity

试件编号	截面直径/mm	高度 L/mm	混凝土强度等级	型钢截面尺寸	CFRP 条带层数 n	PVC 管壁厚/mm	CFRP 条带距宽比	承载力模拟结果/kN
DZ-1	250	600	C30	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	1	9.6	2	2 444
DZ-2	250	600	C30	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	1	9.6	1	2 587
DZ-3	250	600	C30	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	1	9.6	3	2 381
DZ-4	250	600	C40	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	1	9.6	2	2 523
DZ-5	250	600	C50	100 mm×100 mm×6 mm×8 mm	1	9.6	2	2 636
DZ-6	250	600	C30	100 mm×100 mm×6 mm×12 mm	1	9.6	2	2 510
DZ-7	250	600	C30	100 mm×100 mm×6 mm×16 mm	1	9.6	2	2 928

表8 承载力稳定系数

Table 8 Load-bearing capacity stabilisation factors

试件编号	$N_{u0e}/kN$	$N_{je}/kN$	$\phi$
Z-1	2 444	2 257	0.923
Z-2	2 444	2 200	0.900
Z-3	2 444	2 112	0.864
Z-4	2 587	2 362	0.913
Z-5	2 381	2 214	0.930
Z-6	2 523	2 321	0.920
Z-7	2 636	2 388	0.906
Z-8	2 510	2 341	0.933
Z-9	2 928	2 664	0.910

注: $N_{je}$ 为长柱的模拟值, $N_{u0e}$ 为对应短柱的模拟值。

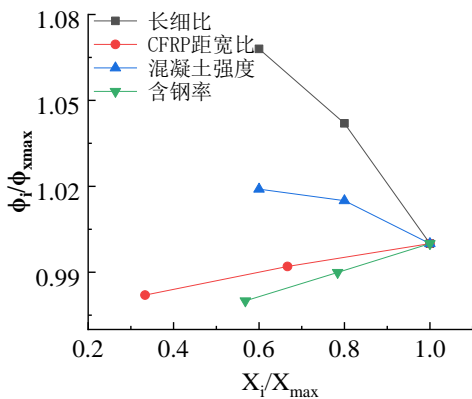


图17 无量纲设计参数与稳定系数之间的关系

Fig. 17 Relationship between dimensionless design parameters and stability coefficients

凝土中长柱的稳定系数随着长细比、CFRP距宽比、混凝土强度的增大而减小;随着含钢率的增大而增大。其中长细比对稳定系数影响最为敏感,其他条件敏感度较低。综上所述,优先考虑长细比对稳定系数的影响,这与大多数现有研究结论相一致。

4.3 PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱稳定系数拟合公式

为了获得更精确的长细比影响规律,采用有限元方法对不同长细比(24~60)下的PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱开展轴压加载模拟分析,其

他参数同DZ-1号短柱,模拟结果如表9所示。

表9 稳定系数与长细比的关系

Table 9 Relationship between stabilisation factor and length to slenderness ratio

长细比λ	$N_{u0e}/kN$	$N_{je}/kN$	$\phi$
24	2 444	2 257	0.924
28	2 444	2 246	0.919
32	2 444	2 200	0.900
36	2 444	2 166	0.886
40	2 444	2 112	0.864
44	2 444	2 050	0.839
48	2 444	1 975	0.808
52	2 444	1 893	0.775
56	2 444	1 802	0.737
60	2 444	1 706	0.698

长细比对稳定系数的影响关系曲线如图16所示。由图16可以见,随着长细比的增加,稳定系数逐渐减小。将试验结果与文献[27]、[30]试验数据及现有模型进行对比,如图18所示。对比发现:现有稳定系数与长细比呈线性或非线性递减关系,而本文所得的稳定系数与长细比曲线更偏向于非线性递减趋势,参考《混凝土结构设计标准》(GB 50010—2010)<sup>[22]</sup>中的二次函数关系模型,得到PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱稳定系数计算式

$$\phi = -1.243 \times 10^{-4} \lambda^2 + 4.01 \times 10^{-3} \lambda + 0.899 \tag{27}$$

拟合公式更接近规范值,且与其他学者研究模型变化趋势基本保持一致,因此式(27)可用于PVC-CFRP管约束型钢混凝土结构的稳定系数实际工程运用中。

5 PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱轴压承载力计算公式与试验验证

5.1 轴压承载力理论计算公式

将式(16)与式(27)代入式(15),可得PVC-CFRP管约束型钢混凝土中长柱轴压承载力计算

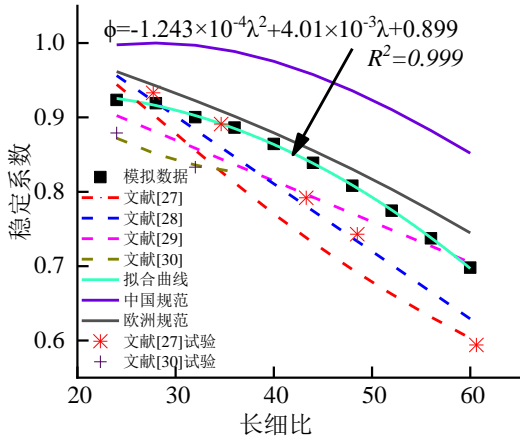


图 18 稳定系数与长细比的关系

Fig. 18 Stability coefficient vs. length to slenderness ratio

公式

$$N_u = \phi [0.9(f_{ic}A_c + f_yA'_a) + 3.6k_eA_c(f_r + f_{pl})] \quad (28)$$

式中稳定系数按式计算式(27)计算。

### 5.2 轴压承载力理论计算公式预测结果评价

将 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱承载力理论公式计算值  $N_f$  与试验结果  $N_{ue}$  进行对比,如表 10 所示,大多数试件模拟值与试验值吻合度较高,少数试件(Z-5、Z-7、Z-9)误差稍大。这主要是因为,一方面试验显示的试件承载力与条带距宽比、混凝土强度、含钢率等因素之间为非线性关系,而本计算模型为了简化,仅考虑其线性关系;另一方面,各影响因素对试件稳定性兼具连带影响,而本模型未作考虑;此外,试验结果本身具有一定的离散性,导致部分计算结果与试验结果有一定偏差,但误差都在合理范围内,  $N_f/N_{ue}$  的均值、标准差、变异系数分别为 1.018、0.075 和 0.074,说明该承载力计算公式能有效预测 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土

表 10 计算结果与试验结果对比

Table 10 Comparison of calculation results and test results

试件编号	$N_f$ /kN	$N_{ue}$ /kN	$N_f/N_{ue}$	误差/%
Z-1	2 261	2 403	0.941	0.059
Z-2	2 204	2 306	0.956	0.044
Z-3	2 107	2 240	0.941	0.059
Z-4	2 268	2 379	0.954	0.047
Z-5	2 259	1 968	1.148	0.148
Z-6	2 457	2 428	1.012	0.012
Z-7	2 698	2 442	1.105	0.105
Z-8	2 487	2 467	1.008	0.008
Z-9	2 712	2 479	1.094	0.094
均值			1.018	
标准差			0.075	
变异系数			0.074	

土中长柱的承载力。

## 6 结论

1) PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱轴压状态下破坏基本集中在 1/4~1/2 高度处,破坏现象表现为 CFRP 条带被拉断、PVC 管破裂、混凝土被压碎。

2) PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱轴压过程中所有荷载-竖向位移曲线发展趋势基本一致,大致分为弹性段、塑性段、下降段和平缓段 4 个阶段。

3) 相较于混凝土强度、含钢率、CFRP 条带间距与层数、PVC 管厚等参数,长细比对 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱的承载力影响最为明显。随着长细比的增加,试件的承载力逐渐降低,承载力与长细比近似呈二次函数递减关系。

4) 基于模拟数据的回归分析,建立 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱稳定系数与长细比的计算关系,并提出 PVC-CFRP 管约束型钢混凝土中长柱承载力计算公式,公式计算结果与试验数据吻合较好。

## 参考文献

[1] 田时雨,任凤鸣,伍峻磊,等. FRP 约束型钢混凝土柱-钢筋混凝土环梁节点震后轴压性能评估[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5343-5354.  
TIAN S Y, REN F M, WU J L, et al. Evaluation of axial compressive performance of FRP-confined steel-reinforced concrete column-to-reinforced concrete ring beam joint with seismic damage [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5343-5354. (in Chinese)

[2] CHEN M T, ZHANG T Y, YOUNG B. Behavior of concrete-filled cold-formed steel built-up section stub columns [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 187: 110692.

[3] WANG J, YANG Z M, ZHENG X L, et al. Axial compression behavior of square section concrete-filled steel tubes reinforced with internal latticed steel angles [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 213: 108414.

[4] 王吉忠,张硕,杨柳,等. 圆钢管约束型钢高强混凝土短柱的受压性能试验研究及有限元分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 21-32.  
WANG J Z, ZHANG S, YANG L, et al. Experimental study and finite element analysis on compressive behavior of circular tubed steel-reinforced high-strength concrete short columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 21-32. (in Chinese)

- [5] 蔡文翔, 黄玲, 熊强, 等. 钢管-方钢管再生混凝土组合长柱轴压性能模拟分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2021, 35(2): 74-81.  
CAI W X, HUANG L, XIONG Q, et al. Performance simulation analysis for composite long columns made of square steel tube filled with steel-reinforced recycled concrete under axial compression [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2021, 35(2): 74-81. (in Chinese)
- [6] 马辉, 张鹏, 薛建阳, 等. 基于统一强度理论的方钢管型钢再生混凝土短柱轴压承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增刊1): 258-265.  
MA H, ZHANG P, XUE J Y, et al. Calculation of axial compressive bearing capacity of short concrete-filled recycled aggregate steel tubular columns based on the unified strength theory [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(Sup 1): 258-265. (in Chinese)
- [7] 刘坚, 张鹏程, 刘长江, 等. 内配型钢的方钢管再生混凝土短柱轴压承载力分析[J]. 混凝土, 2021(10): 1-5.  
LIU J, ZHANG P C, LIU C J, et al. Axial bearing capacity analysis of RAC-filled square steel tubular stub columns with encased profiled steel under axial compression [J]. Concrete, 2021(10): 1-5. (in Chinese)
- [8] XU Y, TANG H Y, CHEN J L, et al. Numerical analysis of CFRP-confined concrete-filled stainless steel tubular stub columns under axial compression [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 37: 102130.
- [9] 周济, 陈宗平, 徐炜圣, 等. 珊瑚海砂海水混凝土中 CFRP-钢复合筋搭接性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2645-2661.  
ZHOU J, CHEN Z P, XU W S, et al. Lap-spliced behavior of CFRP-steel composite bars in coral sea-sand seawater concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(5): 2645-2661. (in Chinese)
- [10] 陈景, 李翔宇. 基于贝叶斯理论的 FRP 约束矩形混凝土柱轴压极限强度研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(7): 58-67.  
CHEN J, LI X Y. Research on axial compression ultimate strength of FRP-confined rectangular concrete column based on Bayesian theory [J]. Composites Science and Engineering, 2020(7): 58-67. (in Chinese)
- [11] YU F, BU S S, LI D A, et al. Experimental investigation and theoretical study on bearing capacity of strong PVC-FRP confined concrete column-weak joint strengthened with core steel tube under axial loading [J]. Construction and Building Materials, 2021, 271: 121880.
- [12] 于峰, 牛荻涛. PVC-CFRP 管钢筋混凝土轴压短柱试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 129-136.  
YU F, NIU D T. Experimental study on PVC-CFRP confined reinforced concrete short column under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(6): 129-136. (in Chinese)
- [13] TAO Q L, ZHANG Y, GUAN Y Y, et al. Experimental and theoretical analysis of PVC-CFRP confined steel reinforced concrete columns under axial compressive load [J]. Structural Concrete, 2025, 26(4): 4697-4709.
- [14] 牛犇. PVC-FRP 管约束型钢混凝土柱轴压力学性能研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2023.  
Niu B. Study on axial compression mechanical properties of PVC-FRP pipe confined steel reinforced concrete column [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [15] 陶清林, 张毅, 关永莹, 等. PVC-FRP 管约束型钢混凝土柱应力-应变关系分析[J/OL]. 工程力学, 2024: 1-18. (2024-12-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=GCLX20241223009>.  
Tao Q L, Zhang Y, Guan Y Y, et al. Analysis of stress-strain relationship of steel reinforced concrete columns confined by PVC-FRP pipes [J/OL]. Engineering Mechanics, 2024: 1-18. (2024-12-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=GCLX20241223009>.
- [16] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].  
GB/T 50152—2012 Standard for test method of concrete structures [S]. (in Chinese)
- [17] GB/T 2975—2018 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备[S].  
GB/T 2975—2018 Steel and steel products—Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing [S]. (in Chinese)
- [18] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S].  
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature [S]. (in Chinese)
- [19] GB/T 8804.1—2003 热塑性塑料管材 拉伸性能测定 第 1 部分: 试验方法总则[S].  
GB/T 8804.1—2003 Thermoplastic pipes-Determination of tensile properties-Party 1: General test method [S]. (in Chinese)
- [20] GB/T 3354—2014 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法[S]. GB/T 3354—2014 Test method for tensile properties of orientation fiber reinforced polymer matrix composite materials [S]. (in Chinese)
- [21] 杨有福. 钢管再生混凝土构件荷载-变形关系的理论分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(12): 1-6, 124.  
YANG Y F. Theoretical research on load-deformation relations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular members [J]. Industrial Construction, 2007, 37(12): 1-6, 124.

- 1-6, 124. (in Chinese)
- [22] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. (in Chinese)
- [23] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 8-44.  
ZHONG S T. The concrete-filled steel tubular structures [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 8-44. (in Chinese)
- [24] YU F, XU B, WU C Z, et al. Finite element analysis of the seismic performance of PVC-CFRP confined concrete column-ring beam interior joints [J]. Structures, 2024, 62: 106186.
- [25] JGJ 138—2016 组合结构设计规范[S].  
JGJ 138—2016 Code for design of composite structures [S]. (in Chinese)
- [26] EN 1994-1-1: 2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings [S].
- [27] 潘景龙, 胡忠君, 徐田, 等. FRP强约束混凝土配筋中长柱稳定系数的研究 [C]//第三届全国FRP学术会议, 2004: 149-154.
- PAN J L, HU Z J, XU T, et al. Study on stable factor of the axial-compression reinforced concrete slender columns wrapped with FRP [C]//The 3rd National Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) in Civil Engineering, 2004: 149-154. (in Chinese).
- [28] 王文炜. FRP加固混凝土结构技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 6-52.  
WANG W W. Technology and application of FRP strengthening concrete structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 6-52. (in Chinese)
- [29] 丁磊. 长细比对CFRP加固型钢混凝土柱轴压性能的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.  
DING L. The effect of slenderness ratio on steel reinforced concrete rectangular short column confined by carbon fiber reinforced polymer strips [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [30] YU F, NIU D T. Stress-strain model of PVC-FRP confined concrete column subjected to axial compression [J]. International Journals of Physical science, 2010, 5 (15): 2304-2309.

(编辑 XXX)