

轻钢-钢纤维再生混凝土组合短柱轴心受压性能试验研究

边瑾靓^{1,2*}, 陈志华^{1,2}, 刘爽¹, 杨新磊¹, 乔崎云³

(1. 天津城建大学 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 3. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 提出了一种轻钢-钢纤维再生混凝土组合柱, 为研究其轴心受压性能, 设计了5组不同构造的短柱试件进行轴压试验, 包括1组型钢试件和4组组合柱试件。以截面构造、钢纤维体积率和再生混凝土强度为变化参数, 研究不同参数对组合柱破坏特征、荷载-位移曲线、承载力、刚度、延性的影响。结果表明: 提出的轻钢-钢纤维再生混凝土组合短柱可以提高轻钢柱的稳定性能, 并且能显著提高轻钢柱的承载能力; 轻钢-钢纤维再生混凝土组合短柱的承载能力随着钢纤维体积率的增加而提高, 钢纤维对再生混凝土裂缝的发展起到约束作用, 且能降低试件的损伤程度和刚度的退化程度; 轻钢-钢纤维再生混凝土组合短柱的承载能力随着再生混凝土强度的提高而提高, 但延性会相应降低。在参考规范后, 建立了适用于轻钢-钢纤维再生混凝土组合短柱的受压承载力计算公式。

关键词: 轻钢构件; 钢纤维再生混凝土; 组合短柱; 受压性能; 试验研究

中图分类号: TU398⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0001-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20231208002

Experimental Study on Axial Compression Performance of Light Steel-Steel Fiber Recycled Concrete Composite Short Column

BIAN Jinliang^{1,2*}, CHEN Zhihua^{1,2}, LIU Shuang¹, YANG Xinlei¹, QIAO Qiyun³

(1. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

*Corresponding author: bjl211@163.com

Abstract: A light steel-steel fiber recycled concrete composite column (SFRC composite column) was proposed. In order to study the axial compression performance of the composite column, five groups of short column specimens with varying configuration were tested, including one group of steel column specimens and four groups of composite column specimens. The effects on the failure characteristics, load-displacement curves, bearing capacity, stiffness and ductility of composite columns were studied with the parameters of section configuration, steel fiber content and recycled concrete strength. The results indicate that the SFRC composite column enhances the stability of the light steel column and substantially increases its bearing capacity. The bearing capacity of SFRC composite column increases with the addition of steel fiber. Steel fiber can restrain the crack development of recycled concrete and reduce the damage and stiffness degradation of specimens. The bearing capacity of composite column increases with the increase of recycled concrete strength, but the ductility

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 天津市自然科学基金(22JCQNJC00680), 天津市企业科技特派员项目(23YDTPJC00790)

作者简介:

边瑾靓(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事装配式建筑、钢结构及组合结构方面的研究。E-mail: bjl211@163.com。(通信作者)

陈志华(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事空间结构、钢结构及组合结构方面的研究。

decreases accordingly. A formula for calculating the compressive bearing capacity of SFRC composite short column has been established based on the code.

Keywords: light steel member; steel fiber recycled concrete; composite short column; compression performance; experimental study

我国大量人口的居住地在村镇地区,且村镇建筑数量随着农村经济的发展而出现显著增长,但由于经济条件、地理位置、风俗文化等因素的影响,我国大多数村镇建筑类型是自建房屋,在建造时并未充分考虑抗震问题,因此这类建筑会存在安全隐患^[1-2]。在我国《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提出要推广绿色建材、装配式建筑和钢结构住宅,建设美丽宜居乡村。对于人口众多的农村地区,研发装配、抗震、绿色一体化农房是农村建设的迫切需求。

装配式轻钢框架结构具有运输方便、施工快速、抗震性能好等优点,可以较好地改善村镇住宅的抗震性能,适用于农村地区^[3]。由于轻钢框架结构的预制构件截面尺寸较小,框架柱易发生失稳破坏,因此国内外学者通过采用轻钢-混凝土组合柱构件提高轻钢框架柱的受力性能,轻钢组合柱是指由0.8~10.0 mm厚的冷弯薄壁型钢或普通型钢与混凝土组成的轻钢组合构件^[4]。国内外已有学者对轻钢-混凝土组合柱进行了相关研究,BUACHART等^[5]进行了9根冷弯薄壁方钢管混凝土柱的轴压试验研究,分别考虑了钢管厚度、混凝土抗压强度和构件长度对构件力学性能的影响,文中有限元分析结果与试验结果吻合良好,研究表明填充混凝土能有效抑制钢管的局部变形。RAHNAVARD等^[6]对4组不同截面构造的冷弯型钢混凝土组合短柱受压抗屈曲性能进行了试验研究和数值分析,并考虑了总截面面积和有效截面面积对冷弯型钢混凝土组合短柱的影响。综合多种因素后对EN1994-1-1规范建议的公式进行修正,得到了适用的计算方法。陶忠等^[7]对矩形冷弯型钢钢管混凝土组合柱的轴压性能进行了研究,结果表明试件表现出较好的承载能力和延性,并利用数值解法计算了矩形冷弯型钢钢管混凝土组合柱荷载-变形关系全过程曲线,且给出了承载力计算公式。王莉萍等^[8]应用有限元软件对冷弯薄壁钢管混凝土柱轴压性能进行了数值分析,分析了空钢管柱与钢管混凝土柱力学性能的差异性,并研究了不同参数对组合柱力学性能的影响,研究表明掺入混凝土能提高冷弯薄壁钢管混凝土柱抵抗局部屈曲的能力。文献[9-10]中由轻钢与再生混凝土组合形成的轻钢再生混凝土组合柱,可提高轻钢柱稳定性能和抗震性能。此外再生混凝土的使用也促进了建筑垃圾资源化利用,响应了国家可持续战略的号召。为解决型钢混凝土结构施工困难

这一问题,伍凯等^[11]用钢纤维替代钢筋形成了型钢-钢纤维混凝土组合梁,并针对其进行了相关研究,结果表明在用钢量相似的情况下,无配筋的型钢-钢纤维混凝土组合梁构造简单并且延性性能较好,但正截面抗弯能力有所降低。

基于上述研究背景,课题组提出了轻钢-钢纤维再生混凝土(简称SFRC)组合柱构件。该构件由再生混凝土、轻钢柱和钢纤维组成,如图1所示。再生混凝土在提高轻钢柱稳定性能的同时,还能促进建筑垃圾资源化利用。钢纤维替代钢筋可以简化构件构造,方便施工,并提高组合柱的延性。SFRC组合短柱的受压性能对结构安全和设计尤为重要,而针对SFRC组合短柱受压性能的研究尚少,因此本文针对SFRC组合短柱受压性能进行了轴心受压短柱试验研究,为其设计应用提供参考。

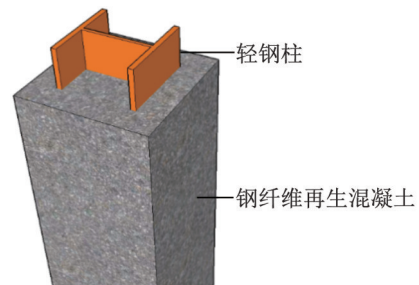


图1 SFRC组合柱

Fig. 1 SFRC composite column

1 试验概述

1.1 试件设计

为研究SFRC组合短柱轴心受压性能,共设计了5组短柱试件,每组包含2个试件,各组试件设计参数完全一致,共计10个试件。试验参数包括:截面构造、再生混凝土强度和钢纤维体积率。试件截面构造包括轻钢柱和组合柱两种构造形式,试件再生混凝土强度等级包括C30和C50两种,钢纤维体积率包括0.0%、0.5%和1.0%,详细设计参数如表1所示。以试件组CC-1-30为例解释试件编号规则,字母CC代表组合柱,字母SC代表轻钢柱,数字1代表钢纤维体积率为1%,数值30代表混凝土强度等级为C30。试件型钢规格均选为HM150 mm×100 mm×6 mm×9 mm,组合柱试件尺寸均为200 mm×200 mm×600 mm(高×宽×长),试件的详细尺寸如图2所示。

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件组编号	截面尺寸/mm	长度/mm	保护层厚度/mm	钢纤维体积率/%	再生混凝土强度
SC	150×100×6×9	600	0	0.0	无
CC-0-30	200×200	600	25	0.0	C30
CC-0.5-30	200×200	600	25	0.5	C30
CC-1-30	200×200	600	25	1.0	C30
CC-1-50	200×200	600	25	1.0	C50

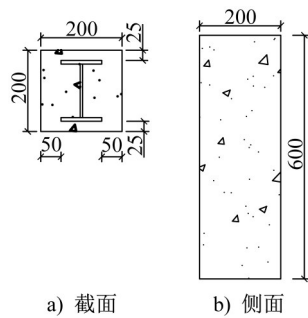


图2 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Specimens dimensions (unit: mm)

1.2 试验材料

SFRC组合短柱中钢纤维再生混凝土中的粗骨料选用再生石子,均来自建筑废旧混凝土再加工,再生粗骨料取代率为100%。再生粗骨料粒径为5~10 mm,压碎指标为9%,堆积密度为 $1\ 252.8\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,表观密度为 $2\ 650\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,针片状颗粒含量为4%,吸水率为4.45%。钢纤维选用长度为35 mm、等效直径为0.75 mm、长径比为47的端钩型钢纤维,其抗拉强度为1 170 MPa。试验中强度等级为C30和C50混凝土的配合比如表2所示。两种强度等级的试件分别预留3个尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的立方体试件和尺寸为150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体试件,并通过试验机进行立方体试件和棱柱体试件的抗压强度试验。28 d后分别测量两种强度试件的立方体强度均值,C30钢纤维再生混凝土立方体试件强度的均值为37.76 MPa,C50立方体试件抗压强度的均值为51.11 MPa。

工字型钢的翼缘和腹板的力学性能试验按照《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[12]测试,SFRC组合短柱中钢材力学性能指标如表3所示。

1.3 测试方案

1.3.1 试验装置和加载制度

试验的加载方式采用轴心受压加载,试验装置采用天津城建大学结构实验室中的20 000 kN液压式电子

表2 再生混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of recycled concrete

强度等级	再生粗骨料	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$					
		外加水	水泥	矿粉	粉煤灰	砂	减水剂
C30	1 186.67	204.39	450.00	45.00	45.00	639.17	4.58
C50	999.98	205.00	417.47	59.52	59.52	712.50	17.50

表3 钢材材料性能

Table 3 Material properties of steel

型钢部位	厚度/mm	F_y/MPa	F_u/MPa	E_s/MPa
翼缘	9	285	458	1.99×10^5
腹板	6	265	406	2.41×10^5

压力试验机,试验机上部为球铰,下部用液压千斤顶加载,荷载通过压力传感器进行监测与记录,加载装置如图3所示。

加载中采用荷载-位移联合加载的方式进行加载,试验正式开始之前先进行预加载,检查并确认加载设备工作正常后卸载,然后进行正式加载。正式加载时,荷载达到 $0.8F_u$ 之前采用荷载控制的方式加载, F_u 为预估峰值荷载。每级荷载取 F_u 的1/15并持荷5 min。当加载至接近预估峰值荷载的80%时则转为位移控制的方式加载,加载速率为 $1.0\ \text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$,直至荷载下降至极限荷载的85%或试件变形很大不宜加载时停止试验^[13],此时的荷载为破坏荷载 F_t ,对应的位移为破坏位移 Δ_f 。

1.3.2 测点布置

在SFRC组合短柱试件的四周均匀布置了4个量程为50 mm的位移传感器,以量测试件的轴向压缩位移,如图3a)所示。应变片的布置示意如图4所示,在型钢左右翼缘和腹板周围粘贴应变片,左右翼缘中部各粘贴2个应变片,距离底部100 mm处各粘贴1个应变片,腹板一侧中部粘贴2个应变片,总计8个应变片用来记录组合柱

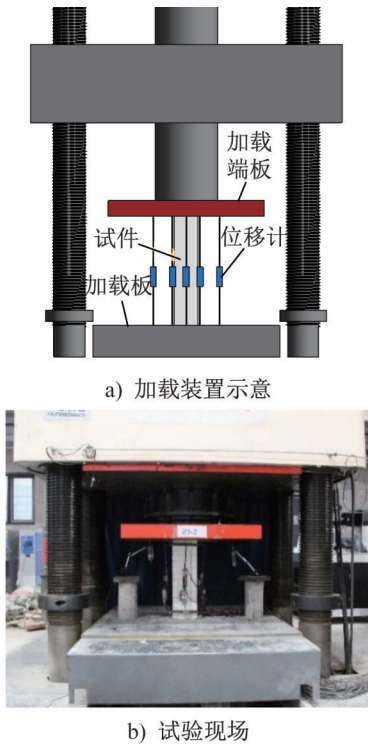


图3 试验装置
Fig. 3 Test setup

内部型钢的应变状态。在组合柱混凝土表面四周的中部粘贴4个应变片,用来观测组合柱混凝土的应变变化,试验时数据观测由导线连接到静态应变测试系统进行观测。

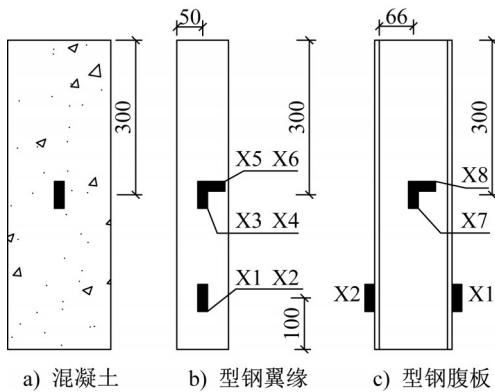


图4 应变片布置(单位:mm)
Fig. 4 Strain gauge arrangement (unit:mm)

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程

对于纯钢试件SC,加载初期无明显现象,处于弹性阶段,当加载达到500 kN时试件中部发生轻微屈曲并伴有响声,在加载接近极限荷载时试件翼缘屈曲变形明显;随着荷载不断增加,试件在400 mm高度处翼缘持续向内屈曲,试件在东南西北四面的最终破坏形态如5所示,呈

现出较为明显的屈曲变形。

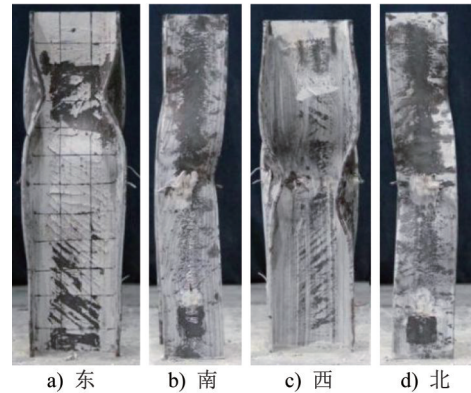


图5 试件组SC破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimen group SC

对于混凝土等级为C30的试件组,试件整体破坏过程较为相似。在加载初期试件处于弹性受力状态,并且均在试件的顶部出现局部受压竖向短裂缝,无其他明显现象。随着荷载的增加,试件初始裂缝的长度和宽度逐渐发展。由于试件组CC-0-30未掺入钢纤维,其混凝土裂缝开展速度快于其他试件组的混凝土裂缝开展速度。试件组CC-1-30的裂缝发展速度慢于试件组CC-0-30和CC-0.5-30的裂缝发展速度,可见钢纤维可有效抑制混凝土裂缝的发展,随着钢纤维体积率的提高,试件中混凝土的损伤破坏减缓。随着荷载的增加,试件混凝土保护层的局部与型钢逐渐出现黏结破坏,呈现起皮现象如图6a)所示。随着荷载增加,试件的混凝土裂缝逐渐发展,并出现较多的竖向裂缝。当荷载加载至接近峰值荷载时,试件顶部混凝土剥落。且达到峰值荷载过后试件的承载力下降,混凝土保护层不断起皮剥落,端部受压区混凝土被压碎,柱身竖向裂缝贯通并破坏。试验结束后,敲开组合柱混凝土,发现混凝土之间有钢纤维的拉结现象如图6b)所示,证明钢纤维有助于抑制裂缝的形成和延展。内置型钢并未发生明显屈曲,说明钢纤维再生混凝土可改善轻钢的稳定性能。混凝土等级为C30的试件组破坏形态如图7~9所示。

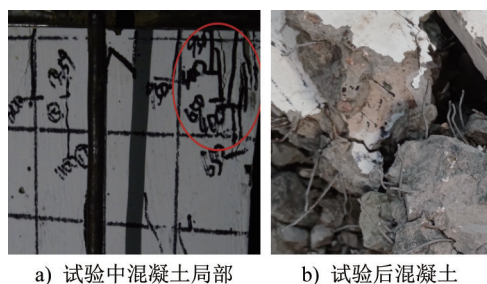
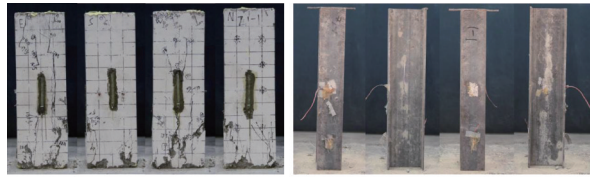


图6 混凝土局部破坏形态

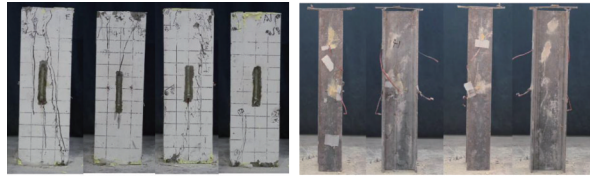
Fig. 6 Local failure modes of concrete



a) 组合柱 b) 内部型钢

图7 试件组 CC-1-30 破坏形态

Fig. 7 Failure modes of specimen group CC-1-30



a) 组合柱 b) 内部型钢

图8 试件组 CC-0.5-30 破坏形态

Fig. 8 Failure modes of specimen group CC-0.5-30



a) 组合柱 b) 内部型钢

图9 试件组 CC-0-30 破坏形态

Fig. 9 Failure modes of specimen group CC-0-30

对于混凝土等级为 C50 的试件组,加载初期试件首先在柱顶出现局部受压短裂缝,随着荷载的提高,裂缝数量不断增加,且主要集中在试件中上部,裂缝随着荷载的增加不断向竖向延伸。当荷载临近峰值时,试件中部会出现较为密集的长裂缝。当荷载达到峰值荷载后,试件的混凝土保护层出现剥落现象。试件组 CC-1-50 最终破坏图如图 10 所示。C30 组保护层出现起皮剥落现象时的承载力为极限荷载的 88.86%,而 C50 组剥落现象出现时承载力为极限承载力的 90.52%,因此组合柱试件由于混凝土强度的提高,混凝土裂缝损伤破坏程度得到改善。不同于混凝土等级为 C30 的试件组,混凝土等级为 C50 的试件组最终破坏形态并未出现明显的竖向贯通裂缝。



a) 组合柱 b) 内部型钢

图10 试件组 CC-1-50 破坏形态

Fig. 10 Failure modes of specimen group CC-1-50

综合所有试件破坏形态可以发现,改变 SFRC 组合短柱的构造可以有效改善轻钢柱的受压稳定性能。组合柱中的钢纤维有助于延缓裂缝的形成和发展。在混凝土受压横向膨胀变形中,钢纤维起到了约束裂缝发展的作用,从而提高了试件的承载力。随着混凝土强度的提高,有效地改善了混凝土裂缝损伤破坏过程,并提高了试件的承载力。

2.2 荷载-位移关系

将每个试验组所测的荷载和位移进行均值处理,并绘制 SFRC 组合短柱试件的荷载-位移曲线,如图 11 所示。由于试件中再生混凝土的约束作用,轻钢柱的稳定性能得到改善,钢纤维再生混凝土与轻钢柱协同受力,显著提高了轻钢柱试件组 SC 的承载力和刚度。

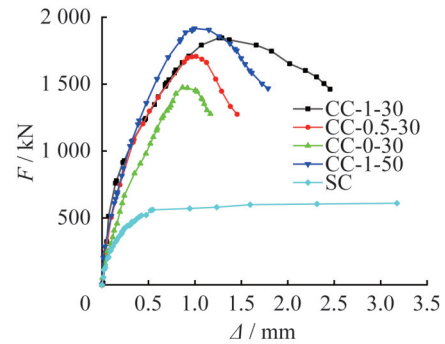


图11 各试件组荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of specimen groups

由于钢纤维可以延缓混凝土裂缝的发展,改善混凝土性能。对于掺入钢纤维的试件组 CC-1-30 和 CC-0.5-30,其承载力和刚度都优于未掺入钢纤维的试件组 CC-0-30 的承载力和刚度。试件组 CC-1-30 和 CC-0.5-30 的初始刚度较为接近,但由于试件组 CC-1-30 的钢纤维掺量高于试件组 CC-0.5-30 的钢纤维掺量,因此试件组 CC-1-30 试件对于混凝土破坏裂缝的发展控制得更好,试件组 CC-1-30 最终的承载力高于试件组 CC-0.5-30 最终的承载力,并且试件组 CC-1-30 在极限荷载的下降段斜率比试件组 CC-0.5-30 和 CC-0-30 的下降段斜率更为平缓,说明钢纤维体积率的增加可以更好控制混凝土的损伤发展,从而提高 SFRC 组合短柱的延性。

对比试件组 CC-1-30 和 CC-1-50 的荷载-位移曲线,随着再生混凝土强度的增加,试件组 CC-1-50 的初始刚度大于试件组 CC-1-30 的初始刚度,但试件组 CC-1-30 试件的下降段比试件组 CC-1-50 试件的下降段更为平缓。

2.3 承载力和延性

将试验所得到的每组试验特征值进行均值处理并对

比分析,如表4所示,表中 F_u 为试件的峰值荷载;相对值 β 为其他试件组峰值荷载与试件组CC-0-30峰值荷载的比值; F_c 为试件的屈服荷载; Δ_c 为屈服荷载所对应的屈服位移; Δ_f 为破坏荷载所对应的破坏位移; μ 为延性系数,用以

分析试件的变形能力,计算如式(1)所示。由于SC试件组没有严格的破坏位移,因此不做延性分析。

$$\mu = \frac{\Delta_f}{\Delta_c} \quad (1)$$

表4 试验特征值分析

Table 4 Characteristic value analysis of experiments

试件组编号	F_u/kN	β	F_c/kN	Δ_c/mm	Δ_f/mm	μ
SC	644	0.43	—	—	—	—
CC-0-30	1 494	1.00	1 235	0.820	1.42	1.73
CC-0.5-30	1 707	1.14	1 644	0.630	1.29	2.05
CC-1-30	1 844	1.23	1 647	0.895	2.19	2.44
CC-1-50	1 952	1.31	1 835	0.850	1.56	1.84

分析表4可知,钢纤维再生混凝土可以有效约束轻钢柱,并显著提高轻钢柱的承载力,组合柱试件组CC-0-30、CC-0.5-30、CC-1-30、CC-1-50的承载力分别是轻钢柱试件组SC承载力的2.32、2.65、2.86和3.03倍。

对于组合柱试件,钢纤维体积率的增加可延缓再生混凝土裂缝的发展,提高组合柱的承载力,试件组CC-0.5-30和CC-1-30的极限承载力分别是试件组CC-0-30对应值的1.14和1.23倍。组合柱的延性也会随着钢纤维体积率的增加而提高,试件组CC-0.5-30和CC-1-30的延性系数分别是试件组CC-0-30延性系数的1.18和1.41倍。

随着再生混凝土强度的提高,可延缓混凝土内部的微裂缝发展,并且提高组合柱的极限承载力,试件组CC-1-50的极限承载力是试件组CC-1-30极限承载力的1.06倍。但随着再生混凝土强度的提高,组合柱混凝土的破坏形式由裂缝开展破坏向骨料破坏转变,因此组合柱的延性会相应降低,试件组CC-1-50的延性系数是试件组CC-1-30对应值的0.75倍。

2.4 刚度退化

SFRC组合短柱的轴向变形刚度是描述试件抵抗变形能力的重要指标。在轴力加载过程中组合试件的荷载-位移曲线分为弹性阶段和弹塑性阶段,试件的刚度会因试件损伤而经历刚度退化过程。对每组试件刚度进行均值处理,刚度退化曲线如图12所示,图中以试件组的刚度退化系数 K_i/K_e 为纵向坐标,其中 K_e 为弹性阶段的初始刚度,以 Δ_i/Δ_c 为横坐标,其中 Δ_c 为屈服位移。图12中弹性阶段的相对弹性刚度为1,对试件的全过程刚度归一化处理,得到刚度退化曲线。各试件的割线刚度计算如式(2)所示。

$$K_i = F_i / \Delta_i \quad (2)$$

式中: K_i 为第 i 加载级试件刚度; F_i 为第 i 加载级试件荷载值; Δ_i 为第 i 加载级试件竖向位移。

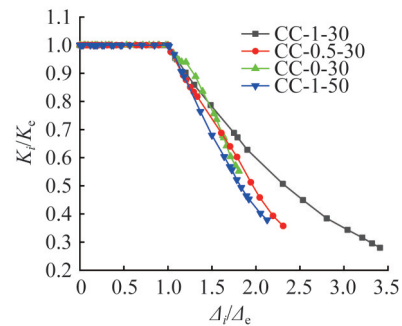


图12 各试件组刚度退化分析

Fig. 12 Rigidity degradation analysis of specimen groups

分析图12可知,SFRC组合短柱试件的刚度退化趋势相似。随着钢纤维体积率的增加,混凝土裂缝的发展延缓且损伤得到了改善,相比于其他试件组,试件组CC-1-30的刚度退化较为缓慢。试件组CC-1-50的再生混凝土强度高,但延性较差,刚度退化速率也较快。

2.5 荷载-应变关系

2.5.1 混凝土荷载-应变分析

对SFRC组合短柱试件的混凝土和型钢二者的应变进行分析。每组试件应变值进行均值处理,其中各试件混凝土应变分析值为组合柱中部4个纵向应变值的平均值,组合柱混凝土的荷载-应变曲线如图13所示,其中纵轴为试验荷载值,横轴为应变值,应变受拉为正,受压为负。

由图11组合柱的荷载-位移曲线可知,组合柱宏观应变约为 1.6×10^{-3} 。由图13可知当组合柱荷载为最大峰值荷载时,混凝土应变约为 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$,混

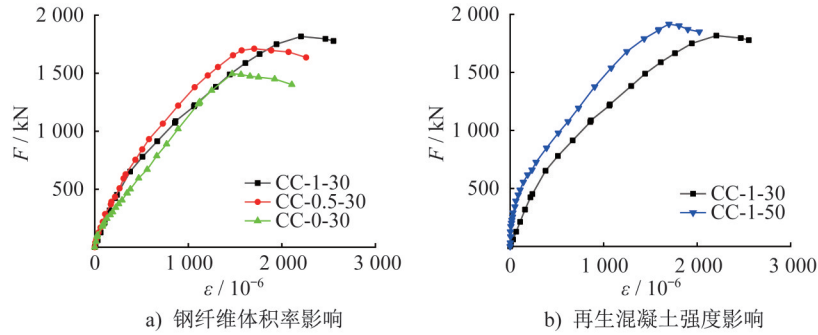


图13 组合柱中混凝土荷载-应变曲线

Fig. 13 Load-strain curves of concrete in composite column

混凝土应变值与组合柱宏观应变值相近。参考高丹盈等^[14]提出的钢纤维再生混凝土峰值应变公式,对组合柱钢纤维再生混凝土的峰值应变进行计算,如式(3)所示。

$$\epsilon_{frc}/\epsilon_c = 1 - 0.1099\delta_R + 0.1054\lambda_f \quad (3)$$

式中: ϵ_{frc} 为钢纤维再生混凝土峰值应变; ϵ_c 为普通混凝土峰值应变; δ_R 为再生混凝土取代率; λ_f 为钢纤维特征参数,其中 $\lambda_f = \rho_f(l_d/d_f)$, ρ_f 为钢纤维体积率, l_d/d_f 为钢纤维长径比。

根据式(3)计算本试验组合柱钢纤维再生混凝土的峰值应变为 $1.541 \times 10^{-3} \sim 1.804 \times 10^{-3}$,该计算值与组合

柱宏观应变值和混凝土应变值相近,考虑到混凝土离散性问题,可认为当组合柱的荷载达到极限荷载时,混凝土的应变达到极限压应变。

2.5.2 型钢荷载-应变分析

对SFRC组合短柱试件的型钢翼缘中部应变进行分析,每组试件应变进行均值处理,组合柱型钢的荷载-应变曲线如图14所示,其中X3和X4为型钢两侧翼缘纵向应变分析位置;X5和X6为型钢两侧翼缘横向应变分析位置。

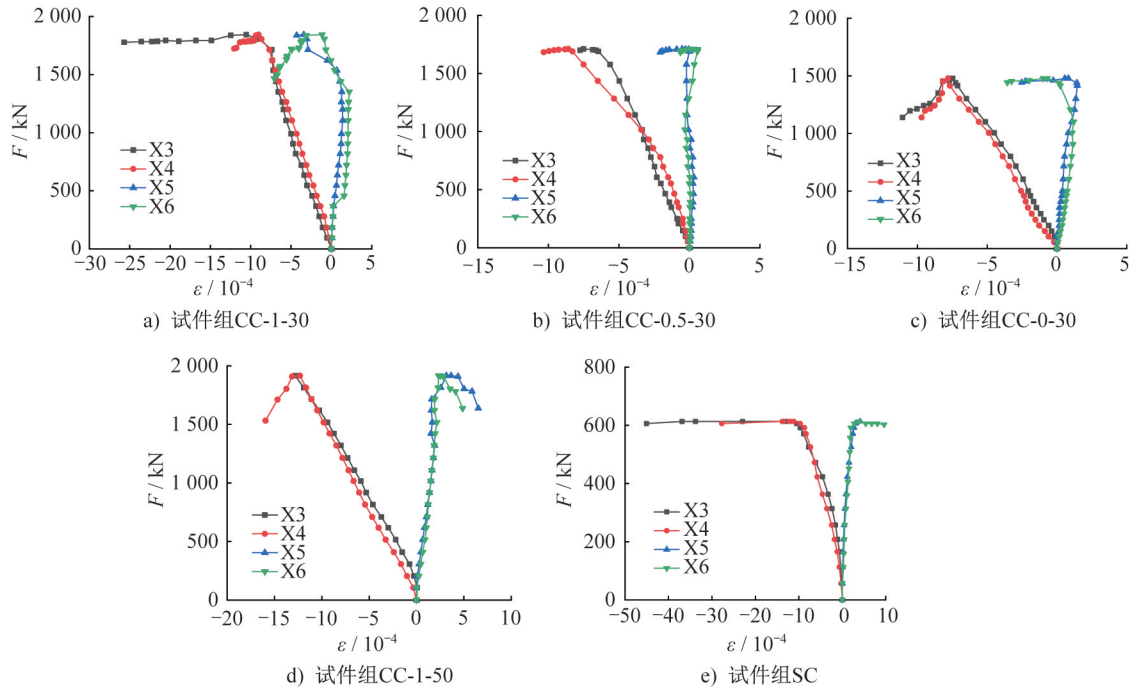


图14 组合柱中型钢荷载-应变曲线

Fig. 14 Load-strain curves of steel in composite column

通过钢材实测数据可知,型钢屈服应变约为 1.265×10^{-3} 。由图14a)~d)可知,组合柱荷载-应变曲线的形状基本相似。翼缘横向应变由于混凝土的约束作用,增长速度较慢,应变值较小。翼缘纵向应变随着竖向荷载的增加,应变值增长较快。当达到峰值荷载时,试件组CC-

0-30和CC-0.5-30的型钢纵向应变约为 $0.8 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3}$,试件组CC-1-30和CC-1-50的型钢纵向应变约为 $1.23 \times 10^{-3} \sim 1.30 \times 10^{-3}$ 。随着钢纤维体积率和混凝土强度的增加,混凝土受力性能得到了提高,同时型钢与钢纤维再生混凝土之间的协同工作性能得到提高,型钢达

到屈服强度。由图 14e)可知,轻钢柱试件组 SC 的承载力远小于组合柱的承载力,当达到峰值荷载后荷载-应变曲线存在平稳段,具有一定的承载变形能力。因此,组合柱构件完全破坏后,组合柱中的型钢应变接近屈服应变且型钢并未出现屈曲破坏现象,可在一定变形下继续承载,拥有一定的安全储备。

3 承载力分析

根据试验破坏现象和应变分析可知,SFRC 组合短柱的抗压承载力是由钢纤维再生混凝土和轻钢柱共同承担的。试件整体没有出现明显的压曲现象,钢纤维再生混凝土与型钢之间可假定为无相对滑移,组合短柱的轴压承载力可视为型钢部分轴压承载力和钢纤维再生混凝土部分轴压承载力两部分相互叠加的结果^[15]。参考《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[16]中型钢混凝土柱轴心受压承载力计算公式,结合当组合短柱的荷载达到峰值荷载时钢纤维再生混凝土和型钢的受力状态,提出了 SFRC 组合短柱受压承载力的计算公式如下:

$$N = f_{\text{irc}} A_{\text{irc}} + f_y A_s \quad (4)$$

式中: N 为组合短柱抗压承载力; f_{irc} 为钢纤维再生混凝土轴心抗压强度; A_{irc} 为钢纤维再生混凝土净截面面积; f_y 为型钢屈服强度; A_s 为纵向受压型钢截面面积。

本文中组合柱的长细比 $l_0/i \approx 10$,其中 l_0 为构件长度, i 为截面最小回转半径。根据《组合结构设计规范》(JGJ 138—2016)^[16],当 $l_0/i \leq 28$ 时,型钢组合柱轴心受压的稳定系数 $\varphi = 1$,因此式(4)未考虑此类情况的稳定系数 φ 。根据上文中应变分析可知当组合柱荷载达到极限荷载,钢纤维再生混凝土的应变达到峰值应变,因此钢纤维再生混凝土的轴心抗压强度采用材料试验中实测值,计算承载力与试验值的对比结果如表 5 所示。

表 5 承载力计算值与试验值对比

Table 5 Comparison between calculated and experimental results of bearing capacities

试件组编号	f_{irc} 实测值/ MPa	计算值/ kN	试验值/ kN	相对误差/%
CC-0.5-30	30.11	1 871.73	1 707	9.65
CC-1-30	31.33	1 917.20	1 844	3.97
CC-1-50	40.60	2 262.74	1 952	15.92
平均误差				9.85

表 5 中计算值与试验值的相对误差较小,相对误差平均值为 9.85%,验证了 SFRC 组合短柱受压承载力计算公式的合理性,因此可用于组合短柱受压承载力的计算。

4 结论

课题组提出了一种 SFRC 组合柱构件,该组合柱构造简单,易于施工和运输。为研究截面构造、钢纤维体积率以及再生混凝土强度对组合柱轴压性能的影响,对 5 组组合柱试件进行了轴压性能试验。分析了试件的破坏形态、荷载-位移曲线、荷载-应力曲线、刚度退化以及延性系数等内容,主要结论如下:

(1) SFRC 组合短柱的构造形式,可改善轻钢柱受压失稳,钢纤维再生混凝土与轻钢柱协同工作,能显著提高轻钢柱的承载力和刚度。组合柱试件组 CC-0-30、CC-0.5-30、CC-1-30、CC-1-50 的承载力分别是轻钢柱试件组 SC 承载力的 2.32、2.65、2.86 和 3.03 倍。掺入适量的钢纤维能有效地延缓再生混凝土裂缝的发展,提高了试件的承载力和刚度。

(2) 组合柱的极限承载力随钢纤维体积率和再生混凝土强度的增加而升高。试件组 CC-0.5-30 和 CC-1-30 的极限承载力分别是试件组 CC-0-30 对应值的 1.14 和 1.23 倍。试件组 CC-1-50 的极限承载力是试件组 CC-1-30 对应值的 1.06 倍。

(3) 钢纤维体积率的增加可改善组合柱损伤退化现象,提高组合柱试件的延性,试件组 CC-0.5-30 和 CC-1-30 的延性系数分别是试件组 CC-0-30 对应值的 1.18 和 1.41 倍。再生混凝土强度的增加可使组合柱混凝土破坏的形式由裂缝开展破坏向粗骨料压碎破坏转变,并且延性也会相应降低,试件组 CC-1-50 的延性系数是试件组 CC-1-30 对应值的 0.75 倍。

(4) 参考规范公式,建立了适用于 SFRC 组合短柱受压承载力计算公式,且计算值与试验值的相对误差较小,可用于该组合短柱受压承载力的计算。

(5) 本文进行了 SFRC 组合短柱受压性能研究,后续研究中可深入对组合柱的截面尺寸、长柱稳定性能、偏压性能等内容进行研究,进一步完善 SFRC 组合柱的受压性能理论。

参考文献:

- [1] 陈小飞,马玉宏.村镇建筑基于性态的抗震设防标准研究[J].土木工程学报,2012,45(增刊1):307-311.DOI:10.15951/j.tmgxcb.2012.s1.052.
CHEN Xiaofei, MA Yuhong. Research on performance-based seismic design criteria for rural buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (Suppl. 1): 307-311. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2012.s1.052. (in Chinese)
- [2] 李天,晁进涛.中原地区村镇住宅房屋抗震性能状况调查及分析[J].自然灾害学报,2013,22(2):172-176.DOI:10.13577/j.jnd.2013.0224.
LI Tian, CHAO Jintao. Investigation and analysis of

- earthquake resistance capability of rural houses in Central China Plain region [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(2):172-176. DOI: 10.13577/j.jnd.2013.0224. (in Chinese)
- [3] 陈志华,孙克肇,周婷,等.装配式村镇住宅轻钢框架结构设计与研究[J]. *钢结构(中英文)*, 2023, 38(9):28-36. DOI: 10.13206/j.gjgS22062102.
CHEN Zhihua, SUN Kezhao, ZHOU Ting, et al. Research on Light Steel Frame Structure of Prefabricated Rural Houses[J]. *Steel Construction(Chinese & English)*, 2023, 38(9):28-36. DOI: 10.13206/j.gjgS22062102. (in Chinese)
- [4] 曹万林,杨兆源,周绪红,等.装配式轻钢组合结构研究现状与发展[J]. *建筑钢结构进展*, 2021, 23(12):1-15. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.001.
CAO Wanlin, YANG Zhaoyuan, ZHOU Xuhong, et al. Research and development on prefabricated lightweight steel composite structures [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2021, 23(12):1-15. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.001. (in Chinese)
- [5] BUACHART C, HANSAPINYO C, UEATRONGCHIT N. Analysis of square concrete-filled cold-formed steel tubular columns under axial cyclic loading [J]. *International Journal of Geomate*, 2018, 15 (47) : 74-80. DOI: 10.21660/2018.47.STR113.
- [6] RAHNAVARD R, CRAVEIRO H D, SIMOES R A, et al. Buckling resistance of concrete-filled cold-formed steel (CF-CFS) built-up short columns under compression [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 170: 108638. DOI: DOI10.1016/j.tws.2021.108638.
- [7] 陶忠,王志滨,韩林海.矩形冷弯型钢钢管混凝土柱的力学性能研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(3):147-155, 176. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.03.025.
TAO Zhong, WANG Zhibin, HAN Linhai. Behavior of rectangular cold-formed steel tubular columns filled with concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23 (3) : 147-155, 176. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4750.2006.03.025. (in Chinese)
- [8] 王莉萍,安亚楠,丁发兴.冷弯薄壁钢管混凝土柱轴压性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(增刊2):228-237. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.S2.0027.
WANG Liping, AN Yanan, DING Faxing. Study on axial compression behavior of thin-walled cold-formed concrete-filled steel tubular columns[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42 (Suppl. 2) : 228-237. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2021. S2.0027. (in Chinese)
- [9] 刘亦斌,曹万林,邢锋,等.型钢再生混凝土梁受弯性能足尺试验[J]. *建筑结构*, 2023, 53(9):108-114. DOI: 10.19701/j.jzjg.20222733.
LIU Yibin, CAO Wanlin, XING Feng, et al. Full-scale experimental study on flexural behavior of steel reinforced recycled concrete beam [J]. *Building Structure*, 2023, 53(9) : 108-114. DOI: 10.19701/j. jzjg.20222733. (in Chinese)
- [10] 边瑾靓,曹万林,李浩,等.装配式轻型钢管混凝土框架-不同构造内藏钢板组合墙结构抗震试验[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(10):35-44. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0735.
BIAN Jinliang, CAO Wanlin, LI Hao, et al. Experimental study on seismic performance of assembly structure of lightweight CFST frame-embedded steel plate composite wall with different constructions [J]. *Journal of Building Structure*, 2021, 42(10) : 35-44. DOI: 10.14006/j. jzjgxb.2019.0735. (in Chinese)
- [11] 伍凯,徐超,曹平周,等.型钢-钢纤维混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(9):41-52. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2019.09.004.
WU Kai, XU Chao, CAO Pingzhou, et al. Experimental study on the flexural behavior of profile steel-steel fiber reinforced concrete composite beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(9) : 41-52. DOI: 10.15951/j. tmgxcb.2019.09.004. (in Chinese)
- [12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
State Administration of Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [13] YANG Z Y, QIAO Q Y, CAO W L, et al. Axial compressive behavior of square steel tube confined rubberized concrete stub columns [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022. DOI: 10.1016/j.job.2022.104371.
- [14] 高丹盈,朱倩,刘杰.单轴受压下钢纤维再生骨料混凝土本构模型[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(2):396-406. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.02.014.
GAO Danying, ZHU Qian, LIU Jie. Constitutive model of SFRCAC under uniaxial compression [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28 (2) : 396-406. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.02.014. (in Chinese)
- [15] 李坤.内埋型钢空间钢构架混凝土轴压短柱受力性能试验研究[D].苏州:苏州科技大学,2018.
LI Kun. Experimental study on axial bearing behavior of spatial steel frame concrete columns embedded with steel [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Code for Design of Composite Structures: JGJ 138—2016* [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)