

内置 CFRP 管的钢管再生混凝土 短柱轴压性能研究

许伟,李亚静,张海霞

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究不同截面形式下,内置 CFRP 管的钢管再生混凝土短柱力学性能。
方法 利用有限元软件建立试件模型,验证模型的正确性,在此基础上,建立组合短柱模型,分析 CFRP 层数、钢管厚度、再生骨料取代率对不同截面形式下组合柱力学性能的影响。
结果 增加 CFRP 层数和钢管厚度可以提高组合短柱的极限承载力和位移延性系数;改变再生骨料取代率,对组合短柱力学性能的影响较小;改变截面形式,圆截面短柱的力学性能优于方截面短柱。
结论 在工程设计中,使用该组合短柱时建议组合柱内置两层 CFRP,截面形式建议优先考虑圆截面;若需提高组合柱承载力,建议采用增加钢管厚度的方式。

关键词 外截面形式;CFRP 层数;钢管厚度;再生骨料取代率

中图分类号 TU398.9

文献标志码 A

引用格式:许伟,李亚静,张海霞. 内置 CFRP 管的钢管再生混凝土短柱轴压性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 830-838. (XU Wei, LI Yajing, ZHANG Haixia. Experimental study on axial compression behavior of recycled concrete filled steel tubular short columns with CFRP tubes [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(5): 830-838.)

Experimental Study on Axial Compression Behavior of Recycled Concrete Filled Steel Tubular Short Columns with CFRP Tubes

XU Wei, LI Yajing, ZHANG Haixia

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The work aims to study the mechanical properties of recycled concrete filled steel tubular short columns with built-in CFRP tubes under different cross-section forms. The finite element software was used to establish the specimen model to verify the correctness of the model. On this basis, the composite short column model was established to analyze the effects of CFRP layer number, steel tube thickness and recycled aggregate replacement rate on the mechanical properties of composite columns under different cross-section forms. The results show that increasing the number of CFRP layers and the

收稿日期:2023-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52278196)

作者简介:许伟(1971—),女,教授,博士,主要从事组合结构等方面研究。

thickness of steel tube can improve the ultimate bearing capacity and displacement ductility coefficient of composite short columns. Changing the replacement rate of recycled aggregate has little effect on the mechanical properties of composite short columns. By changing the section form, the mechanical properties of circular section short columns are better than those of square section short columns. In engineering design, it is suggested that two layers of CFRP should be built in the composite column when using the composite short column, and the circular section should be given priority to in the section form. If it is necessary to improve the bearing capacity of the composite column, it is recommended to increase the thickness of the steel tube.

Key words: external section form; the number of CFRP layers; recycled aggregate replacement rate; steel tube thickness

近年来,钢管混凝土柱在建筑工程领域被广泛应用。该结构具有承载力高、塑性和耐久性好等优点,在高层和超高层建筑以及钢管混凝土拱桥的建设中都有应用^[1-3]。为满足可持续发展理念,再生混凝土技术应运而生^[4],将再生混凝土和钢管结合在一起使用,形成钢管再生混凝土组合短柱^[5-6]。外部钢管对内部再生混凝土有一定约束作用,可以改善再生混凝土力学性能上的不足^[7-8],钢管和再生混凝土的相互作用还可以避免钢管的早期屈服^[9]。

随着纤维增强复合材料(FRP)普及,国内外学者将其应用到钢管混凝土组合短柱中,并对其进行研究分析。P. Feng 等^[10-11]将 FRP 管内置于钢管混凝土柱中,分析了 FRP 对柱子力学性能的影响,结果表明,FRP 可以为核心混凝土提供约束,提高组合柱的极限承载力和位移延性系数。Y. L. Long 等^[12]的研究表明,FRP 断裂之后仍可以对组合短柱提供一定的约束力。蔡琼瑶^[13]对内置玻璃纤维增强复合材料(GFRP)管的钢管混凝土组合柱的力学性能进行研究,结果表明,GFRP 管径比对组合柱的极限承载力和延性都有影响。李幅昌等^[14]对内置碳纤维增强复合材料(CFRP)圆管的方钢管高强混凝土轴压短柱进行试验研究,结果表明,CFRP 的加入可以改善方钢管的角部应力集中现象,提高组合柱的承载力和延性。刘耀明^[15]对内置 FRP 管的方钢管再生混凝土柱

的力学性能进行研究,结果表明,增加内置 FRP 管厚度,组合柱的极限承载力随之提高。

目前,国内外学者对内置 FRP 管的钢管再生混凝土柱的研究主要集中在普通混凝土、高强混凝土中,对再生混凝土的研究较少,且研究的截面形式较为单一。基于此,笔者针对不同截面形式下内置 CFRP 管的钢管再生混凝土短柱进行模拟研究,分析 CFRP 层数、钢管厚度以及再生骨料取代率对组合柱力学性能的影响,以期为该组合柱的设计和工程应用提供参考。

1 有限元验证

1.1 试件概况

笔者对崔海瑞^[16]所研究的内置 FRP 管的圆钢管再生混凝土短柱进行有限元验证。笔者选取3个试件进行对比分析,试件编号分别为 T8-R0%-C2、T8-R50%-C2、T8-R100%-C2,其中 T 表示钢管厚度, R 表示再生骨料取代率, C 表示 CFRP 层数。组合柱高度均为 785 mm,钢管外径为 275 mm,钢管强度为 Q345,内置 CFRP 管直径为 200 mm,再生混凝土强度分别为 51.19 MPa、47.76 MPa、43.98 MPa。

1.2 材料本构关系

再生混凝土本构模型采用杨有福^[17]所提出的塑性损伤模型,钢材的本构采用二次塑流模型^[18-19]。碳纤维布(CFRP)选用文献[20]中的 CFRP 本构关系。

1.3 单元选取和网格划分

核心混凝土、夹层混凝土、上下端板均采用

C3D8R 实体单元,钢管、CFRP 管均采用 S4R 壳单元^[21]。端板的网格尺寸选取20 mm,钢管、夹层混凝土、CFRP 管、核心混凝土沿柱长方向设置 30 个单元,沿周长边设置 24 个单元。

1.4 界面接触关系和边界条件

界面接触关系如图 1 所示。其中钢管和再生混凝土界面法向采用硬接触,界面的切向采用库伦摩擦模型,摩擦系数取 0.6。

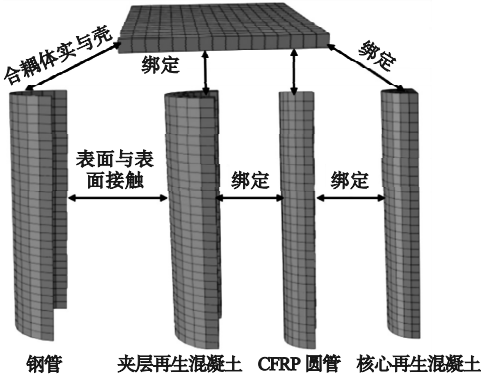


图 1 界面接触关系

Fig. 1 Interface contact relationship

内置 CFRP 管的钢管再生混凝土轴心受压短柱的边界条件设置如下:组合短柱下端端板采用完全固定;上端端板采用位移/转角,设置 U3 方向可以移动,其余方向固定。边界条件如图 2 所示。



图 2 边界条件

Fig. 2 Boundary conditions

1.5 试验与模拟结果对比分析

对比内置 CFRP 管的圆钢管再生混凝土短柱试验和有限元模拟的破坏形态(见图 3),构件中部均出现向外的鼓曲变形,两者的破坏形态相似性较好。

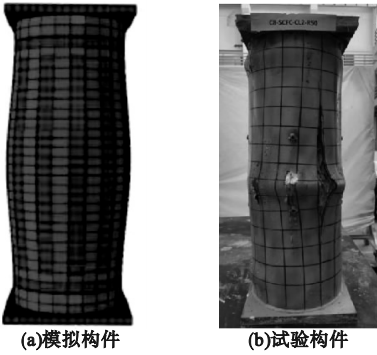


图 3 破坏形态对比

Fig. 3 Damage pattern contrast map

图 4 为不同再生骨料取代率下组合柱的荷载-应变曲线。由图可知,有限元模拟曲线与试验曲线吻合较好。

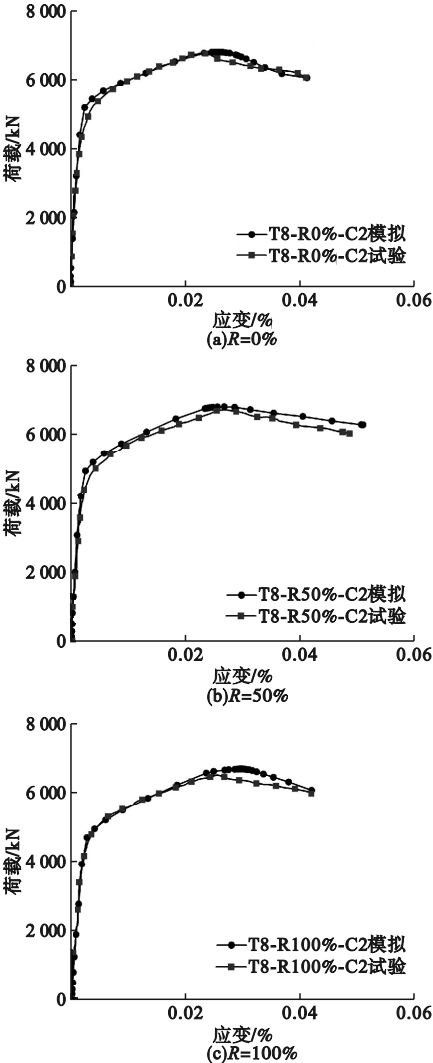


图 4 荷载-应变曲线

Fig. 4 Load strain curves

试件极限承载力的试验值与模拟值结果见表1。

表1 试件极限承载力

Table 1 Ultimate bearing capacity of components			
试件编号	模拟值 N_u^s/kN	试验值 N_u/kN	N_u^s/N_u
T8-R0%-C2	6 778. 22	6 677. 95	1. 015
T8-R50%-C2	6 630. 23	6 500. 29	1. 019
T8-R100%-C2	6 801. 75	6 778. 17	1. 003

通过将模拟结果与试验结果进行对比分析,验证了内置CFRP管的钢管再生混凝土短柱模型的合理性。

2 内置CFRP管的钢管再生混凝土柱力学性能分析

2.1 轴压短柱参数

为了研究不同参数对组合柱力学性能的影响,笔者在控制组合短柱截面面积相同的情况下,共建立了10个内置CFRP管的圆钢管再生混凝土短柱和10个内置CFRP管的方钢管再生混凝土短柱,对其进行轴压模拟。柱高均为750 mm,圆截面组合短柱的钢管外径为250 mm,方截面组合短柱的钢管边长为213.5 mm,CFRP管直径为160 mm,钢管强度选用Q345,再生混凝土强度选用C60,单层CFRP管的厚度为0.167 mm

2.2 有无CFRP组合短柱的力学性能

钢管再生混凝土短柱和内置CFRP管的钢管再生混凝土短柱的荷载-位移曲线如图5所示。

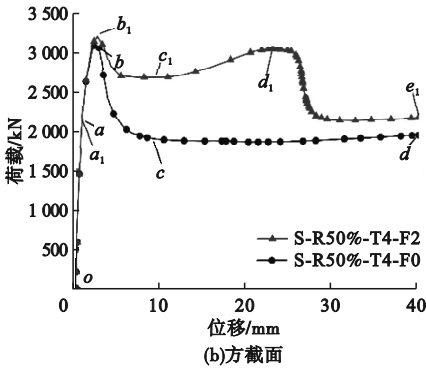
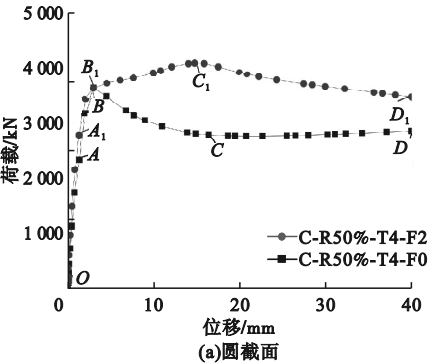


图5 不同截面形式下试件荷载-位移曲线
Fig. 5 Load displacement curves of components under different cross-sectional forms

由图5(a)可知,内置CFRP管的圆钢管再生混凝土柱在轴压荷载作用下的荷载-位移曲线共分为4个阶段:弹性阶段(OA_1 段);组合柱各部件之间均为单独受力,没有相互影响,不产生相互作用力。弹塑性阶段(A_1B_1 段): A_1 点时组合柱各部件开始产生相互作用,夹层再生混凝土内部开始有裂缝产生,该阶段CFRP管的主要作用是为核心再生混凝土提供束力。强化阶段(B_1C_1 段):组合柱的承载力继续增加,外部夹层再生混凝土的裂缝继续增大,直至夹层再生混凝土被压碎,CFRP管达到极限拉应力。破坏阶段(C_1D_1 段): C_1 点时组合柱达到极限承载力,CFRP管开始逐渐出现断裂,组合柱的荷载-位移曲线开始下降,由于CFRP断裂后仍可以为组合柱提供约束力,所以荷载-位移曲线在下降段并没有急剧下降。

由图5(b)可知,内置CFRP管的方钢管再生混凝土柱在轴压荷载作用下荷载-位移曲线共分为5个阶段:弹性阶段(oa_1 段),钢管和核心再生混凝土共承受轴向压力,CFRP管此时不受力。弹塑性阶段(a_1b_1 段),随着位移的增加,再生混凝土开始产生裂缝,CFRP圆管开始承受环向拉应力。下降阶段(b_1c_1 段),试件达到峰值荷载,由于夹层再生混凝土的微裂缝开展迅速,组合柱的承载力迅速下降。强化阶段(c_1d_1 段),此阶段

CFRP 对核心再生混凝土的约束作用增强,组合组的变形较明显。破坏阶段(d_1e_1 段),此阶段 CFRP 发生断裂,但由于钢管对组合柱的约束作用,内置 CFRP 管断裂后试件承载力并没有突然下降。当钢管变形过大时,组合柱的角部开裂,此时承载力会有小幅骤降。

由图 5 可知,方钢管再生混凝土柱和圆钢管再生混凝土柱在轴压荷载作用下的荷载-位移曲线共分为四个阶段,在弹性阶段,钢管和核心再生混凝土各自承担荷载。在弹塑性阶段,方、圆钢管开始屈服,随着荷载的增加,外部钢管对核心再生混凝土的约束增强。在下降阶段,组合柱达到极限荷载,核心再生混凝土被压坏,试件极限承载力降低。在平缓阶段,核心再生混凝土破坏严重,钢管对核心再生混凝土失去约束作用,组合柱破坏。

不同截面形式下组合短柱的极限承载力和位移延性系数见表 2。由表可知,CFRP 的加入可以提高组合柱的极限荷载和延性,对位移延性系数的提高幅度非常显著。

表 2 有无 CFRP 组合短柱的力学性能

Table 2 Mechanical properties of CFRP composite columns with or without CFRP		
试件编号	极限承载力/kN	位移延性系数
C-R50%-T4-F0	3 626.26	3.73
C-R50%-T4-F2	4 075.03	13.81
S-R50%-T4-F0	3 061.09	3.51
S-R50%-T4-F2	3 182.21	12.72

2.3 CFRP 层数的影响

在不同的截面形式下,CFRP 对组合柱力学性能的提高幅度不同,从力学性能与经济效益方面考虑,笔者分别建立 4 个不同内置 CFRP 层数(0~3 层)的组合短柱,分析 CFRP 对组合短柱极限承载力、位移延性系数的影响,结果如图 6 所示。

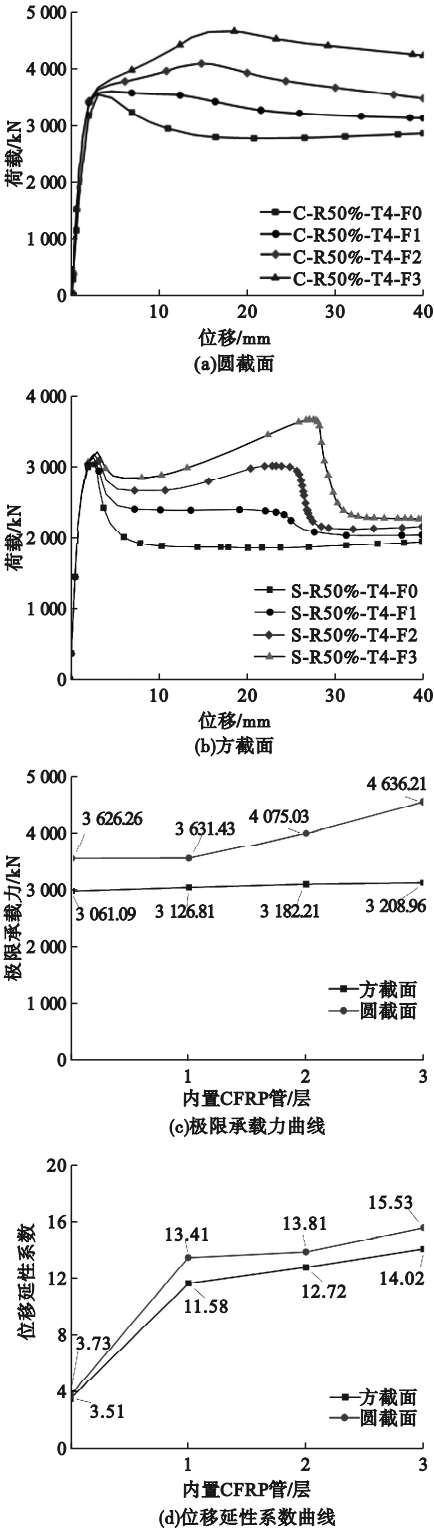


图 6 CFRP 层数对轴压短柱力学性能的影响
Fig. 6 Effect of CFRP layers on mechanical properties of axially compression short columns

由图 6(a)可知,CFRP 层数越多,组合短柱在核心混凝土增强阶段的斜率越大,组合

短柱的极限承载力会随着 CFRP 层数的增加而增大。由图 6(b)可知,随着 CFRP 层数增加,组合短柱的承载力首次下降幅度减小,强化阶段的承载力增大。由图 6(c)可知,与 C-R50%-T4-F0 相比,试件 C-R50%-T4-F1、C-R50%-T4-F2、C-R50%-T4-F3 极限承载力分别提高了 0.14%、12.38%、27.85%;与 S-R50%-T4-F0 相比,试件 S-R50%-T4-F1、S-R50%-T4-F2、S-R50%-T4-F3 极限承载力分别提高了 2.15%、3.96%、19.68%。在轴压作用下,组合短柱的极限承载力会随着 CFRP 层数的增加而提高,这是因为增加 CFRP 的层数可以提高其对核心混凝土的约束力,进而在一定程度上提高了组合短柱的极限承载力。由图 6(d)可知,与 C-R50%-T4-F0 相比,试件 C-R50%-T4-F1、C-R50%-T4-F2、C-R50%-T4-F3 位移延性系数分别提高了 259.52%、270.24%、316.35%;与 S-R50%-T4-F0 相比,试件 S-R50%-T4-F1、S-R50%-T4-F2、S-R50%-T4-F3 位移延性系数分别提高了 229.91%、262.39%、299.43%。加入 CFRP 可以显著提高组合短柱的位移延性系数,但是 CFRP 层数的增加对位移延性系数的影响并不大。综合考虑 CFRP 对极限承载力、位移延性系数的影响和经济效益,建议工程中选用内置两层 CFRP 的组合短柱。由图 6(c)和图 6(d)可知,在相同 CFRP 层数下,圆截面组合短柱的极限承载力和位移延性系数均大于方截面组合短柱;增加 CFRP 层数,圆截面组合短柱的提高幅度均大于方截面组合短柱。这是因为方截面组合短柱在弹塑性阶段后存在承载力下降的阶段,增加 CFRP 层数主要降低了该阶段的下降幅度,对组合短柱极限承载力和位移延性系数的影响较小。

2.4 再生骨料取代率的影响

在不同的截面形式下,笔者分别建立 4 个不同再生骨料取代率(0%、30%、50%、100%)的组合短柱,分析再生骨料取代率对

组合短柱极限承载力、位移延性系数的影响,结果如图 7 所示。

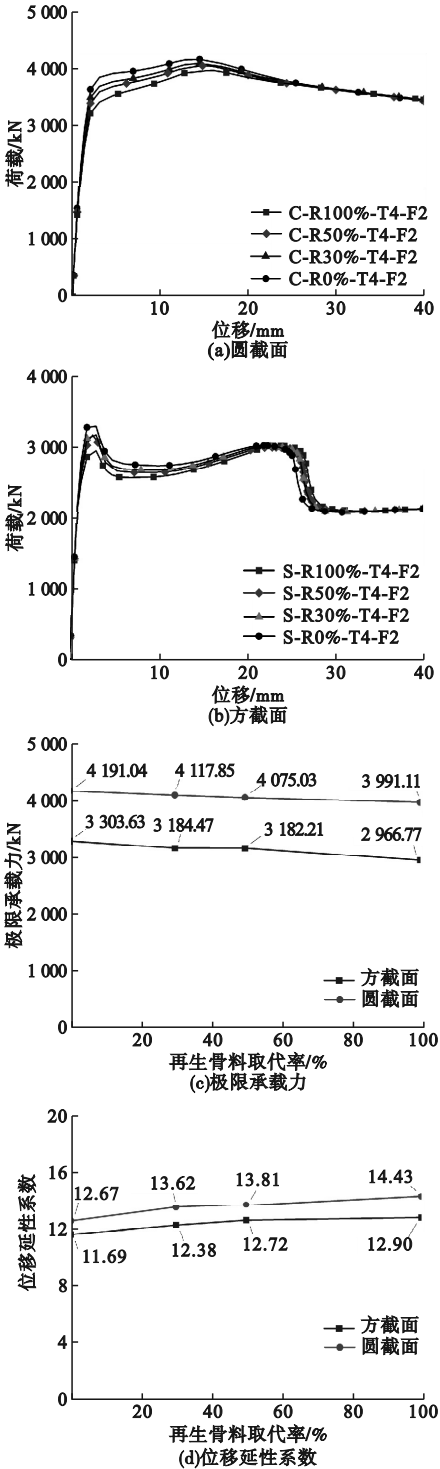


图7 再生骨料取代率对轴压短柱力学性能的影响

Fig. 7 Effect of recycled aggregate replacement rate on mechanical properties of axially compression short columns

由图 7(a)可知,再生骨料取代率越小,组合短柱在核心混凝土增强阶段的斜率越大,极限承载力随着再生骨料取代率的增加而减小。由图 7(b)可知,再生骨料取代率越小,组合短柱的承载力首次下降幅度越小,强化阶段的承载力越大。由图 7(c)可知,与 C-R0%-T4-F2 相比,试件 C-R30%-T4-F2、C-R50%-T4-F2、C-R100%-T4-F2 极限承载力分别降低了 1.78%、2.82%、3.01%;与 S-R0%-T4-F2 相比,试件 S-R30%-T4-F2、S-R50%-T4-F2、S-R100%-T4-F2 极限承载力分别降低了 3.61%、3.68%、10.20%。在轴压作用下,组合短柱的极限承载力会随着再生骨料取代率的增加而降低。由图 7(d)可知,与 C-R0%-T4-F2 相比,试件 C-R30%-T4-F2、C-R50%-T4-F2、C-R100%-T4-F2 位移延性系数分别提高了 7.50%、9.00%、13.89%;与 S-R0%-T4-F2 相比,试件 S-R30%-T4-F2、S-R50%-T4-F2、S-R100%-T4-F2 位移延性系数分别提高了 5.90%、8.81%、10.35%。在轴压作用下,组合短柱的位移延性系数随着再生骨料取代率的增加而增大。由图 7(c)和图 7(d)可知,在同一参数下,圆截面组合短柱的极限承载力和位移延性系数均大于方截面组合短柱;增加再生骨料取代率,圆截面组合短柱的变化幅度均大于方截面组合短柱。这是因为再生骨料取代率越大,再生混凝土内部之间存在空隙和裂缝越多,组合短柱的抗压强度降低,竖向、横向位移增大,方钢管存在角部应力集中的现象,所以方截面的极限承载力和位移延性系数的提高幅度较小。

2.5 钢管厚度的影响

在不同的截面形式下,笔者分别建立 4 个不同钢管厚度(2 mm、3 mm、4 mm、5 mm)的组合短柱,分析钢管厚度对组合短柱极限承载力、位移延性系数的影响,结果如图 8 所示。

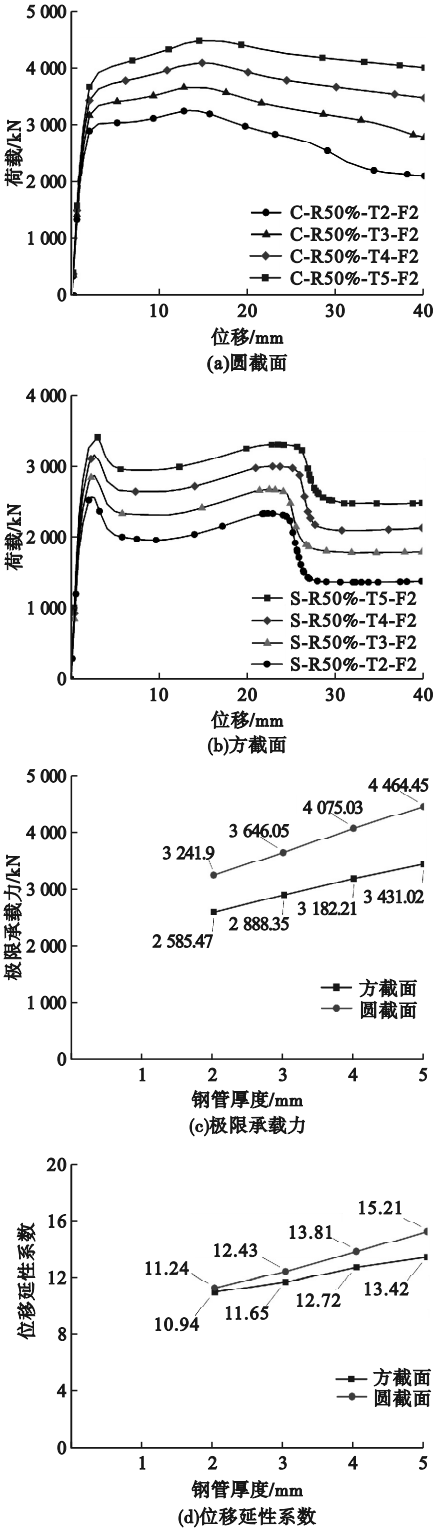


图 8 钢管厚度对轴压短柱力学性能的影响

Fig. 8 Effect of steel tube thickness on mechanical properties of axially compression short columns

由图 8(a)可知,改变钢管的厚度,对组

合短柱弹塑性阶段的影响较大,增加钢管的厚度,组合短柱的极限承载力随之增大。由图 8(b)可知,钢管厚度越大,组合短柱的承载力首次下降幅度越小,强化阶段的承载力越大。由图 8(c)可知,与试件 C-R50%-T2-F2 相比,试件 C-R50%-T4-F2、C-R50%-T4-F2、C-R50%-T5-F2 极限承载力分别增加了 12.47%、25.70%、37.71%;与 S-R50%-T2-F2 相比,试件 S-R50%-T3-F2、S-R50%-T4-F2、S-R50%-T5-F2 极限承载力分别增加了 11.71%、23.08%、32.70%。随着钢管厚度的增大,组合短柱的极限承载力也随之提高,这是因为钢管在组合短柱的整个受力过程中都发挥着很大作用,钢管厚度越大,对组合短柱的侧向约束作用越强,极限承载力的提高幅度也越明显。由图 8(d)可知,与 C-R50%-T4-F2 相比,试件 C-R50%-T4-F3、C-R50%-T4-F2、C-R50%-T5-F2 的位移延性系数分别提高了 10.59%、22.86%、35.32%;与试件 S-R50%-T4-F2 相比,试件 S-R50%-T3-F2、S-R50%-T4-F2、S-R50%-T5-F2 位移延性系数分别提高了 6.49%、16.27%、22.67%。随着钢管厚度的增大,组合短柱的位移延性系数也随之增大,这是因为钢管厚度增加可以提高对内部再生混凝土的约束力,组合短柱的受压性能提高,位移延性系数增加。由图 8(c)和图 8(d)可知,在同一参数下,圆截面组合短柱的极限承载力和位移延性系数均大于方截面组合短柱;增加钢管厚度,圆截面组合短柱的提高幅度均大于方截面组合短柱。这是因为圆钢管对内部再生混凝土的约束力比方钢管更均匀,增加钢管的厚度,圆钢管对内部再生混凝土的约束力增加幅度更大,所以圆截面组合短柱力学性能的提高幅度更明显。

3 结 论

(1) 将 CFRP 内置于钢管再生混凝土中,对轴压作用下组合短柱的极限承载力提

高幅度较小,对位移延性系数的提高幅度较大。在相同截面面积下,改变组合短柱的截面形式,圆截面组合短柱的力学性能优于方截面组合短柱。

(2) 组合短柱的极限承载力、位移延性系数随着 CFRP 层数增加而增大。对于圆截面组合短柱,CFRP 层数的增加能够提高组合短柱核心再生混凝土增强阶段的斜率,降低极限荷载后承载力的下降幅度。对于方截面组合短柱,CFRP 层数的增加可以降低组合短柱承载力首次下降阶段的幅度,提高承载力强化阶段的斜率。

(3) 组合短柱的极限承载力、位移延性系数随着钢管厚度的增加而增大。对于圆截面组合短柱,钢管厚度的增加对组合短柱弹塑性阶段的影响较大;对于方截面组合短柱,钢管厚度的增加可以降低组合短柱承载力首次下降阶段的幅度。

(4) 组合短柱的极限承载力随着再生骨料取代率的增加而减小,位移延性系数随着再生骨料取代率的增加而增大。CFRP 层数对组合柱位移延性系数的影响最大,钢管厚度对组合柱极限承载力的影响最大,再生骨料取代率对组合柱的影响最小。

参考文献

- [1] 鲍丰,艾浩源,李德君,等.基于高层钢管混凝土密实性的主要影响因素和综合应对方案[J].中国建筑金属结构,2023,22(4):42-45.
(BAO Feng, AI Haoyuan, LI Dejun, et al. Main influencing factors and comprehensive countermeasures based on the compactness of high-rise concrete filled steel tube [J]. Chinese building metal structures, 2023, 22(4): 42-45.)
- [2] 黄东明.超高层建筑钢管混凝土柱及环梁施工技术[J].中华建设,2021(9):134-135.
(HUANG Dongming. Construction technology of concrete filled steel tubular column and ring beam in super high-rise building [J]. China construction, 2021(9): 134-135.)
- [3] 秦家豪.公路桥梁钢管混凝土拱桥技术研究[J].运输经理世界,2023(9):90-92.
(QIN Jiahao. Technical study on concrete filled steel tubular arch bridge of highway bridge [J]. Transportation manager world, 2023(9): 90-92.)
- [4] ZHONG X P, JIN W L, XIA J. A time-varying

- model for predicting the life-cycle flexural capacity of reinforced concrete beams [J]. *Advances in structural engineering*, 2015, 18 (1): 21 – 32.
- [5] TANG Y C, LI L J, FENG W X, et al. Study of seismic behavior of recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns [J]. *Journal of constructional steel research*, 2018, 148: 1 – 15.
- [6] SANGEETHA P, SENTHIL R. Experimental behaviour of steel tubular columns for varying in filled concrete [J]. *Archives of civil engineering*, 2017, 63 (4): 149 – 160.
- [7] 马江萍. 圆钢管再生混凝土偏压短柱抗震性能分析[J]. *粉煤灰综合利用*, 2021, 35(3): 1 – 7.
(MA Jiangping. Seismic performance analysis of circular steel tube recycled concrete partial compression short column [J]. *Fly ash comprehensive utilization*, 2021, 35(3): 1 – 7.)
- [8] 王成刚, 张泽阳, 梁恒斌, 等. 方、圆钢管再生混凝土长柱轴压性能试验对比分析[J]. *建筑结构*, 2020, 50(增刊1): 715 – 720.
(WANG Chenggang, ZHANG Zeyang, LIANG Hengbin, et al. Experimental comparative analysis of axial compression performance of recycled concrete filled square and circular steel tubular long columns [J]. *Construction*, 2020, 50(S1): 715 – 720.)
- [9] CAO V. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete-filled steel tubes under axial loading [J]. *International journal of civil engineering*, 2019, 17(8): 1341 – 1351.
- [10] FENG P, CHENG S, BAI Y, et al. Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete core subjected to axial compression [J]. *Composite structures*, 2015, 123: 312 – 324.
- [11] CHENG S, FENG P, BAI Y, et al. Load-strain model for steel-concrete-FRP-concrete columns in axial compression [J]. *Journal of composites for construction*, 2016, 20(5): 04016017.
- [12] LONG Y L, LI W T, DAI J G, et al. Experimental study of concrete-filled CHS stub columns with inner FRP tubes [J]. *Thin-walled structures*, 2018, 122: 606 – 621.
- [13] 蔡兆琼. 内置 GFRP 管的钢管混凝土组合柱的轴压性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
(CAI Zhaoqiong. Research on axial load behavior of CFT columns with inner GFRP tube [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.)
- [14] 李幅昌, 邢娜, 邢忠华. 内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压短柱试验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2009, 25(2): 244 – 249.
(LI Guochang, XING Na, XING Zhonghua. Test of high-strength concrete-filled square steel tubular stub columns with CFRP circular tubes under axial compression [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2009, 25(2): 244 – 249.)
- [15] 刘耀明. 内置 FRP 管的方钢管再生混凝土短柱轴压力学性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
(LIU Yaoming. Experimental study on axial compressive behavior of recycled aggregate concrete filled square steel tubular short columns with inner FRP tube [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.)
- [16] 崔海瑞. 内置 FRP 管的圆钢管再生混凝土组合柱轴压力学性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
(CUI Hairui. Experimental study on axial compressive behavior of recycled concrete filled circular steel tubular columns with FRP tubes [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.)
- [17] 杨有福. 钢管再生混凝土试件荷载 – 变形关系的理论分析[J]. *工业建筑*, 2007(12): 1 – 6.
(YANG Youfu. Theoretical Analysis of load-deformation relationship of recycled concrete filled steel tube [J]. *Industrial building*, 2007 (12): 1 – 6.)
- [18] 方映平. 圆钢管再生混凝土偏压短柱及轴压长柱受力性能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
(FANG Yingping. Research on eccentric compressive short columns and axial compressive long columns with recycled aggregate filled circular steel tube [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.)
- [19] 石起振. 内置 GFRP 管圆钢管混凝土组合柱力学性能有限元分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
(SHI Qizhen. Finite element analysis of mechanical property of concrete filled circular steel tube composite columns with inner GFRP tube [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.)
- [20] 宋国强. CFRP 约束薄壁钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.
(SONG Guoqiang. Experimental study on axially compressive behavior of CFRP confined concrete-filled thin-walled steel tube short column [D]. Yantai: Yantai University, 2022.)
- [21] 李竹岩. SCCC 组合柱轴压力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
(LI Zhuyan. Research on mechanical behavior of SCCC columns under axial compressive load [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [22] 郎类, 杨志坚, 李泽良. 内置 CFRP 管的方钢管混凝土轴压短柱失效分析及延性优化[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(4): 22 – 27.
(LANG Yan, YANG Zhijian, LI Zeliang. Failure analysis and ductility optimization of concrete-filled square axial compression short column with built-in CFRP tube [J]. *Civil architectural and environmental engineering*, 2014, 36(4): 22 – 27.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)