DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.023

不锈钢管组合短柱轴压承载能力试验研究

黄波[1],张亮[2],翟江棚[3]

(1.河海大学设计研究院有限公司,江苏 南京 210024;2.俊发集团有限公司,云南 昆明 650051;
3.启迪设计集团股份有限公司,江苏 苏州 215021)

摘要:通过对18个试件的轴压试验,该文深入探讨了方形与圆形截面不锈钢管与钢纤维增强再生混凝土组合柱的轴压性能。试验重点观察了破坏形态、承载力及变形能力等关键性能指标,并系统分析了截面形状、钢纤维掺量及再生骨料替代率等因素对承载力和变形的影响。结果显示:屈服荷载与峰值荷载的差异较小,但对应的变形差异较大,说明屈服后的塑性特征明显,承载力增长有限,而变形增长明显,直至达到峰值荷载;钢纤维掺量在0~2%范围内,其用量的增加可稳步提升组合短柱的承载力;无论方形截面或圆形截面,钢纤维的增强效果对强度更低的再生骨料更有效;随着再生骨料替代率的提高,短柱的承载力与变形能力均逐渐降低;黏土砖空隙率高,搅拌过程中吸附了大量自由水,起到内养护作用,促进了混凝土强度的后续发展,可以在一定程度上补偿因再生骨料而导致的短柱承载力损失;圆形截面的变形能力更好,峰值荷载对应的压缩变形为2.31~5.75 mm,大于同条件下方形截面(1.96~3.76 mm)。

关键词:组合柱;不锈钢管钢纤维混凝土;再生混凝土;承载能力;轴压性能

中图分类号:U444 **文献标志码:**A

0 引言

在钢管中浇筑混凝土,形成钢管混凝土结构[1-2]。混凝土的存在延缓了钢管整体失稳与局部失稳;在轴压荷载的作用下,因钢管的环向约束,混凝土处于三轴受压状态,强度和变形能力均得到大幅提升。在两种材料的组合效应下,钢管混凝土的承载能力明显高于钢管与混凝土的简单叠加。

再生混凝土的发展已经被认为是有利于实现建筑工业可持续发展的一种有效方法[3]。再生混凝土技术的发展不仅可以减少建筑业对天然骨料的依赖,降低大量开采砂石对生态环境造成的破坏,还可以解决因废弃混凝土处理困难造成的生态环境污染。李佳岐等[4]在钢管混凝土结构中引入机制砂以及再生粗骨料,用于解决资源短缺以及建筑垃圾污染问题,并确定了最优的再生混凝土本构模型;张敬铭等[5]针对钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土的轴压短柱力学性能开展性能分析,对比了钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能的差异;向星赟等[6]将自密实再生混凝土应用于钢管混凝土,研究方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的力学行为,揭示不同参数对其承载力和峰值挠度的影响规律。

充分利用不锈钢[7-8]的抗锈蚀及全寿命周期优势以及再生骨料的绿色环保功能[9-10],本文将废弃黏土砖作为再生粗骨料,应用于不锈钢管与混凝土的组合柱,并掺入钢纤维用于再生混凝土的性能提升,提出不锈钢管与钢纤维增强再生混凝土组合柱,通过18个试件的轴压试验,研究组合短柱的轴压承载力。

1 试验设计

完成18个不锈钢管组合短柱的轴压试验,主要设计参数包括截面形状、钢纤维体积率(ρ_{sf})、再生骨料替代率(ρ_{ra}),如表1所示。D代表边长(方形截面)和直径(圆形截面),L为试件的长度,t为不锈钢管的壁厚。试件编号CS表示圆形组合短柱;SS表示方形组合短柱;F0、F1、F2表示钢纤维掺量,对应的ρ_{sf}分

收稿日期:2022-09-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51208175)
作者简介:黄波,男,大学本科,高级工程师.E-mail:huangbo@hhu.edu.cn.

别为0、1%、2%；N0、R5、R10表示再生骨料替代率，对应的ρ_{ra}分别为0、50%、100%。

表1 试件设计参数

试件编号	$D\times L$/(mm×mm)	t/mm	ρ_{ra}/%	ρ_{sf}/%
CSF0N0	114×300	1.4	0	0
CSF1N0	114×300	1.4	0	1
CSF2N0	114×300	1.4	0	2
CSF0R5	114×300	1.4	50	0
CSF1R5	114×300	1.4	50	1
CSF2R5	114×300	1.4	50	2
CSF0R10	114×300	1.4	100	0
CSF1R10	114×300	1.4	100	1
CSF2R10	114×300	1.4	100	2
SSF0N0	100×300	1.4	0	0
SSF1N0	100×300	1.4	0	1
SSF2N0	100×300	1.4	0	2
SSF0R5	100×300	1.4	50	0
SSF1R5	100×300	1.4	50	1
SSF2R5	100×300	1.4	50	2
SSF0R10	100×300	1.4	100	0
SSF1R10	100×300	1.4	100	1
SSF2R10	100×300	1.4	100	2

采用2 000 kN液压式电子压力试验机完成了轴压试验，采用先荷载后位移的控制方式。方形试件的轴向压缩变形达到15 mm后停止加载；圆形试件的轴向压缩变形达到30 mm后停止加载。加载前下端加载板先与试验机加载平台对中，之后试件再与下端加载板对中并用细砂找平，确保试件加载过程中轴心受压。下端加载板对称放置量程为50 mm的YWC-50型位移传感器，测量试件的轴向变形。加载装置示意图如图1所示。

试验材料如图2所示。选用直缝焊接不锈钢管；天然骨料为连续级配的碎石；再生骨料由废弃砌体结构墙体筛选破碎而成，最大粒径均不超过30 mm；钢纤维为铣削波浪形钢纤维，长30 mm，宽1 mm，厚0.05 mm，抗拉强度不低于700 MPa。钢纤维混凝土的配合比如表2所示，按《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)[11]和《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)选用[12]。不锈钢各项材料性能如表3所示；钢纤维混凝土立方体试块抗压强度测试结果如表4所示。

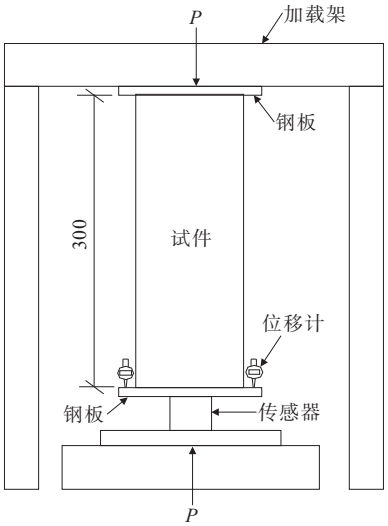


图1 加载装置(尺寸单位:cm)

(a) 不锈钢管 (b) 废弃黏土砖 (c) 钢纤维

图2 试验材料

表2 钢纤维再生混凝土配合比

试件名称	组成/(kg·m^{-3})					
	水	水泥	砂	天然骨料	再生骨料	钢纤维
F0N0	205	420	568	1 207	0	0
F1N0	205	420	568	1 183	0	24
F2N0	205	420	568	1 159	0	48
F0R5	205	420	568	603	603	0
F1R5	205	420	568	591	591	24
F2R5	205	420	568	579	579	48
F0R10	205	420	568	0	1 207	0
F1R10	205	420	568	0	1 183	24
F2R10	205	420	568	0	1 159	48

注：F0、F1、F2表示钢纤维掺量0、1%、2%；N0、R5、R10表示再生黏土砖粗骨料的替代率0、50%、100%。

表3 不锈钢各项材料性能

试件名称	名义屈服强度$f_{0.2}$/MPa	抗拉强度f_u/MPa	弹性模量$E_{0.2}$/10^5 MPa
圆管-1	430	712	2.15
圆管-2	464	763	2.28
方管-1	470	793	2.35
方管-2	447	746	2.20
平均值	453	754	2.25

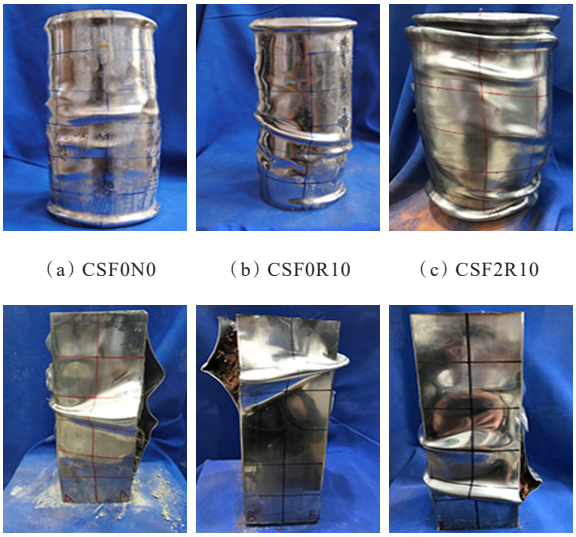
表4　钢纤维再生混凝土立方体抗压强度

钢纤维掺量/%	再生粗骨料替代率/%	f_1/MPa	f_2/MPa	f_3/MPa	$\bar{f}$/MPa
0	0	29.3	29.7	30.9	30.0
	50	32.0	32.5	34.7	33.1
	100	21.6	25.5	25.6	25.5
1	0	36.8	38.2	39.1	38.0
	50	39.4	40.6	42.9	41.0
	100	29.4	30.2	34.0	31.2
2	0	38.0	38.6	39.4	38.7
	50	41.4	41.9	43.9	42.4
	100	31.7	33.9	35.2	33.6

注：表中f_1、f_2、f_3为钢纤维再生混凝土3个试块的轴压强度试验值，平均值为$\bar{f}$。

2　试验结果

试件的破坏形态如图3所示。



(a) CSF0N0　(b) CSF0R10　(c) CSF2R10

(d) SSF2N0　(e) SSF1R10　(f) SSF2R10

图3　试件的破坏形态

轴向力作用下，焊缝承受了纵向的压应力；为了约束核心混凝土，焊缝同时承受了水平方向的拉应力。对于圆形截面柱，钢管对混凝土产生均匀的侧向围压作用，水平方向的拉应力不存在明显的应力集中，焊缝处于相对较好的受力状态，因此整个试验过程中焊缝并未发生破坏。对于方形截面柱，钢管对混凝土产生的侧向约束主要发生在4个角部。因侧向约束效应而产生的钢管水平方向受拉，导致了角部焊缝不但应力集中，而且正交的两个水平方向均受拉，焊缝极易发生撕裂破坏。

表5给出了试验结果，主要包括屈服荷载P_y、屈服点位移Δ_y、峰值荷载（即承载力）P_m、峰值点位移Δ_m。P_y与P_m的差异较小，多数情况下不超过10%，但Δ_y与Δ_m的差异较大，个别试件的Δ_m近乎Δ_y的2倍，如试件CSF0N0。组合短柱屈服后的塑性特征明显，虽然承载力增长有限，但变形增长明显，直至达到峰值荷载。

表5　主要试验结果

试件编号	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	(P_y/P_m)/%	(Δ_y/Δ_m)/%
CSF0N0	520.70	3.13	556.09	5.75	93.64	54.43
CSF1N0	667.89	3.07	702.12	3.99	95.12	76.94
CSF2N0	779.26	2.83	816.40	3.61	95.45	78.50
CSF0R5	389.71	2.30	391.01	2.36	99.67	97.46
CSF1R5	527.35	3.04	576.72	4.39	91.44	69.25
CSF2R5	709.57	2.55	768.79	3.66	92.30	69.77
CSF0R10	305.93	1.76	336.51	2.31	90.91	76.36
CSF1R10	496.68	3.45	523.28	4.52	94.92	76.33
CSF2R10	494.68	2.24	576.19	3.41	85.85	65.79
SSF0N0	424.90	2.16	444.44	2.91	95.60	74.35
SSF1N0	521.52	2.65	620.11	3.38	84.10	78.40
SSF2N0	496.75	2.52	625.40	3.76	79.43	67.11
SSF0R5	433.18	2.46	448.68	2.91	96.55	84.54
SSF1R5	458.46	2.36	507.94	3.40	90.26	69.41
SSF2R5	548.82	1.83	615.87	2.29	89.11	79.91
SSF0R10	267.14	1.65	280.43	2.04	95.26	80.88
SSF1R10	280.23	1.57	295.23	1.96	94.92	80.31
SSF2R10	444.35	2.85	474.60	3.48	93.63	81.90

3　承载性能与变形分析

由表5可知：9个方形截面柱的承载力P_m为280.43～625.40 kN，而9个圆形截面柱的P_m为336.51～816.40 kN，方形截面组合短柱的承载力低于同条件下的圆形截面柱。虽然圆形截面在梁柱连接时存在一些障碍，但承载能力明显更好。焊缝的撕裂导致了方形截面柱的提前失效，钢管与混凝土的组合效应无法充分发挥。

随着再生骨料替代率的提高，短柱的承载力逐渐降低。与完全采用天然骨料的试件相比，采用

50%再生骨料试件的承载力下降幅度有限。黏土砖空隙率高、吸水性强,搅拌过程中吸附的大量自由水,在养护过程中随水泥水化不断释放,使再生混凝土内部保持一定的温度,起到内养护的作用[13-14],促进了强度的后续发展。但当再生骨料替代率达到100%时,承载力的降幅明显,内养护的增强效果无法弥补因骨料替代而导致的承载力损失。

钢纤维掺量在0~2%的范围内,其用量的增加可稳步提升组合短柱的承载力。无论方形截面或圆形截面,钢纤维的增强效果对强度更低的再生骨料更有效。以圆形截面为例,采用天然骨料时,钢纤维掺量由0提升到2%,试件的承载力由556.09 kN提高到816.40 kN,提升幅度约为47%。当再生骨料替代率为50%时,增加同样数量的钢纤维,承载力由391.01 kN提高到768.79 kN,提升幅度约为97%。

圆形截面柱的变形能力更好,Δ_m为2.31~5.75 mm,大于同条件下方形截面柱(Δ_m=1.96~3.76 mm)。Δ_m同样随着再生骨料替代率的提升而降低;随着钢纤维掺量的增加,Δ_m逐渐增大,钢纤维掺量为2%的试件表现尤为明显。

4 结论

(1)对于方形截面柱,因侧向约束效应而导致钢管水平方向受拉,角部焊缝不但应力集中,而且沿正交的两个水平方向均受拉,焊缝极易发生撕裂破坏。

(2)虽然圆形截面在梁柱连接时存在一些障碍,但承载能力明显更好。焊缝的撕裂导致了方形截面柱的提前失效,钢管与混凝土的组合效应无法充分发挥。

(3)随着再生骨料替代率的提高,短柱的承载力逐渐降低。Δ_m同样随着再生骨料替代率的提升而降低。但黏土砖搅拌过程中吸附的大量自由水,起到内养护的作用,促进了再生混凝土强度的后续发展。

(4)钢纤维用量的增加可稳步提升组合短柱的承载力。无论方形截面或圆形截面,钢纤维的增强效果对强度更低的再生骨料更有效。

参考文献:

[1] LI H, LIU Y J, ZHANG N. Non-linear distributions of bond-slip behavior in concrete-filled steel tubes by the acoustic emission technique[J]. Structures, 2020, 28: 2311-2320.

[2] 涂光亚,袁航.大跨度钢管混凝土拱桥成桥状态钢管应力优化研究[J].中外公路,2020,40(2):140-143.

[3] 熊辉,刘洪辉.掺钢纤维和矿渣的高性能再生混凝土性能研究[J].中外公路,2020,40(1):206-211.

[4] 李佳岐,陈志华,杜颜胜,等.钢管机制砂再生混凝土柱核心混凝土受压本构模型研究[J].工业建筑,2021,51(5):108-115,15.

[5] 张敬铭,韦珂俊.钢管再生混凝土与钢筋再生混凝土轴压短柱力学性能的试验分析优化设计[J].混凝土,2018(4):50-52.

[6] 向星赟,赵人达,贾毅,等.方钢管自密实再生混凝土偏压短柱的力学行为[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(3):420-428.

[7] 王海龙,孙晓燕,孔航挺,等.不锈钢钢筋锈损特征扫描分析及性能劣化规律[J].水力发电学报,2020,39(1):80-88.

[8] 张泽宁,杨吉春,富晓阳.高氮低镍奥氏体不锈钢的力学性能及析出相[J].金属热处理,2019,44(8):15-20.

[9] WANG B, LIU X A, YU X A. The analysis of the characteristics and the research status of the recycled concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 587/588/589:900-903.

[10] RAHMAN M A, IMTEAZ M A, ARULRAJAH A, et al. Engineering and environmental assessment of recycled construction and demolition materials used with geotextile for permeable pavements[J]. Journal of Environmental Engineering, 2015, 141(9):04015019.

[11] 中国建筑科学研究院.普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[12] 大连理工大学.纤维混凝土结构技术规程:CECS 38:2004[S].北京:中国计划出版社,2005.

[13] MANZUR T, RAHMAN S, TORSHA T, et al. Burnt clay brick aggregate for internal curing of concrete under adverse curing conditions[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(12):5143-5153.

[14] 易双秦,刘开志,邱晶,等.吸水珊瑚砂作为超高性能混凝土(UHPC)内养护介质的研究[J].硅酸盐通报,2019,38(8):2506-2512.