

文章编号:1001-4888(2022)06-0921-12

方钢管高强再生混凝土叠合柱轴压性能试验研究^{*}

牛海成, 高锦龙, 张耀宗, 丁亚红

(河南理工大学 土木工程学院, 河南焦作 454000)

摘要:为研究方钢管高强再生混凝土叠合柱受压性能,以混凝土种类、方钢管内是否配置拉结筋、箍筋间距和钢管壁厚为变化参数,完成了 5 根方钢管高强混凝土叠合柱的单调加载试验,并分析了不同变化参数对高强再生混凝土叠合柱受压性能的影响。结果表明:方钢管高强再生混凝土叠合柱损伤发展过程和破坏形态与普通混凝土叠合柱相似;方钢管高强再生混凝土叠合柱承载能力较普通混凝土叠合柱有所提高,但峰值荷载后承载力发生突降变形性能较差;方钢管内配置拉结筋、减小箍筋间距和增大钢管壁厚均提高了方钢管高强再生混凝土叠合柱的受力性能。考虑方钢管对核心再生混凝土以及箍筋对外围钢筋再生混凝土的约束,本文提出了方钢管高强再生混凝土叠合柱的轴压承载力计算公式,结果表明,计算值与实测值吻合较好。

关键词: 钢管混凝土叠合柱; 方钢管; 高强再生混凝土; 特征点荷载; 延性; 承载力计算

中图分类号: TU398.9

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-225

0 引言

随着建筑业的快速发展,我国建筑垃圾已达到年产量两亿吨左右^[1]。混凝土作为用量最大的一种建筑材料,也面临着天然骨料日益短缺的问题。再生混凝土技术可实现建筑垃圾资源化,同时也可减少天然石子的大量开采,具有节能环保的重要意义。

将再生混凝土灌入钢管并在外围绑扎钢筋笼,浇筑再生混凝土形成钢管再生混凝土叠合柱,既可充分发挥钢管再生混凝土柱的优点,同时也克服了钢管再生混凝土柱耐腐蚀性、耐火性差及梁柱节点处理复杂等缺点,使得再生混凝土在建筑结构领域得到了广泛的应用。

李惠等^[3]根据圆钢管普通混凝土叠合柱轴压试验,提出了轴压承载力计算公式。蔡健等^[4]通过高强圆钢管普通混凝土叠合柱轴压试验发现增大含钢率可显著提高承载力和延性。柯晓军等^[5]通过圆钢管再生混凝土叠合柱轴压试验发现,增大体积配箍率和钢管面积比,可以使延性得到显著改善。刘阳等^[6]通过圆钢管普通混凝土叠合柱轴压试验发现,达到峰值荷载时,外围钢筋混凝土对钢管的约束作用可以忽略,但钢管对核心混凝土的约束作用比较明显。康洪震等^[7]通过圆钢管高强普通混凝土叠合柱轴压试验,发现套箍指标、管外混凝土强度和配箍特征值是影响承载力的主要因素。聂建国等^[8]分析了体积配箍率对叠合柱协同工作性能的影响,推导出外围钢筋混凝土柱的临界配箍率。Han 等^[9]建立有限元模型,分析了圆钢管、核心混凝土和外围钢筋混凝土之间的相互作用。廖飞宇等^[10]通过方钢管普通混凝土叠合柱滞回性能试验和有限元模拟分析发现,在水平力作用下,钢管外围钢筋混凝土、钢管混凝土、钢管和纵向钢筋之间可以发挥较好的协同互补作用。郭明等^[11]采用纤维模型法分析了方钢管普通混凝土叠合柱的荷载-应变曲线,并提出了方钢管普通混凝土叠合柱轴压承载力计算公式。Park^[12]、

^{*} 收稿日期: 2021-09-22; 修回日期: 2021-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(U1904188); 河南省自然科学基金(182300410247); 河南理工大学博士基金(B2016-66)

通信作者: 牛海成(1979—),男,博士,副教授。主要从事钢与混凝土组合结构方面的研究。Email: niuhch@126.com

郭全全^[13,14]、Lee^[15]以及柯晓军^[16]等分别对钢管普通混凝土叠合柱和钢管再生混凝土叠合柱进行了偏压试验研究,并推导出了钢管混凝土叠合柱偏压承载力计算公式。

由上述文献综述可发现,现有对叠合柱的研究主要存在两方面的问题,一是对叠合柱受压性能的研究主要集中于普通混凝土叠合柱,对再生混凝土叠合柱的试验研究较少,且再生混凝土强度等级偏低;二是对叠合柱的研究主要集中在内置圆钢管的叠合柱,对内置方钢管的叠合柱研究比较少,且主要集中在理论分析方面,相应的试验研究鲜有报道。目前钢管混凝土叠合柱已被应用在多项实际工程中,例如:南京交通大厦、沈阳富林广场、东海赛格广场以及上海杨浦大桥、芜湖长江大桥等^[17,18],具有很好的推广应用价值,因此,用再生混凝土替代普通混凝土研究其轴压性能是有必要的。基于此,本文考虑了粗骨料种类、方钢管内是否配置拉结筋、箍筋间距和钢管壁厚等参数对方钢管高强再生混凝土叠合柱损伤发展过程、破坏特征、承载力和延性等的影响,完成了 5 个方钢管混凝土叠合柱的轴压试验。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计了截面尺寸为 230mm×230mm,长细比为 5 的 5 个试件,试件尺寸如图 1 所示。对于试件 RCFSST-1 而言,方钢管中部上下 600mm 范围内配置拉结筋。试件详细设计参数见表 1。为防止各试件加载过程中端部先于柱身破坏,端部 150mm 范围内采取箍筋加密和焊接钢筋网片的措施。

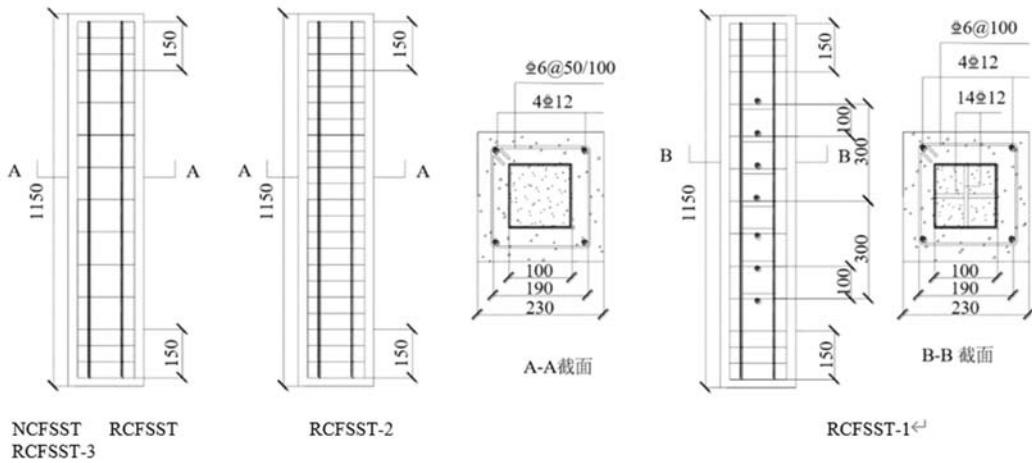


图 1 试件基本尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Basic dimensions of specimens (unit: mm)

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens

试件编号	L/mm	B/mm	t/mm	$\gamma/\%$	S/mm	$\rho_a/\%$	θ	$\rho_v/\%$	λ
NCFSSST	1150	100	4.0	0	100	2.904	1.39	0.823	0.084
RCFSST	1150	100	4.0	100	100	2.904	1.34	0.823	0.075
RCFSST-1	1150	100	4.0	100	100	2.904	1.34	0.823	0.075
RCFSST-2	1150	100	4.0	100	50	2.904	1.34	1.646	0.151
RCFSST-3	1150	100	4.5	100	100	3.251	1.51	0.823	0.075

注:L为试件高度;B为钢管边长;t为钢管壁厚; γ 为再生粗骨料取代率;S为箍筋间距; ρ_a 为含钢率; θ 为套箍系数; ρ_v 为体积配箍率; λ 为配箍特征值。其中, $\rho_a = A_a/A$; A_a 为钢管截面积;A为试件截面积。 $\rho_v = A_{sv}l/(A_{ov}S)$; A_{sv} 为箍筋截面积;l为箍筋的长度; A_{ov} 为箍筋约束区混凝土截面积。 $\lambda = \rho_v f_{yv}/f_{co}$; f_{yv} 为箍筋屈服强度; f_{co} 为钢管外混凝土轴心抗压强度。

1.2 试验材料

试验用的水泥为焦作市某工厂生产的 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥;细骨料为焦作地产河砂,细度模数为 2.78;再生粗骨料来自实验室废弃的混凝土梁和柱,混凝土强度等级为 C40,人工敲成大块经颚式破碎机破碎后去除片状骨料,用筛网筛分出最大粒径为 25mm 的连续级配骨料,天然粗骨料为相

同粒径范围连续级配的碎石。再生粗骨料和天然粗骨料物理性能见表 2。同时,为保证高强混凝土具有较好的工作性能,还掺入 II 级粉煤灰、S95 级矿粉和高效减水剂。普通混凝土和再生混凝土配合比见表 3。

表 2 粗骨料物理性能
Tab. 2 Physical properties of coarse aggregate

类别	粒径范围/mm	含水率/%	吸水率/%	堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压碎指标
天然粗骨料	5~25	1.0	0.9	1681	2798	10.4
再生粗骨料	5~25	2.2	4.3	1274	2433	12.7

表 3 混凝土配合比
Tab. 3 Design mix of concrete

水灰比	材料/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)							
	水泥	细骨料	天然粗骨料	再生粗骨料	水	粉煤灰	矿粉	减水剂
0.32	336.9	633.5	1126.2	0	154.0	48.1	96.3	2.41
0.32	336.9	633.5	0	1126.2	154.0	48.1	96.3	2.89

普通混凝土和再生混凝土实测立方体抗压强度分别为 60.1MPa 和 62.7MPa,与普通混凝土相比,再生混凝土立方体抗压强度略高,主要原因是:(1)再生粗骨料表面的旧砂浆与新拌水泥砂浆之间相容性很好,与天然粗骨料光滑的表面相比,更易形成较强的结合面;(2)再生粗骨料表面比较粗糙,界面啮合力较强,增强了界面黏结力;(3)再生粗骨料吸水率高,在混凝土拌合物硬化之前,能够较快地吸收水泥砂浆中多余的水分^[19,20],因此导致再生混凝土实际水灰比有所降低(尽管名义水灰比相同),使得再生混凝土抗压强度增大。文献[21,22]也得到了相似的结论。普通混凝土和再生混凝土弹性模量分别为 40.9GPa 和 37.4GPa。 $\Phi 6$ 、 $\Phi 12$ 钢筋的屈服强度分别为 495MPa 和 415MPa,抗拉强度分别为 705MPa 和 564MPa; t 为 4.0mm、4.5mm 钢管的屈服强度分别为 378MPa 和 365MPa,抗拉强度分别为 487MPa 和 472MPa。

1.3 试验方法与测点布置

试验在 5000kN 压力试验机上进行。首先进行 400kN 的预加载,持荷 5min,观察各测点是否正常工作,预加载结束后卸载为零,开始正式加载。正式加载采用分级加载,预估峰值荷载 65%之前,每级加载 200kN;预估峰值荷载为 65%~85%,每级加载 100kN;此后,每级加载 50kN,持荷 5min,用于观察并记录试件的轴向位移和破坏特征,承载力下降到峰值荷载 60%左右时,停止加载。试验加载装置如图 2 所示。

试验机上下承板上各布置 2 个百分表,用于量测试件的轴向位移。试件中部混凝土、纵筋、钢管纵向、钢管环向和箍筋粘贴应变片,所有应变片均用于量测试件中部各部件的局部变形,应变数据采用 UT7206 静态应变仪自动采集。应变片布置如图 3 所示。

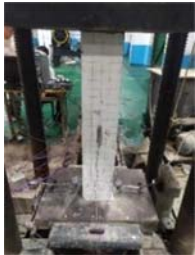


图 2 试验加载装置
Fig. 2 Test set-up

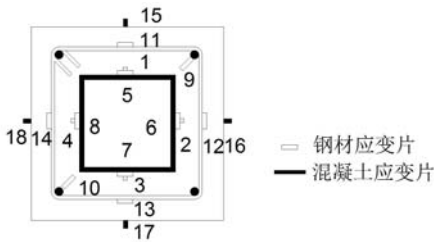


图 3 应变片布置
Fig. 3 Layout of strain gauge

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

荷载增加至 $0.6 N_u$ (N_u 为预估峰值荷载) 前, 各试件表面均无明显现象, 处于弹性工作阶段。继续加载, 端部出现首条竖向裂纹, 此后, 中部出现竖向裂纹; 加载至约 $0.8 N_u$ 时, 中部竖向裂缝向中上部延伸, 且裂缝明显增多并加宽, 处于带裂缝工作阶段。达到峰值荷载时, 伴随明显的劈裂声, 混凝土保护层开始剥落。此后, 承载力迅速降低, 下降至 $0.75 N_u$ 左右时, 破坏部位混凝土严重剥落, 纵筋压曲, 箍筋外鼓, 试件破坏。

观察各试件最终破坏形态, 发现再生混凝土试件混凝土剥落程度比普通混凝土试件严重, 钢管内配置拉结筋、箍筋加密和增大钢管壁厚的试件混凝土剥落程度有所减轻, 其中减小箍筋间距的试件混凝土剥落最轻。各试件破坏形态如图 4 所示。

试验结束后, 凿开破坏部位的混凝土, 可以看到纵筋明显向外鼓曲, 方钢管出现明显环状鼓凸。与普通混凝土试件相比, 再生混凝土试件钢管鼓凸严重, 箍筋加密试件方钢管鼓凸较弱。其中, 试件 RCFSSST-1 和 RCFSSST-3 破坏部位方钢管角部被撕裂, 如图 5 所示, 其主要原因是试件 RCFSSST-1 和 RCFSSST-3 承载力较高, 外围钢筋混凝土失效后, 承受的荷载向钢管混凝土转移, 导致方钢管混凝土突然承受较大的荷载, 且方钢管对核心混凝土约束应力分布不均匀, 角部应力最大^[23], 导致方钢管角部撕裂。

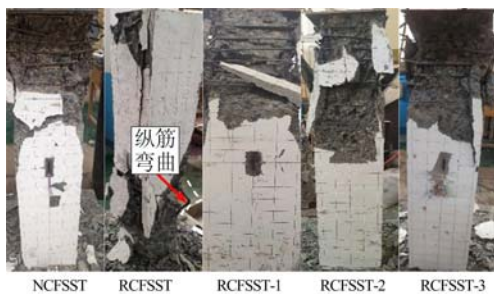


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimens

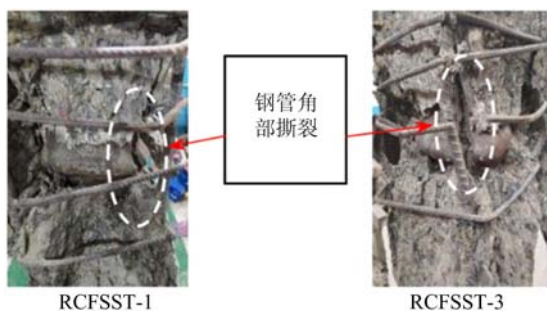


图 5 典型钢管破坏形态

Fig. 5 Failure patterns of the square steel tube

2.2 荷载-位移曲线

各试件荷载-位移 ($N-\Delta$) 曲线见图 6。由图 6(a) 可见: 与普通混凝土试件 NCFSSST 相比, 再生混凝土试件 RCFSSST 承载力略高。加载初期, $N-\Delta$ 曲线大致呈线性增长关系, 普通混凝土试件的轴压刚度略高于再生混凝土试件, 主要是因为试验实测普通混凝土弹性模量较高导致的。与普通混凝土试件相比, 再生混凝土试件峰值位移较大且承载后期刚度退化较快, 这是由于再生粗骨料内部存在缺陷, 荷载作用下, 再生混凝土内部裂纹发展较快, 轴向位移较大。峰值荷载后, 普通混凝土试件 $N-\Delta$ 曲线下降段较平缓, 说明普通混凝土试件有较强的变形能力。

对于再生混凝土试件, 由图 6(b)、(d) 可见, 方钢管内配置拉结筋和增大钢管壁厚后, 与试件 RCFSSST 相比, 轴压刚度无明显变化, 但极限承载力和残余承载力显著提高。由图 6(c) 可见, 箍筋加密后, 与试件 RCFSSST 相比, 轴压刚度显著增大, 承载力有所提高, 峰值荷载后残余承载力较高。

由图 6(b)、(c)、(d) 可知, 峰值荷载后, 再生混凝土试件承载力均发生突降, 主要原因是再生粗骨料表面存在新旧砂浆界面和更多的界面薄弱区, 同时受再生粗骨料破碎工艺的影响, 内部存在大量细微裂缝等特点使得峰值荷载后再生混凝土很快被压碎, 荷载发生突降。

2.3 特征点荷载分析

实测各试件特征点荷载见表 4, 表中 N_y 为屈服荷载, N_u 为峰值荷载。试件屈服荷载采用 R · PARK 法确定^[24], 具体计算过程如图 7 所示。

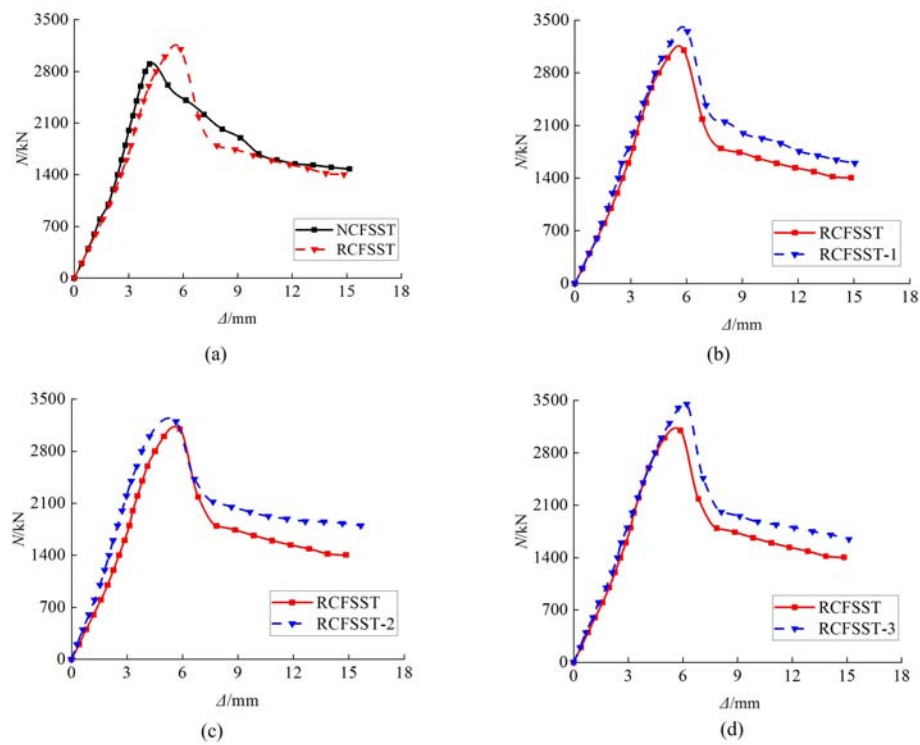


图 6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Axial load-deformation curves

表 4 各试件特征点荷载

Tab. 4 Characteristic loads of specimens

试件编号	屈服点		峰值点		强屈比
	N_y /kN	相对值	N_u /kN	相对值	
NCFST	2856	1.000	2900	1.000	1.015
RCFST	3012	1.055	3100	1.069	1.029
RCFSST-1	3017	1.056	3350	1.155	1.110
RCFSST-2	3134	1.097	3200	1.103	1.021
RCFSST-3	3130	1.096	3450	1.190	1.102

由表 4 可知,再生混凝土试件 RCFST 较普通混凝土试件 NCFST 屈服荷载和峰值荷载分别提高了 5.5%和 6.9%,这是因为再生混凝土抗压强度高于普通混凝土抗压强度导致的^[25-27],而再生混凝土抗压强度高于普通混凝土抗压强度的主要原因在 1.2 中已做了详细阐述,这里不再赘述。

与再生混凝土试件 RCFST 相比,钢管内配置拉结筋后,RCFSST-1 屈服荷载仅提高了 0.2%,但峰值荷载提高了 8.1%,其主要原因是拉结筋的设置加强了方钢管对核心混凝土的约束;箍筋加密后,RCFSST-2 各特征点荷载分别提高了 4.1%和 3.2%,说明箍筋间距对承载力影响较小;增大钢管壁厚的 RCFST-3 屈服荷载提高了 3.9%,峰值荷载提高了 11.3%,主要原因是增大钢管壁厚使方钢管对核心混凝土的套箍能力增强,有效延缓了方钢管局部屈曲的发生^[28,29],因此使得方钢管再生混凝土叠合柱承载力有所提高。

再生混凝土试件 RCFST 和 RCFST-2 的强屈比与普通混凝土试件 NCFST 接近,但试件 RCFST-1 和 RCFST-3 的强屈比显著提高,说明方钢管内配置拉结筋或增大钢管壁厚可延长试件屈服点到峰值点这一受力过程,故钢管内设置拉结筋的试件安全储备较高。

2.4 荷载-应变曲线

2.4.1 混凝土应变

图 8 为实测各试件荷载-混凝土应变($N-\epsilon$)曲线。由图可见,加载初期,各试件荷载-应变曲线大致呈线性关系,随着荷载增加,混凝土应变增长速率加快,主要原因是混凝土内部损伤加剧。同级荷载作用下,再生混凝土试件应变增长速率较普通混凝土试件迅速,主要是因为再生混凝土内部存在细微裂纹,随着荷载的增加,裂纹发展较快,变形较大。达到峰值荷载后,混凝土保护层开始剥落,混凝土应变片失效,测得有效压应变为 $1629\mu\epsilon \sim 2236\mu\epsilon$ 。

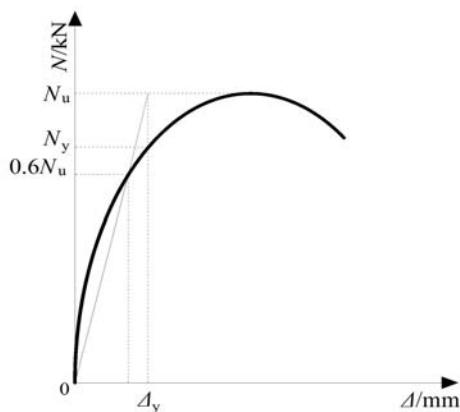


图 7 屈服点计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of yield point calculation

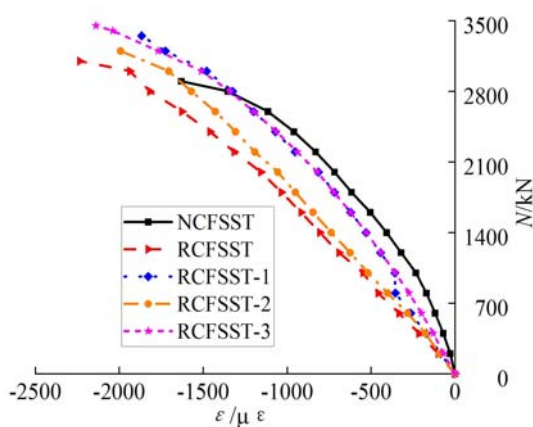


图 8 荷载-混凝土应变曲线

Fig. 8 Load-concrete strain curve

2.4.2 纵筋和钢管纵向应变

图 9 和图 10 为各试件荷载-纵筋应变和钢管纵向应变曲线。由图可知,加载初期,各试件纵向应变发展规律基本一致。此后,应变增长速率明显加快,且再生混凝土试件应变增长速率明显大于普通混凝土试件,与位移计量测的轴向位移增长规律相吻合。达到峰值荷载时,各试件纵向应变均达到屈服应变,其中,钢管内配置拉结筋的试件 RCFSSST-1 和增大钢管壁厚的试件 RCFSSST-3 钢管纵向应变均超过 $3000\mu\epsilon$,说明方钢管内配置拉结筋或增大钢管壁厚后,材料利用更充分。

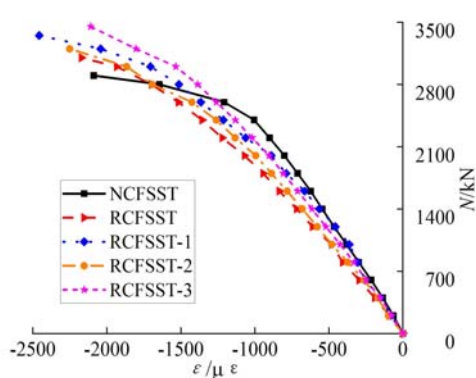


图 9 荷载-纵筋应变曲线

Fig. 9 Load-strain curve of longitudinal bar

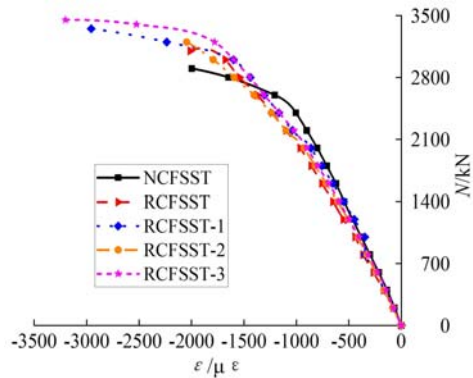


图 10 荷载-钢管纵向应变曲线

Fig. 10 Load-longitudinal strain curve of steel tube

2.4.3 箍筋和方钢管环向应变

各试件荷载-箍筋应变曲线和荷载-方钢管环向应变曲线如图 11 和图 12 所示。由图可知,加载到 70% 峰值荷载前,应变增长缓慢,说明箍筋和钢管对混凝土约束作用较弱。加载至 90% 峰值荷载时,由于混凝土内部损伤发展明显加剧,应变迅速增长,说明箍筋和钢管对混凝土的约束作用增强。峰值荷载时,箍筋应变为 $1430\mu\epsilon \sim 1593\mu\epsilon$,方钢管环向应变为 $658\mu\epsilon \sim 1137\mu\epsilon$,均未达到屈服应变(屈服应变 $2159\mu\epsilon$),说明箍筋和钢管对混凝土的约束作用较弱,未得到完全发挥。此后,随着承载力降低,方钢管

环向应变迅速增大,主要原因是外围再生混凝土逐渐被压碎脱落,方钢管再生混凝土承担的轴向荷载突然增大,使得其对核心再生混凝土的约束能力显著增强。

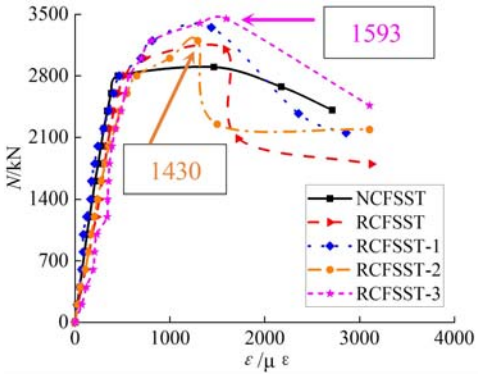


图 11 荷载-箍筋应变曲线

Fig. 11 Load-strain curve of stirrup

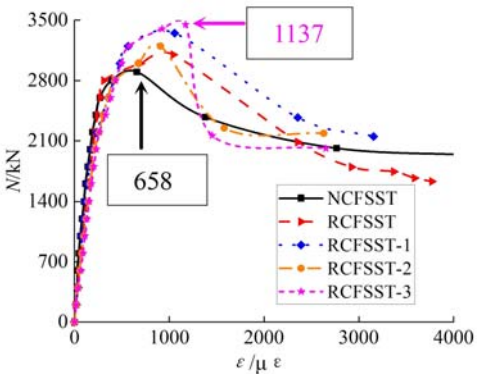


图 12 荷载-钢管环向应变曲线

Fig. 12 Load-circumferential strain curve of steel tube

2.5 延性

延性是表征结构或构件变形能力的重要参数,是承载能力没有显著下降的情况下承受变形的能力。叠合柱的延性采用位移延性系数 $\mu = \Delta_m / \Delta_y$ 来表示。各试件特征点位移见表 5,表中 Δ_y 为屈服位移, Δ_m 为极限位移,即承载力下降至 85% 峰值荷载时对应的位移。

表 5 各试件特征点位移

Tab. 5 Characteristic displacements of specimens

试件编号	屈服点		极限点		μ
	Δ_y /mm	相对值	Δ_m /mm	相对值	
NCFST	4.11	1.000	6.11	1.000	1.487
RCFSST	5.14	1.251	6.31	1.032	1.228
RCFSST-1	4.71	1.146	6.56	1.073	1.393
RCFSST-2	4.40	1.071	6.30	1.031	1.432
RCFSST-3	5.13	1.250	6.51	1.065	1.269

由表 5 可知,再生混凝土试件 RCFSST 的位移延性系数比普通混凝土试件 NCFST 降低了 17.5%,主要原因是再生粗骨料在制备过程中骨料内部存在大量细微裂纹,在荷载作用下裂纹迅速开展,峰值荷载后裂缝贯通路径更多、发展速度更快,导致箍筋内混凝土更易剥落,因此使得承载力迅速降低,延性变差。文献[30]也得到类似的结论。

对于再生混凝土试件,钢管内配置拉结筋后,RCFSST-1 的位移延性系数比 RCFSST 提高了 13.4%;箍筋加密后,RCFSST-2 的位移延性系数比 RCFSST 提高了 16.6%,主要原因是箍筋加密可有效约束箍筋内混凝土裂纹的产生和发展,使得再生混凝土试件延性显著提高。增大钢管壁厚的 RCF-SST-3 位移延性系数比 RCFSST 提高了 3.3%,说明钢管壁厚对延性影响较小。

3 轴压承载力计算

目前我国钢管混凝土叠合柱轴压承载力计算公式主要有:叠合柱规程 T/CECS 188—2019^[31]、聂建国^[8]以及 Han^[9]等提出的计算公式。利用上述规程和研究学者提出的承载力计算公式,计算各钢管混凝土叠合柱的轴压承载力,并将计算值与试验实测值进行对比分析(见表 6),表中 N_t 为实测值, N_c 为计算值。由表 6 可知,各试件轴压承载力计算值均显著大于实测值,因此这些方法用于设计方钢管混凝土叠合柱偏于不安全,且误差较大,最大误差为 26.1%。

由于现行的叠合柱规程和相关研究学者提出的轴压承载力计算公式,主要适用于内置圆钢管的叠

合柱,而对于内置方钢管的叠合柱没有具体的轴压承载力计算公式;相比圆钢管对核心混凝土的约束效应,方钢管对核心混凝土的约束作用较弱^[24,32],使得核心混凝土对方钢管没有形成有效的侧向支撑,加载后期,方钢管过早局部屈曲,导致承载力下降^[29];本文 2.4.3 节通过分析荷载-箍筋应变曲线发现,峰值荷载之前箍筋对混凝土也有一定的约束能力,但约束能力较弱。因此,基于叠加原理,本文将钢管混凝土和外围钢筋混凝土的强度进行叠加得到方钢管混凝土叠合柱的轴压承载力计算公式:

$$N_u = 0.9\varphi N_w + N_{cc} \quad (1)$$

式中: φ 为轴心受压构件稳定系数,按叠合柱规程 T/CECS 188-2019^[31]取值; N_w 为钢管外混凝土的轴压承载力; N_{cc} 为核心方钢管混凝土的轴压承载力。

$$N_w = N_{wa} + N_{wb} \quad (2)$$

式中: N_{wa} 为保护层非约束区混凝土的轴压承载力; N_{wb} 为箍筋约束区混凝土的轴压承载力。

$$N_{wa} = f_w A_{wa} \quad (3)$$

式中: f_w 为钢管外混凝土的轴心抗压强度; A_{wa} 为保护层非约束区混凝土的截面积。

对于箍筋约束区的混凝土,本文采用钱稼茹等^[33]提出的公式计算该部分的轴压承载力:

$$N_{wb} = f_y A_s + (1 + 1.79\lambda') f_w A_{wb} \quad (4)$$

式中: f_y 为纵筋屈服强度; A_s 为纵筋总截面积; λ' 为配箍特征值; A_{wb} 为箍筋内表面至方钢管外侧混凝土的截面积。

对于核心方钢管再生混凝土,参考规程 T/CECS 625-2019^[34]给出的方钢管再生混凝土轴压承载力计算公式计算该部分的承载力:

$$N_{cc} = 0.9\varphi'(1.18 + 0.85\theta) f_{cc} A_{cc} \quad (5)$$

在计算试件 RCFSSST-1 核心方钢管轴压承载力时,由于方钢管内部设置了十字形拉结筋,由前面分析可知,拉结筋的设置可显著增强其轴压性能,延缓方钢管过早的局部鼓曲,因此,可按圆钢管再生混凝土轴压承载力计算公式计算该部分的承载力:

$$N_{cc} = 0.9\varphi'(1.14 + 1.02\theta) f_{cc} A_{cc} \quad (6)$$

式中: φ' 为构件的稳定系数,计算过程见式(7); θ 为套箍系数; f_{cc} 为核心方钢管混凝土轴心抗压强度; A_{cc} 为核心方钢管混凝土截面积。

当 $\lambda < \lambda_0$ 时, $\varphi' = 1$

当 $\lambda_0 < \lambda < \lambda_p$ 时, $\varphi' = a\lambda^2 + b\lambda + c$ (7)

当 $\lambda > \lambda_p$ 时, $\varphi' = d/(\lambda + 35)^2$

式中: a 、 b 、 c 、 d 均为系数; λ 为构件长细比; λ_0 和 λ_p 为构件塑性失稳和弹性失稳的界限长细比,详细计算过程见文献^[34]。

方钢管混凝土叠合柱轴心受压承载力计算公式见式(8),圆钢管混凝土叠合柱轴心受压承载力计算公式见式(9)。

$$N_u = 0.9\varphi[f_w A_{wa} + f_y A_s + (1 + 1.79\lambda') f_w A_{wb}] + 0.9\varphi'(1.18 + 0.85\theta) f_{cc} A_{cc} \quad (8)$$

$$N_u = 0.9\varphi[f_w A_{wa} + f_y A_s + (1 + 1.79\lambda') f_w A_{wb}] + 0.9\varphi'(1.14 + 1.02\theta) f_{cc} A_{cc} \quad (9)$$

采用式(8)与式(9)计算本文以及文献^[5,8]中共 15 根钢管混凝土叠合柱的轴压承载力,计算结果见表 6。

由表 6 可知,由本文提出的公式计算的钢管混凝土叠合柱轴压承载力,其计算值与实测值比值的平均值为 0.988,标准差为 0.034。说明本文提出的方钢管混凝土叠合柱的轴压承载力计算公式计算结果与实测结果吻合较好,且具有一定的安全储备。

表 6 试验值与计算值对比
Tab. 6 Comparison of test values and calculation values

文献来源	试件编号	N_t /kN	文献[28]		文献[8]		文献[10]		本文	
			N_c /kN	N_c / N_t	N_c /kN	N_c / N_t	N_c /kN	N_c / N_t	N_c /kN	N_c / N_t
本文	NCFSSST	2900	3293	1.135	3656	1.261	3462	1.194	2955	1.019
	RCFSST	3100	3388	1.093	3761	1.213	3573	1.153	3038	0.980
	RCFSST-1	3350	3388	1.011	3761	1.123	3573	1.067	3102	0.926
	RCFSST-2	3200	3388	1.059	3759	1.175	3573	1.117	3195	0.998
	RCFSST-3	3450	3475	1.037	3859	1.152	3661	1.093	3069	0.916
文献[5]	C-1	2358	2740	1.162	2950	1.185	1.206	1.206	2367	1.004
	C-2	2309	2694	1.167	2904	1.169	1.206	1.206	2316	1.003
	C-3	2357	2694	1.143	2904	1.161	1.206	1.206	2311	0.980
	C-4	2295	2694	1.174	2904	1.168	1.206	1.206	2308	1.006
文献[8]	CCFT1-1	2663	3252	1.221	3415	1.283	3356	1.260	2584	0.970
	CCFT1-2	2653	3364	1.268	3533	1.332	3486	1.314	2665	1.005
	CCFT1-3	2663	3202	1.203	3363	1.263	3299	1.239	2548	0.957
	CCFT2-1	3451	3712	1.076	3833	1.111	3756	1.088	3562	1.032
	CCFT2-2	3515	3805	1.083	3929	1.118	3867	1.100	3656	1.040
	CCFT2-3	3615	3694	1.022	3814	1.055	3738	1.034	3550	0.982
平均值			1.124		1.185		1.166		0.988	
标准差			0.074		0.072		0.070		0.034	

4 结论

(1) 方钢管高强普通混凝土叠合柱与方钢管高强再生混凝土叠合柱经历了弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段,均表现出混凝土保护层剥落、箍筋约束区混凝土压碎、纵筋鼓曲和方钢管环向鼓凸等破坏特征。

(2) 方钢管高强再生混凝土叠合柱较方钢管高强普通混凝土叠合柱承载力略高,但变形性能有所减弱。

(3) 方钢管内配置拉结筋,方钢管高强再生混凝土叠合柱承载力和延性均显著提高。

(4) 减小箍筋间距,方钢管高强再生混凝土叠合柱承载性能和变形性能均有所提高。

(5) 增大方钢管壁厚,方钢管高强再生混凝土叠合柱承载力提高了 11.3%,同时延性亦有所改善,峰值荷载可对应更大的峰值应变,材料利用更充分。

(6) 考虑方钢管对核心混凝土以及箍筋对钢管外混凝土的约束,并基于叠加原理得到了方钢管混凝土叠合柱的轴压承载力计算公式,计算结果与实测结果吻合较好。

参考文献:

[1] 何莹莹. 建筑垃圾的再生利用之路[J]. 科技创新与应用, 2020, 33:55—56 (HE Yingying. Road to recycling construction waste[J]. Technological Innovation and Application, 2020, 33:55—56 (in Chinese))

[2] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003, 10:17—20, 57 (XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, LAN Yang. Research on recycled aggregate concrete—A review[J]. Concrete, 2003, 10: 17—20, 57 (in Chinese))

- [3] 李惠, 吴波, 张洪涛, 等. 钢管高强混凝土叠合节点中核心部分的静力承载力研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(2):1—6 (LI Hui, WI Bo, ZHANG Hongtao, et al. Experimental study on static loading capacity of the centre part of laminated joint of steel tube filled with high strength concrete[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1998, 31(2):1—6 (in Chinese))
- [4] 蔡健, 谢晓峰, 杨春, 等. 核心高强钢管混凝土柱轴压性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(6):81—85 (CAI Jian, XIE Xiaofeng, YANG Chun, et al. An experimental research on the composite column with core of high-strength concrete filled steel tube under axial compression loading[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2002, 30(6):81—85 (in Chinese))
- [5] 柯晓军, 苏益声, 商效瑀, 等. 内置钢管全再生混凝土组合柱轴压性能分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增1): 291—296 (KE Xiaojun, SU Yisheng, SHANG Xiaoyu, et al. Analysis of axial compression performance of fully recycled concrete-filled steel tube reinforced concrete column[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S1): 291—296 (in Chinese))
- [6] 刘阳, 郭子雄, 贾磊鹏, 等. 核心钢管混凝土叠合短柱轴压性能及设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12):135—142 (LIU Yang, GUO Zixiong, JIA Leipeng, et al. Experimental study on axial compression performance and design method of core steel tube reinforced concrete short columns[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12):135—142 (in Chinese))
- [7] 康洪震, 钱稼茹. 钢管高强混凝土组合柱轴压承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(6):64—67 (KANG Hongzhen, QIAN Jiaru. Experimental study on axial compression capacity of high strength concrete-filled steel tube composite columns[J]. Building Structure, 2011, 41(6):64—67 (in Chinese))
- [8] 聂建国, 柏宇, 李盛勇, 等. 钢管混凝土核心柱轴压组合性能分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9):9—13 (NIE Jianguo, BAI Yu, LI Shengyong, et al. Analyses on composite column with inside concrete filled steel tube under axial compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9):9—13 (in Chinese))
- [9] Han L H, Aa Y F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 92:62—76.
- [10] 廖飞宇, 韩林海. 方形钢管混凝土叠合柱的力学性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(4):153—162 (LIAO Feiyu, HAN Linhai. Performance of concrete-filled steel tube reinforced concrete columns with square sections[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4):153—162 (in Chinese))
- [11] 郭明, 尧国皇. 内配钢管的钢管混凝土叠合柱轴压力学性能的初步研究[J]. 特种结构, 2015, 32(2):11—15 (GUO Ming, YAO Guohuang. Preliminary Study on behavior of concrete-filled steel tube reinforced concrete columns subjected to axial-compression[J]. Special Structure, 2015, 32(2):11—15 (in Chinese))
- [12] Park H G, Lee H J, Choi I R, et al. Concrete-filled steel tube columns encased with thin precast concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(12):04015056-1—04015056-11.
- [13] 郭全全, 李芊, 章沛瑶, 等. 钢管混凝土叠合柱偏心受压承载力的计算方法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5):56—63 (GUO Quanquan, LI Qian, ZHANG Peiyao, et al. Calculation for bearing capacity under eccentric compression of concrete-filled steel tube columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5):56—63 (in Chinese))
- [14] 郭全全, 赵羽西, 李芊, 等. 钢管混凝土叠合柱偏心受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12):103—111 (GUO Quanquan, ZHAO Yuxi, LI Qian, et al. Experimental study on eccentric compressive property of steel tube-reinforced concrete columns[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(12):103—111 (in Chinese))
- [15] Lee H J, Park H G, Choi I R. Eccentric compression behavior of concrete-encased-and-filled steel tube columns with high-strength circular steel tube[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144:10633.
- [16] 柯晓军, 苏益声, 商效瑀, 等. 钢管混凝土组合柱压弯性能试验及承载力计算[J]. 工程力学, 2018, 35(12):134—142 (KE Xiaojun, SU Yisheng, SHANG Xiaoyu, et al. Strength calculation and eccentric compressive test of steel tube-reinforced concrete composite columns[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(12):134—142 (in Chinese))
- [17] Ji X, Kang H, Chen X. Seismic behavior and strength capacity of steel tube-reinforced concrete composite columns [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43:487—505.
- [18] Cai M, Ke X J, Su Y S. Axial compressive performance of RAC-encased RACFST composite columns[J].

- Engineers Structures, 2020, 210:10393.
- [19] 陈宗平, 占东辉, 徐金俊. 再生粗骨料含量对再生混凝土力学性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(1):130—135 (CHEN Zongping, ZHAN Donghui, XU Jinjun. Research on mechanical properties of recycled concrete using different recycled coarse aggregate replacement[J]. Industrial Construction, 2015, 45(1):130—135 (in Chinese))
- [20] 张学兵. 再生混凝土配合比及拉压强度的实验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2005 (ZHANG Xuebing. Experimental study on mix proportion and compressive and tensile and strength of recycled concrete [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2005 (in Chinese))
- [21] Hansen T C. Strength of recycled aggregate concrete made from crushed concrete coarse aggregate[J]. Concrete International, 1983(1):79—83.
- [22] Chentna M V, Darshana R B. Evaluation of modulus of elasticity for recycled coarse aggregate concrete[J]. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology, 2013, 2(1):26—29.
- [23] 张正国. 方钢管混凝土柱的机理和承载力的分析[J]. 工业建筑, 1989(11):2—7 (ZHANG Zhengguo. Mechanism and analysis of bearing capacity on concrete filled square steel tube columns [J]. Industrial Construction, 1989(11):2—7 (in Chinese))
- [24] Park R, Paulay T. Reinforced concrete structures[M]. New York: Wiley Interscience Publication, 1976:240—250.
- [25] 孙一李全, 赵羽习, 孟涛, 等. 再生砖混骨料混凝土柱的小偏心受压性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(6):1090—1099 (SUN Yiliquan, ZHAO Yuxi, MENG Tao, et al. Small eccentric compression performance of reinforced concrete column made with recycled brick-mixed aggregate [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(6):1090—1099 (in Chinese))
- [26] 陈宗平, 张士前, 王妮, 等. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能的试验与理论分析[J]. 工程力学, 2013, 30(4):107—114 (CHEN Zongping, ZHANG Shiqian, WANG Ni, et al. Experimental study and theoretical analysis on axial compress capacity of recycled aggregate concrete-filled circle steel tube short column[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4):107—114 (in Chinese))
- [27] 牛海成, 曹万林, 董宏英, 等. 钢管高强再生混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6):128—136 (NIU Haicheng, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Experimental study on high-strength recycled concrete steel tube columns subjected to axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6):128—136 (in Chinese))
- [28] 马辉, 黄成, 胡广宾, 等. 方钢管型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(4):669—680 (MA Hui, HUANG Cheng, HU Guangbin, et al. Experimental investigation on axial compression performance of recycled aggregate concrete filled square steel tube-profile steel composite columns[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(4):669—680 (in Chinese))
- [29] 马辉, 黄成, 董继坤, 等. 方钢管型钢再生混凝土组合短柱偏压性能试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(5):840—850 (MA Hui, HUANG Cheng, DONG Jikun, et al. Experimental study on eccentric compression performance of recycled concrete filled square steel tube composite short columns[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(5):840—850 (in Chinese))
- [30] 武骏宇. 钢管再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015 (WU Junyu. Experimental study on axial compression performance of recycled concrete-filled steel tube composite columns[D]. Nanning: Guangxi University, 2015 (in Chinese))
- [31] T/CECS188—2019. 钢管混凝土叠合柱结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019 (T/CECS188—2019. Technical specification for composite steel tube concrete column structure[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019 (in Chinese))
- [32] 张向冈, 陈宗平, 王讲美, 等. 钢管再生混凝土长柱偏压性能研究[J]. 工程力学, 2013, 30(3):331—340 (ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, WANG Jiangmei, et al. Study on eccentric compression behaviors of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3):331—340 (in Chinese))
- [33] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42

- (10):1369—1373 (QIAN Jiaru, CHENG Lirong, ZHOU Dongliang. Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2002, 42(10):1369—1373 (in Chinese))
- [34] T/CECS 625—2019. 钢管再生混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019 (T/CECS 625—2019. Technical specification for steel tube recycled concrete structure[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019 (in Chinese))

Experimental study on axial compression behavior of high-strength recycled concrete-filled square steel tube reinforced concrete columns

NIU Haicheng, GAO Jinlong, ZHANG Yaozong, DING Yahong

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: To study the in axial compression performance of high-strength recycled concrete-filled square steel tube reinforced concrete (CFSSTRC) columns, 5 specimens were designed for experiments under the monotonic static loading. The concrete type, whether tie bars are set or not in the square steel tube, stirrup spacing and steel tube wall thickness were regarded as major variable parameters. The damage development process and failure characteristics were observed. The load-axial displacement curves and load-strain curves were obtained. The influence of varying parameters on the mechanical performance of high-strength recycled CFSSTRC columns was analyzed. The experimental results show that the damage development process and failure modes of recycled concrete composite columns are similar with those of normal concrete composite columns. The bearing capacity of recycled concrete specimens are improved compared with ordinary concrete specimens, while the deformation performance becomes poor, due to the sudden drop of the bearing capacity after the peak load. Setting up tie bars in the square steel tube, reducing the stirrup spacing and increasing the wall thickness of steel tube have a significant impact on mechanical performance of recycled CFSSTRC columns. Considering the restrain of the square steel tube to the internal recycled concrete and stirrup to external reinforced recycled concrete, a bearing capacity calculation formula is proposed of the recycled composite columns, and the calculation results show well agreement with experiment results.

Keywords: concrete-filled steel tube composite column; square steel tube; high-strength recycled concrete; characteristic point load; ductility; bearing capacity calculation