

方钢管砖混再生骨料混凝土短柱轴压性能有限元研究

刘 晓^{1,2}, 申 桑¹, 侯东序^{1,2}, 李迎春¹

(1. 沈阳大学建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110044; 2. 沈阳市民用建筑智慧防灾减灾重点实验室, 辽宁 沈阳 110044)

摘 要 目的 研究方钢管砖混再生骨料混凝土短柱的力学性能, 推动建筑固废资源化利用。方法 利用 ABAQUS 软件建立方钢管砖混再生骨料混凝土短柱模型, 将模拟结果与试验结果进行对比, 验证了模型的正确性。然后分析砖混骨料取代率、倒角率、钢管屈服强度及厚度对短柱轴压力学性能的影响。结果 砖混骨料取代率小于 50% 时, 极限承载力降低幅度在 10% 以内; 当倒角率提高至 0.16 时, 极限承载力有小幅度提升; 试件的极限承载力随着钢管的厚度及屈服强度的增大而提高。结论 砖混骨料取代率较小时对试件承载能力影响较小, 外包钢管的强度与厚度对试件承载能力有较大影响。对于方柱, 适当提高倒角率可以使钢管更好约束混凝土, 提高试件承载能力, 但倒角率过大时截面面积有较大削弱, 承载能力降低。

关键词 砖混再生骨料; 方钢管混凝土; 倒角率; 有限元分析

中图分类号 TU398.9

文献标志码 A

引用格式: 刘晓, 申桑, 侯东序, 等. 方钢管砖混再生骨料混凝土短柱轴压性能有限元研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 857-866. (LIU Xiao, SHEN Shen, HOU Dongxu, et al. Finite element study on axial compression behavior of recycled brick-concrete aggregate concrete-filled square steel tubular short column [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(5): 857-866.)

Finite Element Study on Axial Compression Behavior of Recycled Brick-Concrete Aggregate Concrete-filled Square Steel Tubular Short Column

LIU Xiao^{1,2}, SHEN Shen¹, HOU Dongxu^{1,2}, LI Yingchun¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang University, Shenyang, China, 110044; 2. Shenyang Key Laboratory of Intelligent Disaster Prevention and Mitigation of Civil Buildings, Shenyang, China, 110044)

Abstract: Research for the mechanical property of recycled brick-concrete aggregate concrete-filled square steel tubular short column, and promote resource utilization of building solid waste.

收稿日期: 2023-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078306); 沈阳市科学技术计划项目(21-108-9-21); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKQZ2021165)

作者简介: 刘晓(1974—), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要从事组合结构的力学性能、抗震性能、抗火性能等方面研究。

ABAQUS software is used to establish the model of recycled brick-concrete aggregate concrete-filled square steel tubular short column. The simulation results are compared with the experimental results to verify the correctness of the model. Then the effects of the replacement rate of brick-concrete recycled aggregate, corner radius ratio, thickness and yield strength of steel tube on the axial compressive properties of short column were analyzed. The research findings show that when the substitution rate of brick-concrete aggregate is less than 50%, the reduction of ultimate bearing capacity is less than 10%. When the corner radius ratio increases to 0.16, the ultimate bearing capacity increases slightly. The ultimate bearing capacity of the specimen increases with the increase of the thickness and yield strength of the steel tube. On the whole, the effort to the bearing capacity of the specimen is small when the substitution rate of brick-concrete aggregate is small, and the thickness and yield strength of steel tube have great influence on the bearing capacity of the specimen. For square columns, properly increasing the corner radius ratio can make concrete better restrained by steel tube, and increase bearing capacity. But when the corner radius ratio is too large, the section area will be greatly weakened and the bearing capacity will be reduced.

Key words: brick-concrete recycled aggregate; concrete-filled square steel tube; corner radius ratio; finite element analysis

随着城镇化的快速推进,建筑业在发展的同时也产生了更多建筑垃圾。据统计,我国每年建筑垃圾产出超过 24 亿 $t^{[1]}$,但利用率却不到 10%。因此,加快建筑垃圾资源化利用是目前亟需解决的问题。将建筑垃圾制成再生混凝土是资源化利用的有效方法。再生混凝土^[2]是将废混凝土破碎后进行洗涤和分类,其中的旧骨料部分或全部替代天然骨料配制成的新混凝土。在再生混凝土骨料中添加再生砖骨料,即砖混再生骨料,以此制备的砖混再生骨料混凝土的力学性能与普通混凝土相比较差。为了更好地推广和使用砖混再生骨料混凝土,可以在混凝土外部使用钢管对混凝土进行约束,以此提高砖混再生骨料混凝土的力学性能。

我国对再生混凝土的研究虽起步较晚,但已取得不少研究成果^[3-5]。早在 2008 年,肖建庄^[6]就对再生混凝土的单轴受压性能展开研究。A. Ei-Mir^[7]评估了高取代率下废砖骨料混凝土混合物的可行性。Y. C. Ji 等^[8]根据 weibull 强度理论,建立了不同废砖掺量下再生混凝土单轴压缩本构模型。朱明强^[9]、M. Zakaria^[10]通过对再生砖骨料研究,均发现由于再生砖骨料的吸水率较大,对混

凝土试块的性能产生了一定影响。黄靓^[11]、刘超^[12]、梁炯丰等^[13]以再生砖粗骨料取代率为变量进行轴压试验,研究结果表明,再生砖骨料取代率是影响其性能的主要因素,破坏形态与普通混凝土试块相似。刘超等^[12]在此基础上继续开展了对砖骨料-砂浆界面过渡区微观结构的研究,得出截面过渡区性能也是影响其力学性能的关键因素。

由于砖混骨料的缺陷,部分学者将其与钢管结合使用,更好地发挥二者的性能。郑永乾^[14]、黄靓等^[15]对钢管再生砖骨料混凝土短柱进行了试验,研究表明,随着再生砖骨料含量、钢管厚度增大,试件的延性和残余承载力提高;随着再生骨料取代率增大,试件极限承载力降低。叶建峰^[16]、J. Chen 等^[17]等研究了再生骨料取代率对轴向加载再生骨料钢管混凝土柱的影响,结果表明,钢管再生混凝土的承载力对取代率的变化不敏感。Y. Ni 等^[18]对再生砖骨料方钢混凝土的滞回性能进行了试验研究。

在结构工程中,方形柱在梁柱节点处的构造及连接简单,设计施工方便。现有文献对方钢管混凝土柱的研究较多,但以内部为砖混骨料的方钢管再生混凝土柱为研究对象

的还较少,对于钢管屈服强度、壁厚等对方钢管砖混再生骨料混凝土短柱的影响规律尚未探究。基于此,笔者利用 ABAQUS 软件建立了方钢管砖混再生骨料混凝土短柱模型,将模拟结果与试验结果进行对比,验证了模型的正确性;然后分析砖混骨料取代率、倒角率、钢管屈服强度及厚度对短柱轴压力学性能的影响。结果表明,钢管屈服强度及厚度对试件承载能力的影响较为显著,适当的增大倒角率能够提高试件的承载能力。

1 有限元模型

1.1 钢材本构

工程中常用钢材的应力-应变曲线一般分为五个阶段,其应力-应变曲线数学表达式较为复杂,故钢材本构采用李毅等^[19]提出的恒温下钢材应力-应变曲线模型(见图1)。应力-应变关系计算式见式,共分为四个阶段:弹性段(OA)、屈服段(AB)、应变硬化段(BC)、极限强度段。

$$\sigma = \begin{cases} E_{sT} \cdot \varepsilon, 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{yT}; \\ f_{yT}, \varepsilon_{yT} \leq \varepsilon < \varepsilon_{hT}; \\ f_{yT} - (f_{uT} - f_{yT}) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{uT} - \varepsilon}{\varepsilon_{uT} - \varepsilon_{hT}} \right), \varepsilon_{hT} \leq \varepsilon < \varepsilon_{uT}; \\ f_{uT}, \varepsilon \geq \varepsilon_{uT}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_{yT} 、 ε_{hT} 、 ε_{uT} 分别为钢材的屈服应变、硬化应变以及极限应变。

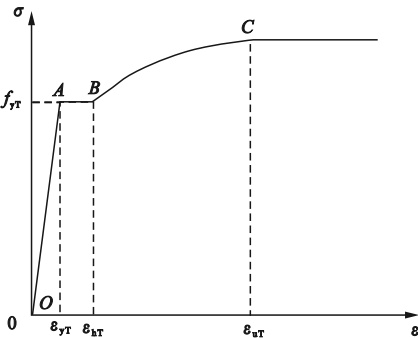


图1 钢材应力-应变关系曲线

1.2 核心混凝土本构

再生混凝土在单轴受压状态下的应力应变曲线与普通混凝土相似,具备上升段、峰值、下降段,文中核心混凝土采用的是 Y. Zheng 等^[20]提出的含砖骨料再生混凝土的本构模型,该模型在普通再生混凝土本构模型的基础上引入砖骨料取代率影响系数 φ 。应力-应变曲线如图2所示。

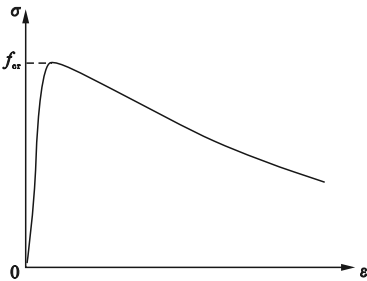


图2 核心混凝土应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of core concrete
混凝土应力-应变关系计算式为

$$\sigma = \begin{cases} f'_{cr} \frac{AX + BX^2}{1 + (A - 2)X + (B + 1)X^2}, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{c0r}; \\ f'_{cr}, & \varepsilon_{c0r} \leq \varepsilon < \varepsilon_{ccr}; \\ f_r + (f'_{cr} - f_r) \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{ccr}}{\alpha} \right)^\beta \right], & \varepsilon \geq \varepsilon_{uT}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0r}}$; $A = \frac{E_{cr} \varepsilon_{c0r}}{f'_{cr}}$; $B = \frac{(A - 1)^2}{0.55} - 1$;
 $\frac{\varepsilon_{ccr}}{\varepsilon_{c0r}} = e^k$; $f_B = \frac{0.25(1 + 0.027f_y)e^{\frac{-0.02\sqrt{f_B}}{f_{cr}}}}{1 + 1.6e^{-10}(f'_{cr})^{4.8}}$;
 $k = (2.9224 - 0.00367f'_{cr}) \left(\frac{f_B}{f_{cr}} \right)^{0.3124 + 0.002f_{cr}}$;
 $f_r = 0.1f'_{cr}$; $\alpha = 0.005 + 0.0075\xi_{cr}$; $\beta = 0.92$.

1.3 钢管、盖板与混凝土之间的接触

钢管与混凝土的相互作用中,钢管为主要表面,两者的接触由两部分组成,切线方向上采用库仑模型,用罚函数来定义,摩擦系数取0.6;法线方向上采用“硬”接触。端板与混凝土、钢管之间仅考虑法向接触。

1.4 单元类型的选取

核心混凝土及端板均设为三维实体单元(C3D8R);上下盖板设为刚体,由于需要对

Fig.1 Stress-strain relationship curve of steel

试件进行倒角率的模拟,所以采用实体单元来进行钢管的模拟。

1.5 网格划分

各部件建立完成后进行网格划分。为更好地模拟出试件的破坏形态,模型选择 20 mm 的六面体网格进行划分。

1.6 边界条件和加载方式

对下端板设置为固定约束 ($U1 = U2 = U3 = 0$),即在 X 、 Y 、 Z 三个方向没有位移,但可以绕轴自由转动,上端端板为加载端,在 ABAQUS 有限元软件中可设置一个参考点 RP-1 与顶板进行耦合,对参考点施加位移加载。边界条件及荷载见图 3。

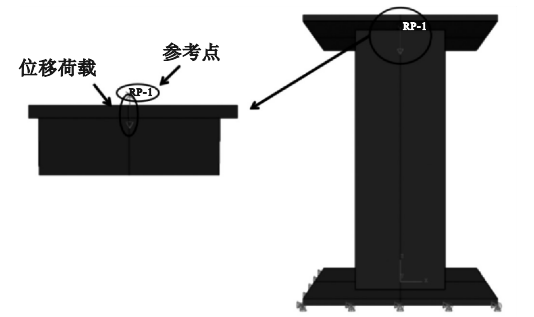


图3 边界条件

Fig.3 Boundary conditions

2 有限元模型的验证

采用上述建模方法建立方钢管砖混再生骨料混凝土的有限元模型,进行数值模拟后与试验结果进行对比。从郑永乾^[14]、黄靓^[15]以及 J. Chen^[17]对钢管砖混再生骨料混凝土的试验研究中发现,钢管砖混再生骨料混凝土柱的应力-应变曲线或荷载-应变曲线均与普通钢管混凝土一致,达到极限承载力后由于钢管的存在,应力-应变曲线下降段与无约束混凝土的曲线相比较缓和。笔者建立模型为轴压方钢管混凝土短柱,试件参数与文献[20]中试件相同,截面宽度为 156 mm,钢管厚度为 3 mm,构件长度均为 450 mm,核心混凝土部分长径比控制在 3(450 mm/150 mm = 3),上下端板宽度为 316 mm($B + 160$ mm)。文献[18]中所使用的再生骨料粒径控制在 4.75 ~ 25 mm,吸水率及压碎指标分别为 14.9%、17.1%。试件编号及参数见表 1,其中 A 组试件混凝土强度等级为 C45, B 组试件混凝土强度为 C65,每组各包含 5 个试件,以不同砖混骨料取代率划分试件编号。

表1 试件参数及试验结果

Table 1 Specimen parameters and test results

试件 分组	试件 编号	B/mm	t/mm	$r/\%$	$f'_{\text{cr}}/\text{MPa}$	f_y/MPa	ξ_{cr}	N_{uc}/kN	N'_{uc}/kN	$\Delta/\%$
A	C45T3-0	156	3	0	39.5	336	0.694	1 686.2	1 664.65	1.28
	C45T3-30	156	3	30	35.8	336	0.766	1 473.0	1 495.05	1.50
	C45T3-50	156	3	50	31.2	336	0.879	1 323.8	1 352.74	2.19
	C45T3-70	156	3	70	29.0	336	0.945	1 160.0	1 170.55	0.90
	C45T3-100	156	3	100	25.0	336	1.097	1 075.1	1 013.82	5.70
B	C65T3-0	156	3	0	54.8	336	0.500	1 986.2	1 964.64	1.09
	C65T3-30	156	3	30	47.7	336	0.575	1 775.0	1 760.84	0.80
	C65T3-50	156	3	50	44.1	336	0.622	1 692.4	1 651.10	2.44
	C65T3-70	156	3	70	41.0	336	0.669	1 603.6	1 550.52	3.31
	C65T3-100	156	3	100	36.3	336	0.755	1 509.0	1 392.32	7.73

注: B 为试件宽度; t 为钢管厚度; r 为再生骨料取代率; f'_{cr} 为该取代率下混凝土立方体抗压强度设计值; f_y 为钢管屈服强度,经实测为 336 MPa; ξ_{cr} 为约束效应系数; N_{uc} 为极限承载力; N'_{uc} 为极限承载力模拟值; Δ 为试验值与模拟值误差。

模拟过程中以试件核心混凝土破碎为破坏界限,模拟结束后将 10 个试件的荷载 - 应变曲线与试验所得荷载 - 应变曲线对比发现,所有试件曲线均吻合较好,试件的极限承

载力均随着砖混骨料取代率的增大而降低。故笔者仅选择表 1 中的 试件 C45T3-30、C65T3-30、C45T3-70、C65T3-70 进行对比,荷载 - 应变曲线见图 4。

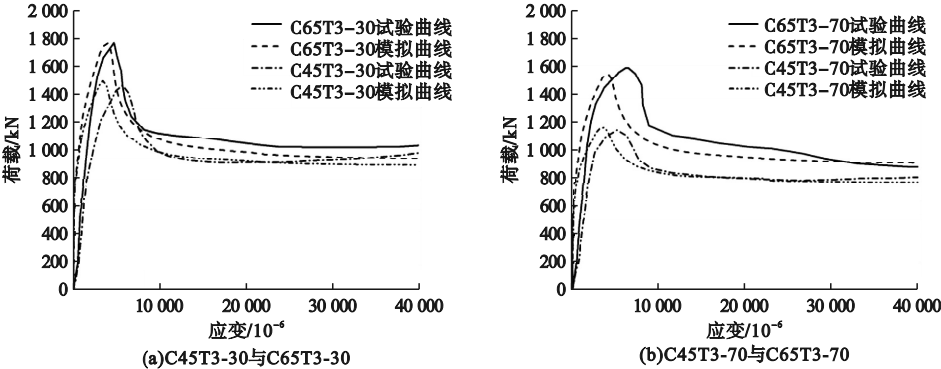


图 4 模拟与试验的荷载 - 应变曲线对比

Fig. 4 Comparison of load-strain curves between simulation and test

极限承载力对比结果见图 5。从图中可以看出, A 组试件拟合情况较 B 组试件更好。B 组试件随着再生骨料掺量的增加,模拟值与试验值之间的差值增大,可能是由于试验中再生骨料性能不稳定,用于配置强度

较高的混凝土时难以达到预测强度。B 组试件中,试件 C65T3-100 的模拟值与试验值相差最大,误差为 7.73%,但仍控制在 10% 以内,表明拟合结果较好。

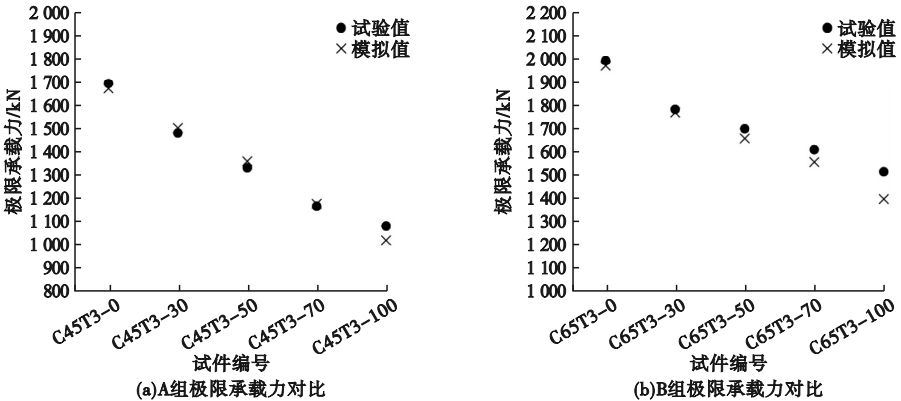


图 5 极限承载力对比

Fig. 5 Comparison of ultimate bearing capacity

综合荷载 - 应变曲线及极限承载力对比结果,说明该模型能较好地模拟方钢管砖混再生骨料混凝土短柱的轴压受力过程。

3 有限元模拟结果与分析

3.1 受力过程云图

试件破坏形态如图 6 所示。从图中可以看出,有限元模型破坏形态与文献[18]中试

验结果一致,均为试件中间部位鼓曲变形。图 6(a)为钢管及混凝土剖面应力云图,从图中可以看出,在方钢管砖混再生骨料混凝土短柱试件当中,钢管的约束作用较为明显,承受的荷载较大,对试件的支撑起到了关键作用;核心混凝土变形较小,四角出现应力集中现象,但并未出现破坏。

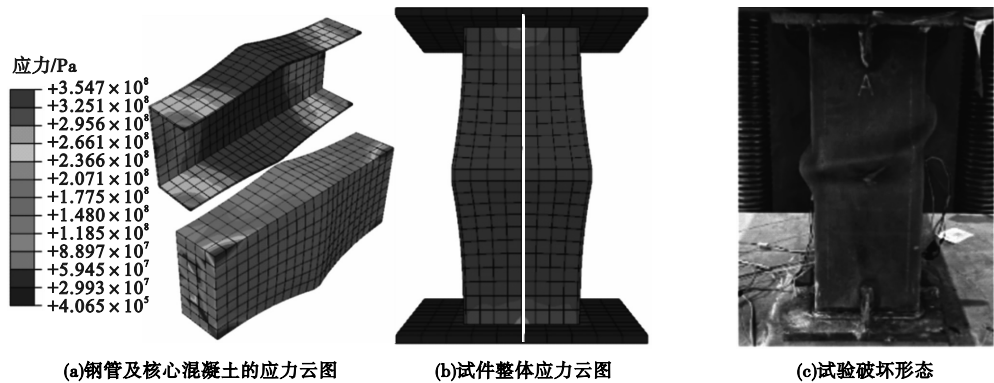


图6 方钢管砖混再生骨料混凝土短柱破坏对比图

Fig. 6 Comparison of failure of the recycled brick-concrete aggregate concrete-filled square steel tubular short column

试件初期、中期、中后期的位移云图如图7所示。从图中可以看出,试件首先从受力一端开始发生位移,另一端为固定截面,产生的位移较少;在持续加压过程中,上端位移逐渐变大,下端位移的变化极小,从而导致试件

的中间部位开始发生向外的鼓曲变形,直到加压结束。并且在受压初期,钢管首先出现膨胀变形,后续钢管变形开始减缓,混凝土逐渐膨胀,钢管与混凝土再次接触。

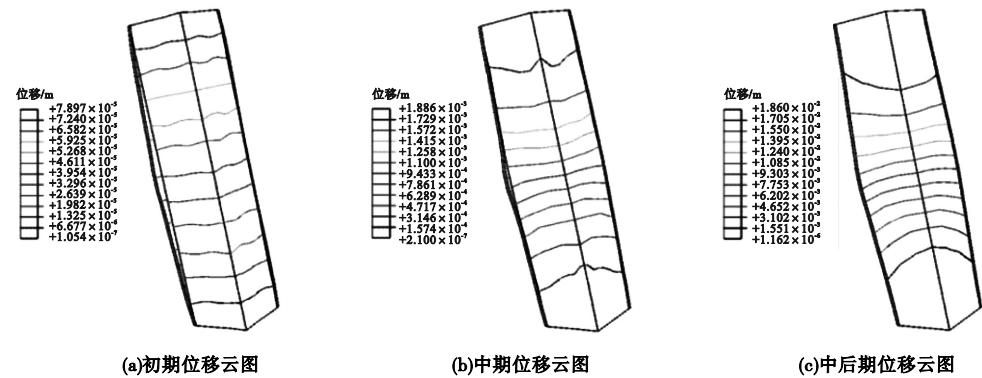


图7 短柱位移云图

Fig. 7 Displacement contour plots of the short column

笔者设置不同再生骨料取代率 r (0、0.2、0.4、0.6、0.8)、不同钢管屈服强度 f_y (336 MPa、360 MPa、390 MPa)、不同钢管壁厚 t (2 mm、3 mm、4 mm)以及不同倒角率 $2R/D$ (0、0.16、0.42)为变化参数,进行有限元模拟分析。

3.2 砖混骨料取代率对承载能力的影响

砖混骨料相较于天然骨料有较大的吸水率和压碎指标,这对混凝土的工作性能及承载能力有较大影响。笔者为探究砖混再生骨料取代率对试件极限承载力的影响,将混凝土强度设

置为C30,对不同取代率下相同核心混凝土强度的试件进行模拟,模拟结果见图8,试件的极限承载力结果见表2。由图表可知,仅改变再生骨料取代率,试件的极限承载力略有降低,但对试件延性影响较小,即应变继续增加而荷载降低幅度较小。当取代率达到80%时,试件的延性与普通试件相比没有明显的下降,而极限承载力降低了16.39%;当取代率从0%增大到20%时,极限承载力由1 278.85 kN降低至1 261.13 kN,仅降低了1.39%。这表明再生骨料取代率较小时,对试件极限承载力的影响较

小,而随着取代率的增大,再生骨料的影响逐渐加大,取代率为 40% 和 60% 的试件的极限承载力与上一级取代率的极限承载力相比,分别降低了 5.74%、6.45%。分析表明,再生骨料取代率对承载能力影响作用主要体现在降低了试件的极限承载力,而对于试件的延性影响较小。

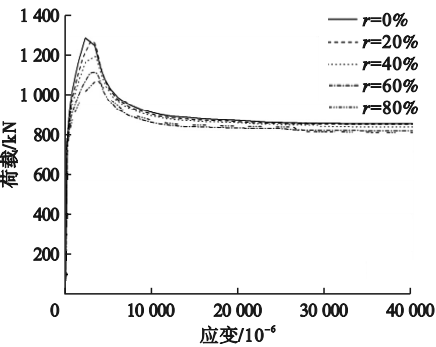


图 8 不同取代率下试件荷载 - 应变曲线
Fig. 8 Load-strain curves of specimens under different replacement rates

表 2 不同取代率下试件极限承载力
Table 2 Ultimate bearing capacity of specimens with different replacement rate

取代率/%	极限承载力/kN	Δ_1 /%	Δ_2 /%
0	1 278. 85	—	—
20	1 261. 13	1. 39	1. 39
40	1 188. 78	7. 04	5. 74
60	1 112. 16	13. 03	6. 45
80	1 069. 27	16. 39	3. 86

注: Δ_1 为与普通试件($r=0\%$)相比,极限承载力下降的百分比; Δ_2 为极限承载力与上一级取代率下极限承载力下降的百分比。

3.3 钢管屈服强度对承载能力的影响
针对 A 组 4 个试件(C45T3-30、C45T3-50、C45T3-70、C45T3-100),通过改变钢管的屈服强度,分析其对试件荷载 - 应变曲线的影响,结果见图 9。

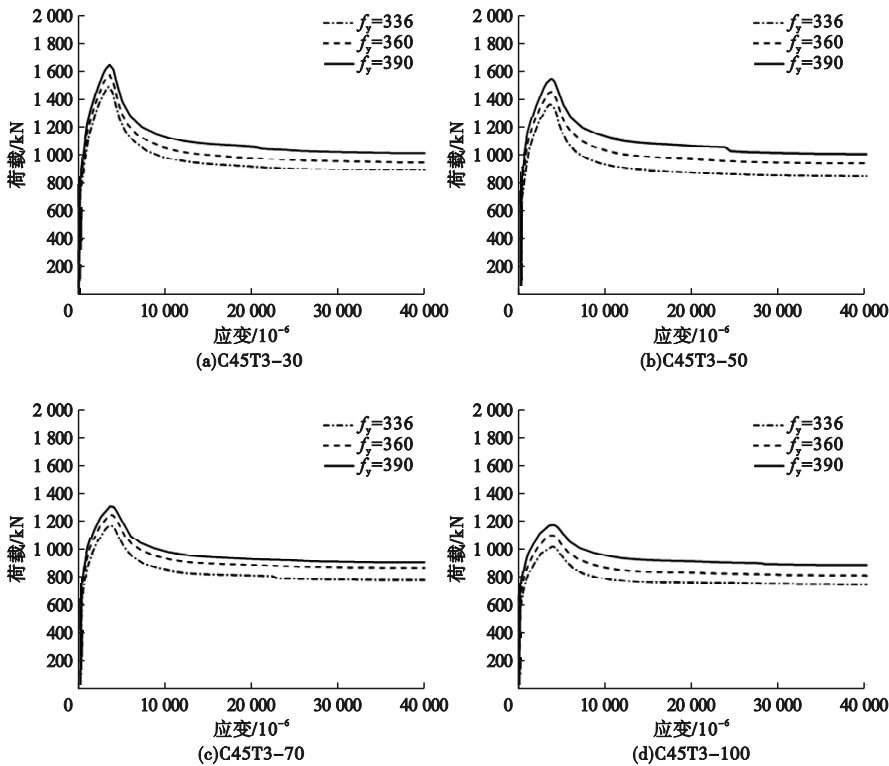


图 9 不同钢管屈服强度下试件荷载 - 应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of specimens with different yield strengths of steel tube

从图 9 中可以看出,试件承载力与钢管屈服强度呈现正相关,并且随着再生骨料取代率的提高,并不影响钢管屈服强度增大时对试件承载能力的提升效果。分析表明,混

凝土强度较低时,钢管的屈服强度对试件承载能力影响较大,并且随着再生骨料取代率的增大,钢管屈服强度对承载能力的影响也逐渐减弱;当再生骨料取代率为 50% 时,将钢管屈服强度提高至 390 MPa,试件的承载能力仅提高了 15. 71%。

3.4 钢管壁厚对承载能力的影响

对 B 组 4 个试件(C65T3-30、C65T3-50、C65T3-70、C65T3-100)进行不同钢管壁厚的模拟,结果见图 10。从图中可以看出,试件

承载能力对钢管壁厚的变化较为敏感。同钢管屈服强度一样,再生骨料取代率较小时,钢管壁厚的提高对试件模型的承载能力提升较大;当再生骨料取代率大于 50% 时,随着取代率的增大,钢管壁厚对承载能力的影响逐渐减小。分析原因是由于再生砖骨料过多,导致混凝土的强度偏低,受压过程中混凝土内部裂缝开展较快,从而导致试件承载能力的提升幅度变小。

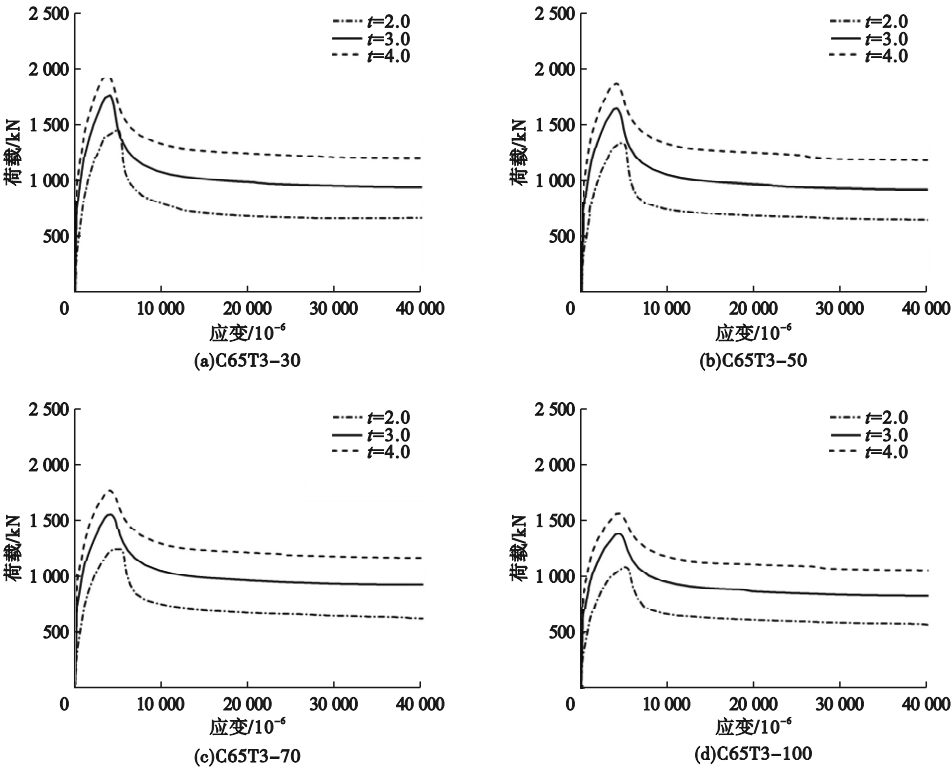


图 10 不同钢管壁厚下试件荷载 - 应变曲线

Fig. 10 Load-strain curves of specimens with different thickness of steel tubes

3.5 倒角率对承载能力的影响

方钢管倒角的处理需要将钢板通过倒角钢模进行冷弯加工,倒角半径 R 与截面宽度 D 之比($2R/D$)即为倒角半径率。适当增加倒角率可以减小方钢管混凝土柱在棱角处的应力集中,增强钢管与混凝土在棱角处的黏结,钢管的约束作用提高,承载能力也随之提高;但倒角率提高过多,截面损失较大,会使得试件承载能力减弱。

笔者对试件 C45T3-0、C45T3-50、C45T3-100 进行倒角率分析,荷载 - 应变曲线如果 11 所示。从图中可以看出,与无倒角试件相比,将倒角率增大至 0. 16 时,承载能力提高,但增大至 0. 42 时,承载能力下降。随着砖混再生骨料取代率的提高,钢管对承载能力的贡献逐渐增大,当砖混再生骨料取代率达到 100% 时,荷载 - 应变曲线的后半段呈上升趋势,可能是由于再生骨料缺陷较大,很快便退

出工作,但钢管还未屈曲,仍旧处于工作状态。

(2)砖混再生骨料取代率保持不变,增大钢管的屈服强度,试件极限承载力的提高较明显,在 $r = 50\%$ 时,提升效果最好。但随着再生骨料取代率的增加,钢管的屈服强度对试件极限承载力的影响逐渐减弱。

(3)再生骨料取代率不变,随着钢管壁厚
的提高,试件极限承载力提升幅度较大,并且提高壁厚对试件延性的提高也很显著。

(4)适当的增加倒角率可以提升钢管砖混再生骨料混凝土短柱的承载能力;但当倒角率较大时,会使得方钢管混凝土的截面损失较大,从而削弱试件的承载能力。

参考文献

[1] 徐开东,王继娜,李志新,等. 砖混建筑垃圾再生骨料应用技术指标系统化研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(9):2905-2911.
(XU Kaidong, WANG Jina, LI Zhixin, et al. Systematized study on application technology indicators of recycled aggregate reproduced by masonry construction waste [J]. Bulletin of Chinese ceramic society, 2020, 39(9):2905-2911.)

[2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
(XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing:China Building Industry Press,2008.)

[3] 陈旭勇,艾阳正,程书凯,等. 再生粗骨料性能指标分布及相关性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(2):1-10.
(CHEN Xuyong, AI Yangzheng, CHENG Shukai, et al. Performance indexes distribution and correlation analysis of recycled coarse aggregate [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2023, 40(2):1-10.)

[4] 谭艺帅,彭有开,吴徽. 不同再生细骨料取代率下的再生混凝土单轴受压本构关系[J]. 混凝土,2019(3):65-70.
(TAN Yishuan, PENG Youkai, WU Hui. Constitutive relationship of recycled concrete with different recycled fine aggregate rates under uniaxial compression [J]. Concrete, 2019(3):65-70.)

[5] 高嵩普,刘清,韩通,等. 再生骨料自密实混凝土基本力学性能研究综述及展望[J]. 混凝土,2022(5):69-73.
(GAO Songpu, LIU Qing, HAN Tong, et al. Review and prospect on basic mechanical properties of recycled self-compacting concrete [J]. Concrete, 2022(5):69-73.)

[6] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007(11):1445-1449.

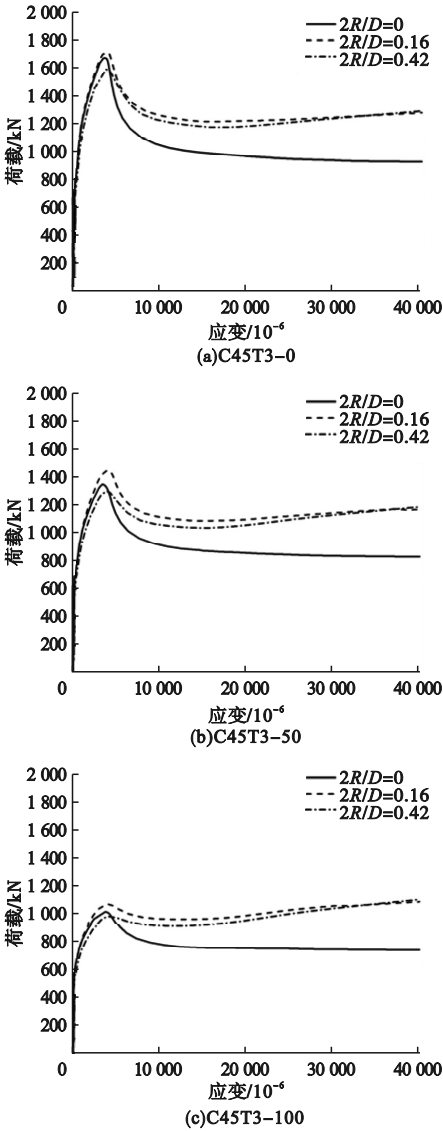


图 11 不同倒角率下试件荷载 - 应变曲线
Fig. 11 Load-strain curves of specimens under different corner radius ratio

4 结 论

(1)随着砖混再生骨料取代率增大,试件极限承载力逐渐降低,但降低幅度较小,当取代率为 80% 时,极限承载力仅降低了 16.39%。表明钢管混凝土试件可以适当添加再生骨料,对试件的性能不会产生较大影响。

- (XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. Journal of tongji university (natural science), 2007 (11): 1445 – 1449.)
- [7] EI-MIR A, NEHME S, ASSAAD J. Feasibility of concrete mixtures containing coarse and/or fine recycled brick aggregates [J]. Magazine of civil engineering, 2023 (116): 11603 – 11603.
- [8] JI Yongcheng, WANG Dayang. Constitutive model of waste brick concrete based on Weibull strength theory [J]. Case studies in construction materials, 2023, 18: 254297727.
- [9] 朱明强. 再生砖骨料混凝土配合比及基本力学性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
(ZHU Mingqiang. Experimental study on mix proportion and basic mechanical properties of recycled brick aggregate concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.)
- [10] ZAKARIA M, CABRERA J G. Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates [J]. Waste management, 1996, 16 (1/2/3): 151 – 158.
- [11] 黄靓, 张玉山, 邓鹏, 等. 烧结砖粗骨料取代率对再生混凝土柱轴压性能的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 83 – 89.
(HUANG Liang, ZHANG Yushan, DENG Peng, et al. Experimental investigation on axial compression performance of recycled clay brick aggregate concrete columns [J]. Journal of Fuzhou university (natural science), 2020, 48(1): 83 – 89.)
- [12] 刘超, 余伟航, 刘化威, 等. 再生砖骨料混凝土力学性能及破坏机理研究[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13025 – 13031.
(LIU Chao, YU Weihang, LIU Huawei, et al. Study on mechanical properties and failure mechanism of recycled brick aggregate concrete [J]. Materials reports, 2021, 35 (13): 13025 – 13031.)
- [13] 梁炯丰, 郭立湘, 程丽红, 等. 再生砖粗骨料混凝土单轴受压力学性能研究[J]. 混凝土, 2014(6): 78 – 80.
(LIANG Jiongeng, GUO Lixiang, CHENG Lihong, et al. Experimental research on mechanical behavior of recycled brick coarse aggregate concrete under uniaxial loading [J]. Concrete, 2014(6): 78 – 80.)
- [14] 郑永乾, 肖彦君, 王存华. 圆钢管地聚物再生砖骨料混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(9): 1 – 11.
(ZHENG Yongqian, XIAO Yanjun, WANG Cunhua. Axial compressive performance of geopolymer recycled brick aggregate concrete-filled circular steel tubular stub columns [J]. Progress in building steel structure, 2023, 25 (9): 1 – 11.)
- [15] 黄靓, 林明明, 高畅, 等. 钢管含砖骨料再生混凝土柱轴压力学试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(3): 699 – 706.
(HUANG Liang, LIN Mingming, GAO Chan, et al. Experimental study on axial compressive behavior of recycled aggregate concrete-filled in steel tube with partially clay brick aggregate [J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(3): 699 – 706.)
- [16] 叶建峰, 刘如月, 颜桂云, 等. 圆钢管地聚物砖骨料再生混凝土长柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(5): 264 – 272.
(YE Jianfeng, LIU Ruyue, YAN Guiyun, et al. Research on axial compressive behavior of concrete-filled circular steel tubular slender columns with geopolymeric brick aggregate [J]. Journal of building structure, 2023, 44 (5): 264 – 272.)
- [17] CHEN J, ZHANG S, WANG Y, et al. Axial compressive behavior of recycled concrete filled steel tubular stub columns with the inclusion of crushed brick [J]. Structures, 2020, 26.
- [18] NI Y, LIU X, YAHUI C, et al. Cyclic behaviors of geopolymeric recycled brick aggregate concrete-filled steel tubular column [J]. Applied sciences, 2023, 13 (3): 1235 – 1235.
- [19] 李毅, 王志滨. 恒温下结构钢的应力 – 应变关系[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 735 – 740.
(LI Yi, WANG Zhibin. Stress-strain relationship of structural steel at constant temperatures [J]. Journal of Fuzhou university (natural science), 2013, 41(4): 735 – 740.)
- [20] ZHENG Y, XIAO Y, WANG C, et al. Behavior of square geopolymer recycled brick aggregate concrete filled steel tubular stub columns under axial compression [J]. Construction and building materials, 2023, 363: 129823.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)