

钢-再生混凝土组合柱抗灾性能研究与发展

曹万林, 叶涛萍, 张建伟, 董宏英

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 本文分析了钢-再生混凝土组合柱的压弯性能、抗震性能和抗火性能研究的现状及存在的不足, 指出钢-再生混凝土组合柱结构需要深化研究的问题. 研究表明: 钢-再生混凝土组合柱的压弯性能、抗震性能总体上略弱于钢-普通混凝土组合柱, 抗火性能略好于钢-普通混凝土组合柱, 合理设计的钢-再生混凝土组合柱可用于再生混凝土组合结构.

关键词: 钢-再生混凝土组合柱; 压弯性能; 抗震性能; 抗火性能; 设计方法; 研究进展

中图分类号: TU 398

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2020)06-0604-17

doi: 10.11936/bjtxb2020030012

State-of-the-art Disaster Resistance Performance of Steel-Recycled Concrete Composite Columns

CAO Wanlin, YE Taoping, ZHANG Jianwei, DONG Hongying

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this paper, the state-of-the-art bending performance, seismic performance, and fire resistance performance of steel-recycled concrete composite columns were discussed associated with its deficiencies, and the problems that need to be further studied were pointed out. It shows that the bending performance and seismic performance of composite columns with recycled concrete is slightly weaker than those with normal concrete, while their fire resistance shows a little stronger. The steel-recycled concrete composite column with reasonable design can be used for recycled concrete composite structures.

Key words: Steel-recycled concrete composite column; bending performance; seismic performance; fire resistance performance; design method; research progress

再生混凝土全称再生骨料混凝土,即用建筑垃圾废弃混凝土块经过加工处理得到的再生粗/细骨料,部分或全部代替天然骨料配制而成的混凝土^[1].它不仅绿色环保,还可再生利用建筑垃圾废弃的混凝土,既解决了建筑垃圾处理困难及污染等难题,又极大地缓解了建筑材料资源匮乏的压力,具有较好的经济、社会及生态效益,备受工程界和学术界关注.然而,再生骨料表面粗糙,棱角分明,细小微裂纹较多,其基本性能与天然骨料相比有所不同,

如孔隙率大、吸水率大、密度小等,若不经合理设计,可能会导致再生混凝土强度低、弹性模量低、流动性差、孔隙多、收缩徐变大、变异性大等缺陷出现^[2-6],但经过合理设计可以保证再生混凝土的工作性能,可推广应用.

钢与混凝土组合构件能有效提升构件的各项力学性能指标^[7].钢具有截面尺寸设计灵活、力学性能和使用性能优良、结构自重轻等优点,成为多数结构首选的建筑材料;而再生骨料密度小、孔隙率大,

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家重点研发计划课题资助项目(2017YFC0703304)

作者简介: 曹万林(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事工程结构抗震方面的研究, E-mail: wlcao@bjut.edu.cn

通信作者: 叶涛萍(1986—),女,博士后,主要从事再生混凝土耐久性研究, E-mail: taopingye@126.com

由其配制的再生混凝土除具有与普通混凝土类似的性能外,尚有容重小、隔热抗火性能好等优点,为钢-再生混凝土组合构件的出现提供了可能,亦是工程应用发展的必然选择和重要方向,已成为国内外学者和工程界关注的热点问题。合理设计钢-再生混凝土组合构件,保证其良好的力学性能、抗震性能和抗火性能是钢-再生混凝土组合结构推广应用的关键。柱是主要的承压构件,起着支撑结构和传递荷载的重要作用;结构的安全和整体稳定性受到柱的严重影响,承载力一旦出现问题,将导致结构的塌垮等严重后果。为此,本文重点对国内外钢-再生混凝土组合柱的性能,包括型钢再生混凝土柱和钢管再生混凝土柱的压弯性能、抗震性能和抗火性能进行了分析,提出了需进一步深化研究的问题,以期能为钢-再生混凝土组合结构设计和工程应用提供参考。

1 型钢再生混凝土柱

1.1 压弯性能

多位研究者^[8-10]发现型钢再生混凝土柱轴压承载力因再生粗骨料取代率的增加呈现不同的变化规律,见图1,有降有增,亦有小幅波动变化的,其原因主要有2点:1) 相同配合比下,再生混凝土强度及弹性模量较普通混凝土低;2) 再生混凝土配制过程中未能完全考虑再生骨料吸水率较大,实际水灰比减小强度增加的因素。

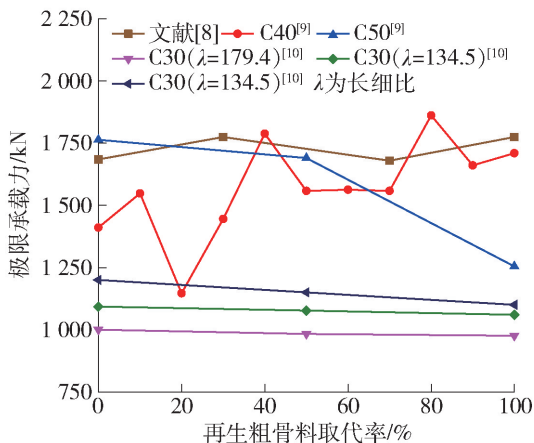


图1 承载力随取代率变化曲线

Fig. 1 Curve of bearing capacity with replacement ratio

薛建阳等^[8]研究发现型钢再生混凝土柱轴压静载试验的受力特征、破坏机制及承载力计算方法与型钢普通混凝土柱基本相同,但破坏后再生混凝土颗粒比普通混凝土小且颗粒间的黏结较弱,型钢及钢筋表面所黏结的再生混凝土明显比普通混凝土

少,说明型钢与再生混凝土及再生混凝土颗粒间的黏结作用均比型钢与普通混凝土稍弱;在再生粗骨料取代率相同时,承载力随长细比的增加而降低明显;利用叠加原理提出轴压承载力计算公式,即将截面内型钢、钢筋再生混凝土各自承担的轴压力相加,得到公式

$$N = \varphi(N_{ss} + N_{rc}) = \varphi(f_s A_{ss} + f_y A_s + f_c A_c) \quad (1)$$

式中各参数见文献[8]。

王妮等^[9]研究发现:C40和C50两种强度试件极限承载力随取代率变化趋势刚好相反,这可能与再生混凝土内部机理有关;取代率低时承载力随混凝土强度的增加而增大,而取代率高时刚好相反,说明较高强度的混凝土对再生骨料质量及取代率要求严格,建议对再生粗骨料进行强化处理且取代率不宜超过40%;增加配箍率可明显提高其极限承载力,并基于试验结果提出与文献[8]思路相似的轴压承载力计算公式,但要在式(1)的基础上乘以提高系数 β ,即型钢再生混凝土柱轴压承载力大于型钢和钢筋混凝土各自承载力之和,建议 β 取1.07。陈宗平等^[11]则认为,式(1)存在安全隐患需乘以折减系数0.7,说明型钢再生混凝土柱极限承载力因再生混凝土降低显著。梁炯丰等^[10]研究发现试件极限承载力受再生粗骨料取代率影响较小,型钢与再生混凝土协同工作性能良好,一定范围内提高混凝土强度对提高短柱极限承载力有利,设置横向扁钢效果显著。

陈宗平等^[12]研究发现型钢再生混凝土柱偏心受压破坏过程及破坏形态与型钢普通混凝土柱相似;极限承载力随再生骨料取代率的增大而呈增长趋势,见图2(a);极限承载力随偏心距增加而减小,见图2(b);并在试验数据的基础上利用修正截面假定推出大、小偏压柱的极限承载力计算公式。梁炯丰等^[13]研究发现型钢部分包裹再生混凝土偏心受压短柱极限承载力随取代率的增加而减小,见图2(a)。

薛建阳等^[14]研究发现型钢再生混凝土偏心受压柱的最大挠度因再生粗骨料取代率及相对偏心距的增加而增大,并给出侧向最大挠度和截面刚度计算的简化公式

$$f_{\max} = x_{\max} = e_0 \left[\cos^{-1} \left(\frac{l_0}{2} \sqrt{\frac{N}{EI}} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$EI = E_a I_a + \eta \left(\frac{e_0}{h} \right) \eta(r) E_{rc} I_c \quad (3)$$

$$\eta \left(\frac{e_0}{h} \right) = -0.23 \left(\frac{e_0}{h} \right)^2 - 0.33 \left(\frac{e_0}{h} \right) + 0.54 \quad (4)$$

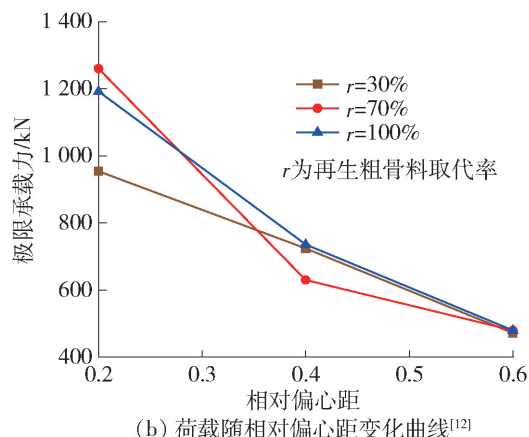
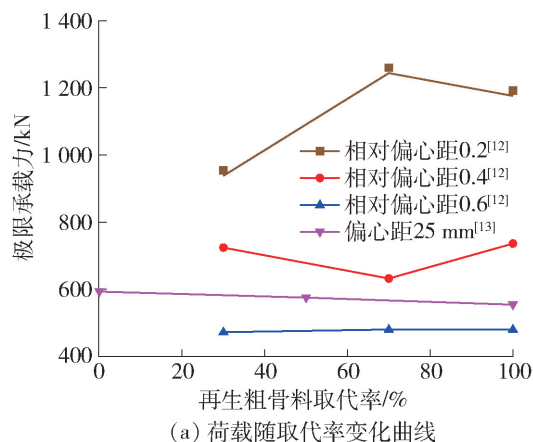


图2 极限承载力随取代率及相对偏心距的变化曲线

Fig. 2 Curve of ultimate bearing capacity with replacement ratio and relative eccentricity

$$\eta(r) = 0.56r^2 - 0.92r + 0.68 \quad (5)$$

式中各参数见文献[14]. 由式(3)可知,截面刚度计算考虑了再生粗骨料取代率的影响,但未考虑型钢与再生混凝土间的滑移效应.

薛建阳等^[15-16]对型钢再生混凝土柱受压区再生混凝土最小保护层厚度、临界开裂保护层厚度及再生混凝土保护层厚度合理取值进行力学分析,给出相应计算方法与公式,指出再生粗骨料取代率、再生混凝土强度、柱高及型钢翼缘宽度均会对其产生影响;并利用 OpenSees 有限元分析软件对型钢再生混凝土轴心和偏心受压柱进行了全过程非线性数值模拟,分析了再生粗骨料取代率、再生混凝土强度、长细比及偏心距对极限承载力的影响,表明该软件可有效模拟该试件受力及变形的全过程.

综上,型钢再生混凝土柱轴心及偏心受压性能研究虽取得重要成果,但部分结论尚不统一,如极限承载力受再生粗骨料取代率影响的变化规律及其计算公式,仍需深入研究. 目前,以试验研究和理论分析为主,有限元分析较少,且试验试件的设计参数有

限,如配钢率、配筋率等更多参数的影响亟待深入研究. 此外,以理想状态下的静载试验研究为主,而与实际工程接近的多荷载共同作用状态下的受压性能研究尚很欠缺.

1.2 抗震性能

曹万林等^[17]、薛建阳等^[18]、马辉等^[19]对型钢再生混凝土柱的抗震性能进行研究,结果表明:其受力过程及破坏形态与型钢普通混凝土柱相似;随再生粗骨料取代率的增加,试件承载力、变形能力、延性及耗能均有所降低,其承载力变化曲线见图3;随轴压比的增大,承载力有所增加,但性能退化有所加快,延性降低. 曹万林等^[17]研究发现高轴压比下型钢再生混凝土柱以弯曲破坏为主,剪切斜裂缝也较为明显,见图4;试件滞回曲线饱满,见图5;轴压比减小,耗能能力增大,见图5(c);试件的水平承载力及刚度退化受再生粗骨料取代率的影响较小;各试件极限位移角均大于1/50,高轴压比0.8下仍具较好的延性和变形能力,满足抗震要求. 而马辉等^[19]研究发现再生粗骨料取代率的增加对试件水平承载力有不利影响.

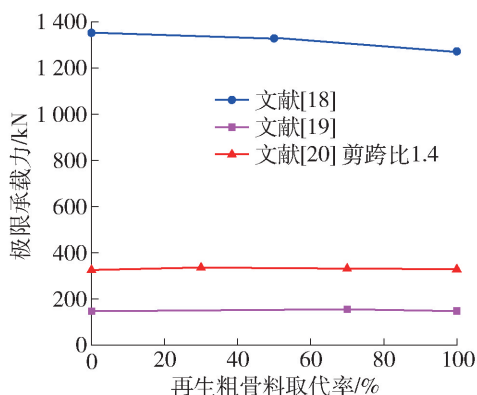


图3 承载力与取代率的关系曲线

Fig. 3 Curve of bearing capacity and replacement ratio

薛建阳等^[18,20]研究发现型钢再生混凝土柱因剪跨比的不同而呈现剪切斜压破坏($\lambda < 1.5$)、弯剪破坏($1.5 \leq \lambda \leq 2$)和弯曲破坏($\lambda > 2$)3种破坏形式;试件随剪跨比的增加,其承载力及延性变化规律见图6(剪跨比增加,承载力减小、延性增加,但增至一定数值后,增幅较小),初始刚度降低,强度衰减及刚度退化速率变慢,耗能提高;耗能能力随轴压比增加而降低;增大体积配箍率可明显提高试件延性及耗能能力,但对承载力贡献不大;建议对小剪跨比及高轴压比柱采取相应改善措施.

马辉等^[19,21-22]研究型钢再生混凝土柱在低周反复荷载下的3种破坏形态及机理,并对其中2种水

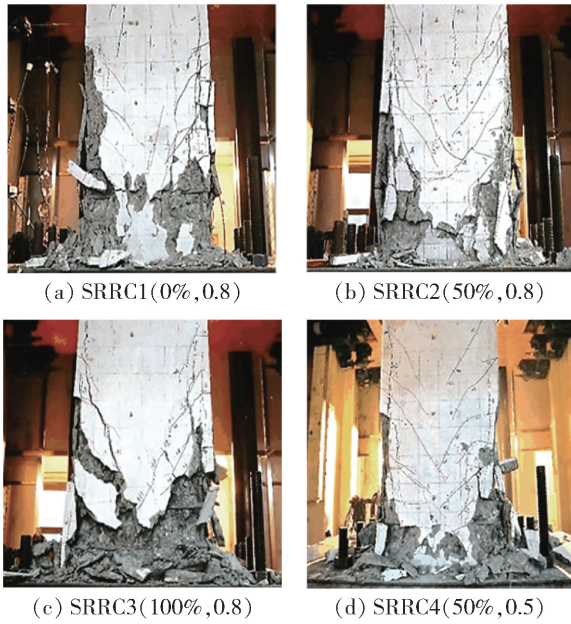


图4 试件弯剪破坏形态

Fig. 4 Bending-shear failure pattern of specimens

平承载力计算方法进行了研究,结果表明:试件剪切斜压破坏时,剪力主要由再生混凝土斜向棱柱体、型钢腹板及箍筋承担,型钢翼缘和纵筋承担比例相对小;弯剪破坏时,水平承载力主要由型钢翼缘及纵筋承担;弯曲破坏时,水平承载力由构件正截面承载力决定。给出了试件在剪切斜压破坏和弯曲破坏时的水平承载力计算公式,但过于繁琐;为了便于工程应用,提出考虑再生粗骨料取代率影响的实用计算公式:

剪切斜压破坏

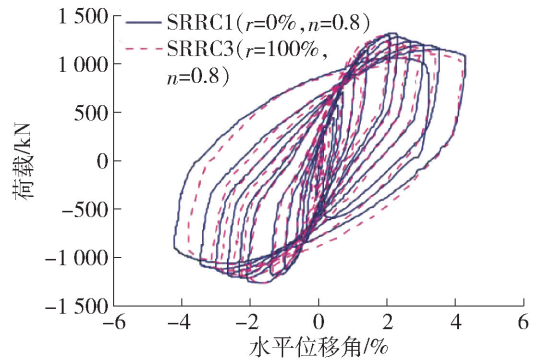
$$V = \alpha \frac{1.65}{\lambda + 1.0} f_{rt} b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.58 \frac{f_a t_w h_w}{\lambda} + 0.07N \quad (6)$$

弯曲破坏

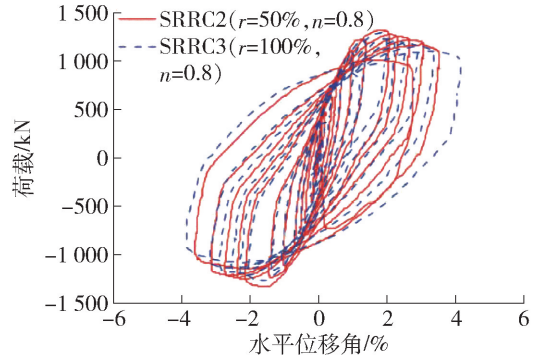
$$V = \alpha \frac{1.4}{\lambda + 1.0} f_{rt} b h_0 + \frac{1.2}{\lambda + 0.5} f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.58 \frac{f_a t_w h_w}{\lambda} + 0.07N \quad (7)$$

式中各参数见文献[19];位移延性系数随取代率、轴压比增加,较型钢普通混凝土柱降低了13.16%、58.05%。

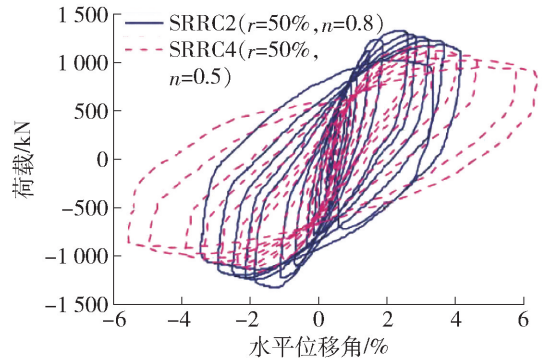
刘祖强等^[23]基于型钢再生混凝土柱正截面承载力试验,采用数值积分法编写相应分析程序,得到轴力-弯矩相关曲线,见图7,由图7可知:试件正截面承载力随混凝土强度、型钢强度和配钢率的提高均有不同程度提高,因加载方向变化而变化,见图



(a) SRRC1与SRRC3滞回曲线对比



(b) SRRC2与SRRC3滞回曲线对比



(c) SRRC2与SRRC4滞回曲线对比

图5 底部水平荷载与水平位移角滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curve of bottom horizontal load and horizontal displacement angle

8;因地震作用方向的不确定性,宜采用配十字形型钢^[24-25]的型钢再生混凝土柱来克服因加载方向变化而导致的正截面承载力差别较大的不足。

薛建阳等^[26-27]进行型钢再生混凝土长柱恢复力模型试验及全过程非线性数值模拟,通过理论分析及试验数据拟合,给出恢复力模型特征参数计算方法,并提出“定点指向”三折线骨架曲线模型。

综上,目前对型钢再生混凝土柱抗震性能的试验研究主要集中在再生粗骨料取代率、轴压比、剪跨比及体积配箍率4个参数的研究,如材料强度、型钢配钢率等因素对其性能影响的研究尚很欠缺;同时,型钢再生混凝土柱抗震性能有限元分析较少,亟需

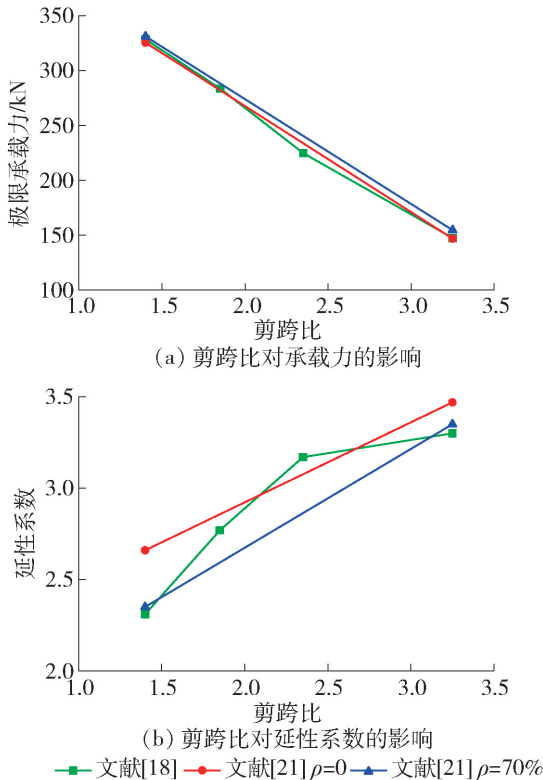


图6 剪跨比对承载力及延性系数的影响

Fig.6 Influence of shear span ratios on the bearing capacity and ductility coefficient

拓展和深化研究.

1.3 耐火性能

陈宗平等^[28-30]进行高温后型钢再生混凝土柱轴压及偏压静载试验,涉及7个参数:再生粗骨料取代率、温度、恒温时间、型钢保护层厚度、含钢率、箍筋间距和偏心率,并分析各参数对高温后试件的受力过程、破坏形态、剩余承载力和位移延性等的影响,研究其损伤机理和刚度退化,用ABAQUS有限元软件对高温下试件的温度场进行了数值计算.研究表明:高温后试件的破坏过程及破坏形态与常温下基本相似,试件裂缝的出现、贯穿及混凝土的剥落随经历温度的升高而提前,这与再生骨料表面黏附的水泥基及内部微裂纹导致高温后再生混凝土带有初始损伤有关;烧失率随温度及取代率的增加而递增,增幅1.5%~8.0%;承载力随温度的升高、受火时间的增加、型钢保护层厚度及含钢量的减小而有不同程度的降低;延性随温度的升高、型钢保护层厚度的增大先降后增,随含钢率和配箍率的增大而增大;试件的初始损伤程度随温度的升高和受火时间的增加而增大^[28];偏心率增大,试件极限承载力及抗弯刚度显著降低^[29];基于试验与有限元分析结

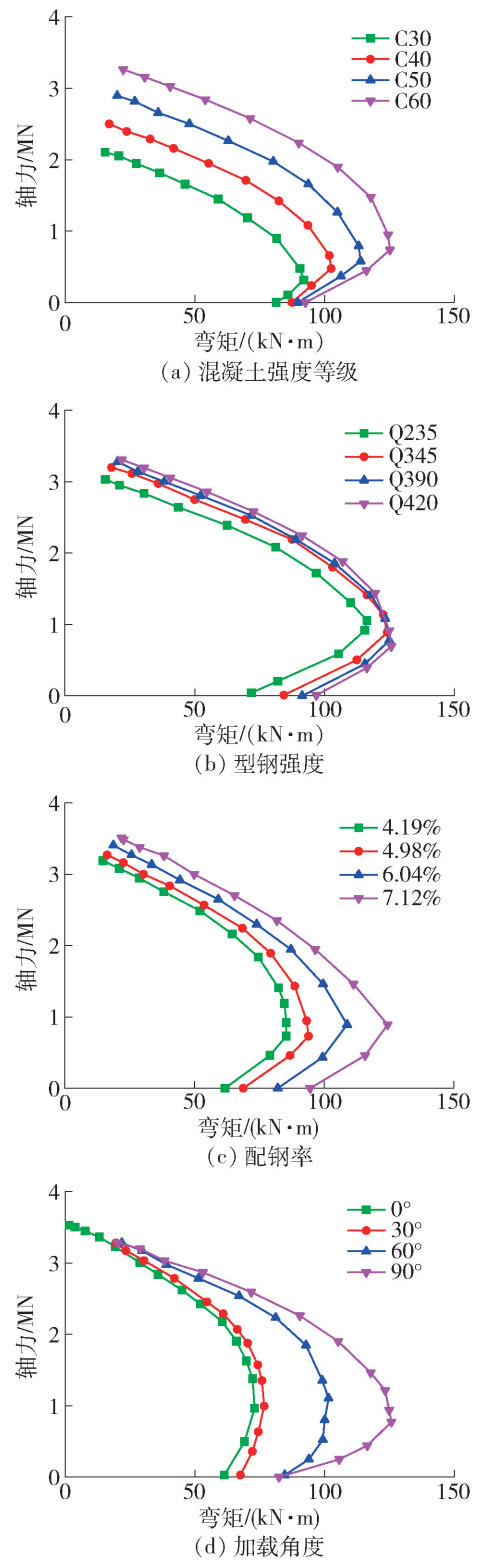


图7 不同因素对型钢再生混凝土柱轴力-弯矩曲线的影响

Fig.7 Influence of different facts on axial force - bending moment curve of steel reinforced recycled concrete column

果,给出高温后型钢再生混凝土轴压柱的剩余承载

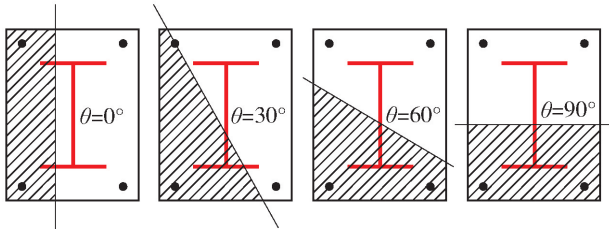
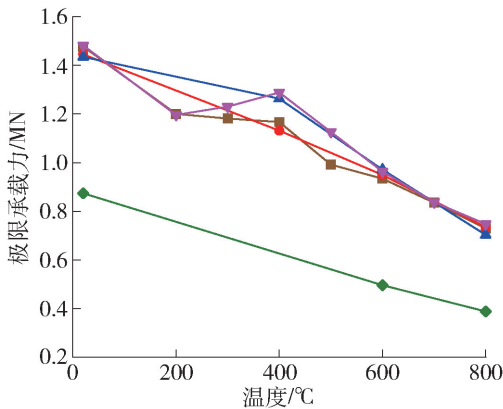


图8 加载角度示意图
Fig. 8 Loading angle diagram

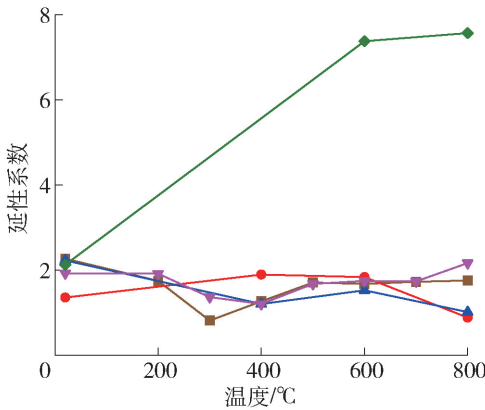
力计算式

$$N_u(T_{\max}) = \varphi [k_c f_c A_c + f_y'(T_{\max}) A_s + f_a'(T_{\max}) A_a] \tag{8}$$

式中各参数见文献[28];高温后型钢再生混凝土偏压柱受再生粗骨料取代率影响较大,取代率增加,试件极限承载力和初始刚度变化较小,但变形及延性随之增加;并给出高温后偏压柱的抗弯刚度计算公式^[29]. 试件极限承载力和位移延性系数受温度及再生粗骨料取代率影响曲线,见图9、10.



(a) 温度对极限承载力的影响

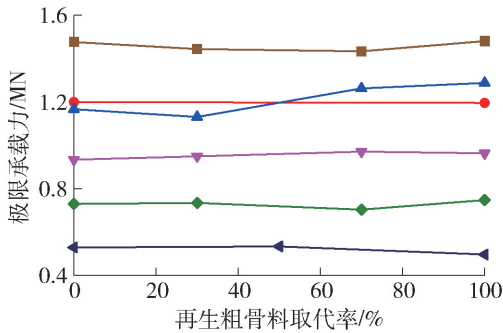


(b) 温度对延性系数的影响

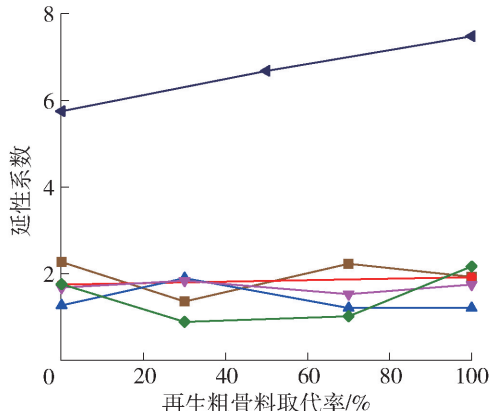
— $r=0\%$ ^[28] — $r=30\%$ ^[28] — $r=70\%$ ^[28]
— $r=100\%$ ^[28] — $r=100\%$ ^[29]

图9 温度对极限承载力及延性系数的影响

Fig. 9 Influence of temperature on the ultimate bearing capacity and ductility coefficient



(a) 取代率对极限承载力的影响



(b) 取代率对延性系数的影响

— $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[28] — $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[28] — $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[28]
— $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[28] — $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[28] — $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[29]

图10 取代率对极限承载力及延性系数的影响

Fig. 10 Influence of replacement ratios on the ultimate bearing capacity and ductility coefficient

综上,有关高温后型钢再生混凝土柱力学性能的研究尚少,主要以静载试验为主,缺少高温后型钢再生混凝土柱低周反复荷载下抗震性能及多荷载耦合作用下的力学性能研究,亟待深化研究. 高温后型钢再生混凝土柱压弯承载力的计算方法与公式也有待完善.

2 钢管再生混凝土柱

2.1 压弯性能

2.1.1 轴压性能

Konno 等^[31-32]、马辉等^[33-34]通过钢管再生混凝土柱轴压性能试验发现其受力破坏过程及破坏形态与钢管普通混凝土柱类似,其承载力略有降低;而Mohanraj 等^[35]、Malathy 等^[36]、牛海成等^[37]研究发现钢管再生混凝土柱承载力平均值较普通混凝土柱高. 部分文献中极限承载力和再生粗骨料取代率的关系曲线,见图11.

马辉等^[33,38]研究发现试件均是内部型钢先于钢管屈服,表面发生外鼓变形破坏,核心再生混凝土

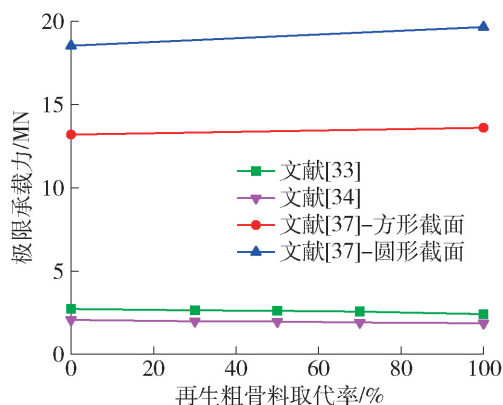


图 11 取代率对承载力的影响

Fig. 11 Influence of replacement ratios on the ultimate bearing capacity

主要发生剪切破坏和压溃破坏;随着再生粗骨料取代率的增加,试件极限承载力随之下降,见图 11,最大降幅 11.5%,刚度退化缓慢,损伤度、延性及耗能能力呈递增趋势;轴压承载力随长细比的增加而减小,但变形性能变化较小;减小钢管径厚比、增大型钢配钢率既可提高其轴压承载力又可改善其变形性能;基于试验数据和极限分析法提出考虑再生粗骨料取代率和长细比影响的轴压承载力计算式

$$N = \eta \varphi A_c f_{rc} (1 + 1.04\theta + 1.04 \sqrt{\theta} + \zeta) \quad (9)$$

$$\eta = 0.77 + 0.015r^2 - 0.069r \quad (10)$$

$$\varphi = 0.97 - 0.00025\lambda^2 + 0.004\lambda \quad (11)$$

$$\theta = A_t f_{ty} / (A_c f_{rc}) \quad (12)$$

$$\zeta = A_s f_{sy} / (A_c f_{rc}) \quad (13)$$

式中各参数见文献[38];建议组合短柱中再生粗骨料取代率为 70%。

牛海成等^[37,39]进行了方/圆钢管高强再生混凝土柱轴压性能试验,通过对比分析发现方/圆钢管再生混凝土柱的耗能能力较方/圆钢管普通混凝土试件高 19% 和 43%,圆形截面较方形截面提高比例大,延性提高与之相似;相同条件下,圆形截面试件较方形截面试件,承载力高 40% 以上,耗能能力高 188% 以上;钢管内配置钢筋笼能显著提高试件承载力、耗能能力及延性;运用已有的统一强度理论^[40-41]和叠加强度理论^[42-43]计算柱轴压承载力并与试验值比较,发现圆形截面试件承载力较偏于安全;利用叠加原理和尺寸效应提出方形截面试件轴压承载力计算公式

$$N_u = A_s f_y + 5.28B^{-0.30} f_{ck} A_c \quad (14)$$

式中各参数见文献[39]。

马辉等^[34]采用 ABAQUS 软件,进行方钢管再生

混凝土短柱轴压性能全过程非线性分析,结果发现有限元分析结果与试验结果吻合较好,验证了有限元模型的有效性;适当提高型钢配钢率和混凝土强度可提高承载力;方钢管再生混凝土柱承载力高,变形能力较好,经合理设计可用于工程。

王振波等^[44]研究发现,掺入适量的膨胀剂能提高再生混凝土强度及钢管约束再生混凝土短柱的轴压极限荷载。张兆强等^[45]以钢纤维掺量和截面含钢率为设计参数,对 25 个方钢管钢纤维再生混凝土(再生粗骨料取代率 75%)短柱进行轴压性能试验,结果表明:钢纤维的掺入对试件的破坏形态影响较小,但延性位移系数随着钢纤维掺量的增加而增大,见图 12(a);试件轴压承载力在钢纤维掺量 1.5% 内有所提高,但大于 2.0% 后,承载力随掺量的增大而减小,见图 12(b),且降幅随掺量的增加而增大,建议掺量为 1.0% ~ 1.5%;截面含钢率的增大可提高试件承载力及延性;基于统一强度理论^[46]提出承载力计算公式。

2.1.2 偏压性能

陈宗平等^[47]进行方钢管再生混凝土长柱偏心受压静载试验,研究表明其受力破坏形态、变形特征及截面应变分布等与普通混凝土试件基本相似,且同样具有良好的承载力和变形性能;承载力因再生骨料取代率的增减变化较小,但随长细比和偏心距的增大而降低,且偏心距的降幅随长细比的增加而增大,见图 13;通过国内外不同规范计算结果对比,文献[41,48]公式比较适合压弯状态下方钢管再生混凝土长柱承载力计算。余小龙等^[49]研究发现,方钢管再生混凝土长柱偏心受压承载力随取代率的增加而有减小的趋势,见图 13(a),随钢管壁厚增大而承载力增大;轴向刚度受长细比和偏心率影响很小;长细比及偏心率越大,柱中侧向挠度越大,但取代率对其影响很小。

曹万林等^[50]进行圆钢管高强(C70)再生混凝土柱重复加载偏压试验,研究发现其受压损伤发展过程、刚度退化过程以及破坏形态与圆钢管普通混凝土柱基本相同,试件破坏形态见图 14,图中编号含义见文献[50];其承载力、耗能能力及延性均较普通混凝土柱有不同程度提高,骨架曲线见图 15;截面应变符合平截面假定;建议采用现有规程^[43,51]计算其偏心受压承载力。

肖建庄等^[52]研究了钢管/玻璃纤维增强塑料(glass fiber reinforced plastics, GFRP)管约束再生混凝土(再生粗骨料取代率 100%)柱偏心受压承载

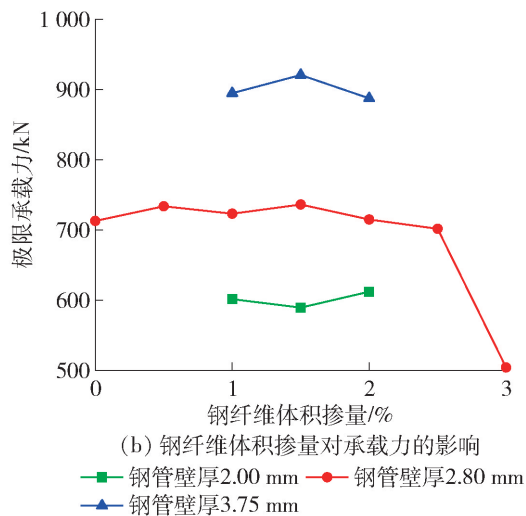
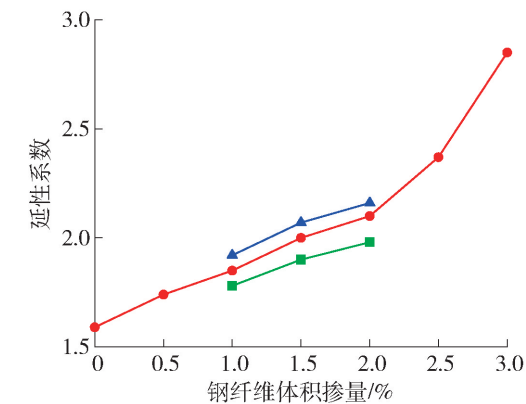


图 12 钢纤维体积掺量对承载力和延性系数的影响
Fig. 12 Effect of volume content of steel fiber on bearing capacity and ductility coefficient

力,发现其承载力较钢管/GFRP 管约束普通混凝土试件降 20% 左右,且 GFRP 管约束试件较钢管试件低,使用膨胀剂可缩小二者间的差距,即膨胀剂对 GFRP 管约束试件的效果较钢管试件大;参加膨胀剂可提高钢管/GFRP 管约束试件极限承载力,但对 GFRP 管约束试件效果更明显;试件变形能力由大到小依次为 GFRP 管约束试件、钢管约束试件、同类普通混凝土试件;钢管和 GFRP 管约束再生混凝土偏心受压柱承载力计算可分别参考文献[53]、[54]提出的公式。

闻洋等^[55]采用试验对照、正交试验法和 SPSS 软件对影响薄壁钢管再生混凝土柱(长柱、中长柱及短柱)轴压承载力的敏感因素及敏感程度进行了对比分析,研究发现长柱承载力敏感程度由强到弱依次为长细比(50~60)、含钢率(5%~11%)、取代率(20%~60%);中长柱由强到弱依次为含钢率(3.8%~7.9%)、取代率(20%~60%)、长细比

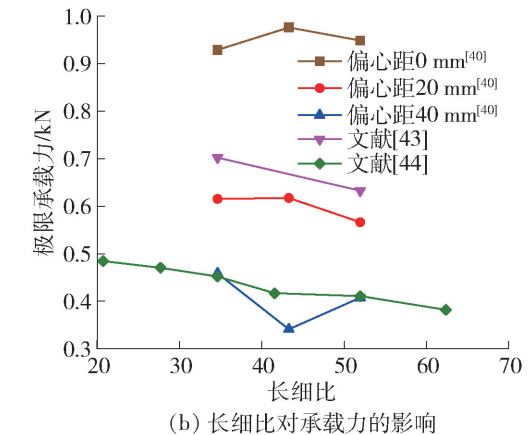
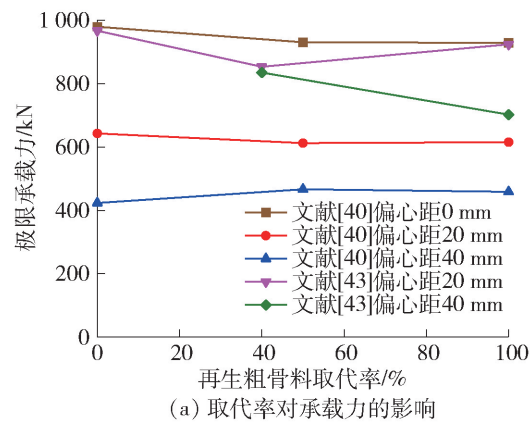


图 13 承载力受取代率和长细比的影响
Fig. 13 Bearing capacity affected by replacement ratio and slenderness ratio

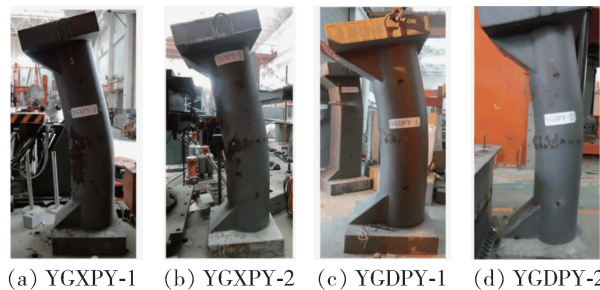


图 14 试件破坏形态
Fig. 14 Specimen failure patterns

(25~35);短柱由强到弱依次为含钢率(3.8%~7.7%)、混凝土强度(C35~C40)、取代率(20%~35%),括号中的数值是各影响因素相应的取值范围。

Li 等^[56]利用 ABAQUS 有限元软件对再生钢管混凝土短柱的承载力进行非线性分析,阐述钢管与核心混凝土界面的接触及建模要点,提出用于受压承载力分析的核心再生混凝土本构关系修正公式,并通过仿真试验给出了极限承载力计算公式。

综上,钢管再生混凝土柱受压性能研究相对

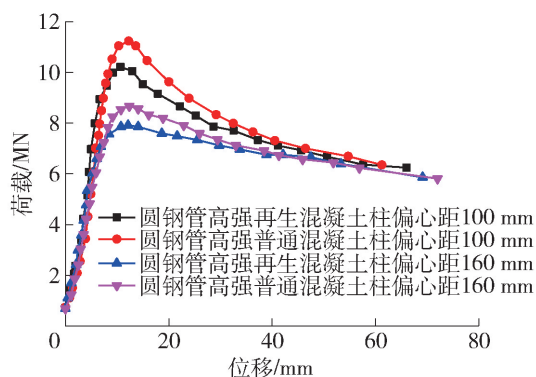


图 15 骨架曲线

Fig. 15 Skeleton curve

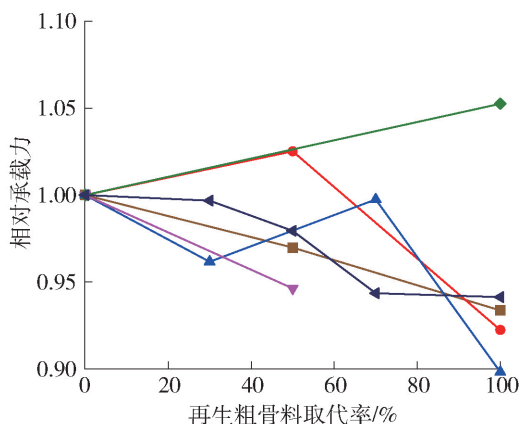
较多,但不同的研究者所得到的部分研究结论并不一致,如取代率与承载力间的变化关系,有的研究者则认为采用已有的钢管混凝土柱计算式可满足钢管再生混凝土柱计算的精度要求,也有研究者则认为需要考虑再生粗骨料取代率的影响,否则不能满足安全要求。目前,钢管再生混凝土柱受力性能研究,主要以单一受力为主,多种荷载耦合作用下的研究尚未见到;虽已开展有限元分析,但涉及影响参数有限,需要更多的有限元分析与试验研究相互验证。

2.2 抗震性能

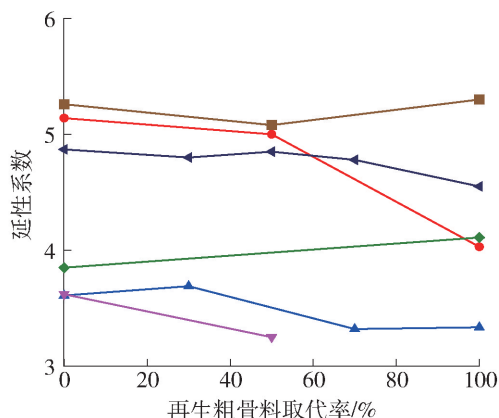
董宏英等^[57]、孟二从等^[58]、韩彰等^[59]、张锐等^[60]、黄一杰等^[61]为研究钢管再生混凝土柱抗震性能,进行拟静力试验,结果发现其受力破坏过程及破坏形态与钢管普通混凝土柱相似,表现为钢管底部的鼓曲破坏。多数研究者发现试件的承载力及延性随再生粗骨料取代率的增加而减小,但也有研究者得出与之相反的结论,见图 16,图中纵坐标是以普通混凝土试件为基数的相对承载力。

董宏英等^[57]研究发现:试件承载力随剪跨比增大而减小;轴压比大的试件承载力有所提高,但延性变差;各试件滞回曲线比较饱满,位移延性系数均大于 4,抗震性能良好;采用现行规范中圆钢管混凝土柱轴压承载力计算式,考虑修正系数,可用于圆钢管再生混凝土柱的承载力计算。陈宗平等^[62]研究发现随着长细比的增加,圆钢管再生混凝土柱耗能能力增加,位移延性系数、特征点强度及刚度减小;试件钢管壁厚变化对试件强度影响明显,对位移延性系数影响不明显。Yang 等^[63-64]研究表明,圆钢管再生混凝土柱具有较好的延性及耗能能力。

孟二从等^[58]研究再生粗骨料取代率对方钢管



(a) 取代率对承载力的影响



(b) 取代率对延性的影响

—剪跨比2.5^[57] —剪跨比3^[57] —文献[58]
—文献[59] —文献[60] —文献[61]

图 16 取代率对承载力和延性的关系曲线

Fig. 16 Relation curve of replacement ratio to bearing capacity and ductility

再生混凝土柱抗震性能的影响,结果发现试件耗能及刚度退化随取代率增减无明显变化。韩彰等^[59]研究发现,方钢管再生混凝土柱的承载力、刚度、延性及耗能能力均随再生粗骨料取代率增加而降低,但增大含钢率可提高上述性能。张锐等^[60]研究发现取代率对方钢管再生混凝土柱的各项性能影响有限,其承载性能、延性指标、滞回性能和耗能能力依然满足规范要求,可将其用于抗震设防地区。王成刚等^[65]研究发现钢管壁厚、轴压比和长细比不同的方钢管再生混凝土柱的滞回曲线大致相同且曲线饱满,其抗震性能较好。

黄一杰等^[61]对钢管再生混凝土柱抗震性能及损伤进行分析,研究发现再生粗骨料取代率和混凝土强度对试件的延性及耗能性能影响较小;黏结滑移考虑与否对试件承载力及抗震性能影响不明显;基于耗能的疲劳寿命模型,以 Miner^[66] 损伤理论为基础建立的适合圆钢管再生混凝土柱的累积损伤模

型见公式

$$D = \sum_{j=1}^n D_j = \sum_{j=1}^n \left(\sum_i^m \left(\frac{E_c^i}{E_{cz}} \right) \right) \quad (15)$$

式中各参数见文献[61];损伤指数随取代率增加而略有增大。张向冈等^[67]研究发现,随着取代率的增加,圆钢管再生混凝土柱损伤指标 D 无明显统一变化规律,而方钢管再生混凝土试件损伤指标随之增大,指出基于变形^[68]、耗能^[66]及形变和耗能^[69]3种地震损伤评估模型均可用于钢管再生混凝土柱的损伤分析,单参数评估模型简单实用,计算量小,但不能准确反映地震损伤破坏,而双参数评估模型能较好解释试件地震损伤破坏机理,但计算量大且尚无统一的组合系数表达式。

吴波等^[70]进行不同钢管壁厚的薄壁圆钢管再生混凝土柱在往复荷载作用下的拟静力试验,结果发现:废弃混凝土取代率0~40%时,除试件水平承载力有所降低外,其他各项性能变化很小;横截面面积和总用钢量一定时,薄壁圆钢管再生混凝土柱的水平承载力大多优于螺旋箍筋柱;钢管壁厚仅1.78 mm(径厚比168.5)的钢管再生混凝土柱,在轴压比0.4时,极限位移角可达1/25,具有良好变形能力,满足现行抗震规范要求。李祝情等^[71]得出相似结论。

李兵等^[72-73]采用ABUQUS有限元软件分析再生骨料取代率、含钢率、轴压比和长细比4个对方钢管再生混凝土柱抗震性能的影响,核心再生混凝土的本构关系采用改进的本构关系^[56],结果发现:方钢管再生混凝土柱的抗震性能总体上略弱于方钢管普通混凝土柱,但当再生骨料取代率较低时,其抗震性能优于方钢管普通混凝土试件;钢管再生混凝土柱具有较好的滞回性能,但其含钢率、轴压比和长细比需合理设计,才能充分发挥其性能。张向冈等^[74]以再生粗骨料取代率、含钢率、钢材型号和轴压比为设计参数,对圆钢管再生混凝土柱的抗震性能进行有限元分析,其中核心再生混凝土本构模型基于韩林海模型^[75]和相关研究^[76]拟合得到,引入取代率影响因子,研究发现:再生粗骨料取代率在0~100%范围内,以10%为级差变化时,试件滞回曲线和骨架曲线变化很小,位移延性系数和耗能系数变化幅度均在5%内;基于抗震性能指标考量,圆钢管再生混凝土柱应用于实际工程是可行的。

综上,目前对钢管再生混凝土柱抗震性能的研究表明其抗震性能虽较钢管普通混凝土柱略差,但仍具有较好的延性及耗能能力,可将其应用于实际

工程中。同时,也存在研究因素不全、部分研究结论矛盾或研究不够深入等问题,如材料强度对试件性能影响研究很少、再生骨料取代率对试件性能影响规律不统一、试件抗震损伤评估模型的确立等仍需深入研究。此外,在有限元软件模型当中,核心再生混凝土本构关系的选取也存在分歧,需进一步开展研究。

2.3 耐火性能

陈敏^[77]进行了44个高温后方钢管再生混凝土柱试件轴压性能试验和8个高温后方钢管再生混凝土柱试件抗震性能试验,设计参数包括再生粗骨料取代率、温度、冷却方式和套箍指标。1)轴压试件:由图17可见,试件承载力随取代率的增加而呈波动性变化;延性系数在取代率低于30%时与之呈正比变化,大于30%时呈波动变化,取代率对试件延性的影响大于对承载力的影响;冷却方式对试件承载力也有一定程度的影响。由图18可见,温度对承载力和延性的影响均较大;套箍系数与承载力成正比变化。2)抗震试验试件:取代率对特征点荷载影响较小;冷却方式对极限承载力影响较小,对初始刚度影响较大,但对最大刚度退化影响不大;增大截面面积能大大提高承载力;增大套箍指标能减缓刚度退化。

刘文超等^[78]以混凝土强度和钢管壁厚为设计参数,对火灾后圆钢管再生混凝土柱进行轴压性能试验,研究发现:火灾后圆钢管再生混凝土柱的破坏形态表现为柱身向一侧弓起的屈曲破坏,且钢管上部变形严重;钢管壁厚较小时,混凝土材料对试件承载力影响较大,随着钢管壁厚的增加,混凝土材料影响减小;钢管壁厚(含钢率)是影响钢管混凝土柱承载力的主要因素,钢管壁厚5 mm的试件较钢管壁厚4 mm的试件极限承载力提高分别为11%(普通混凝土)、16%(100%再生粗骨料取代率)、21%(100%再生粗、细骨料取代率)。

柯晓军等^[79]研究发现,反复荷载作用下方钢管再生混凝土柱高温前后的主要受力过程及破坏形态相似,均表现为钢管底部鼓曲破坏;高温后试件抗震性能随再生粗骨料取代率的增减而呈波动性变化,但幅度不大,见图18(a);随着受热温度的增加,承载力略有降低,延性先降后增,300℃时性能劣化较为突出,见图18(b)。

罗超宁等^[80]进行了3个足尺钢管再生混凝土柱的耐火性能试验并采用ABAQUS有限元软件对其进行了模拟,结果显示钢管再生混凝土柱的耐火

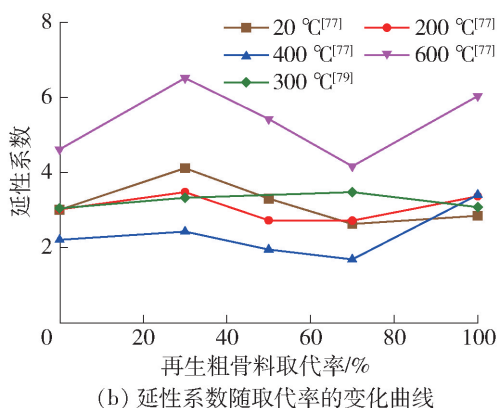
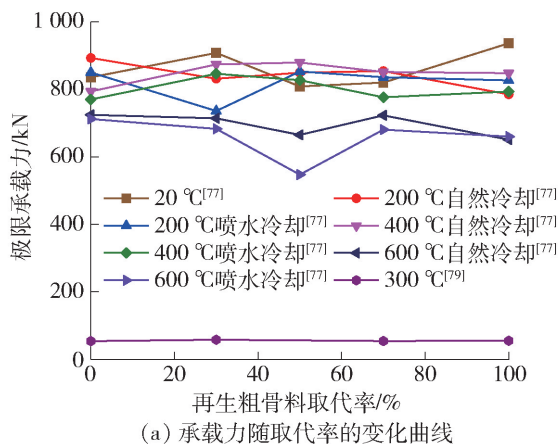


图 17 取代率对极限承载力和延性的影响

Fig. 17 Influence of replacement ratios on the ultimate bearing capacity and ductility coefficient

极限大于钢管普通混凝土柱,这是再生混凝土的导热系数较普通混凝土低的缘故;有限元分析结果与试验结果符合较好;基于等效面积原则,对套箍系数进行折减,得到常温下钢管再生混凝土柱轴压承载力计算式

$$N_{rc} = (A_s + A_{rc})f_{src} \quad (16)$$

基于钢管和再生混凝土平均温度算式,得到高温下钢管再生混凝土柱轴压承载力计算式

$$N_{src} = (A_s + A_{rc})f_{src}(T(t)) \quad (17)$$

式(16)~(17)中各参数见文献[80].

Yang等^[81-82]、杨有福等^[83]对高温后钢管再生混凝土短柱力学性能及钢管再生混凝土柱耐火性能进行数值模拟,分析表明,截面尺寸和长细比是影响钢管再生混凝土柱耐火极限与火灾下承载力的主要因素,而再生粗骨料取代率、含钢率、材料强度和偏心率对其影响较小;提出了预测钢管再生混凝土柱耐火极限计算的简化公式.姜舟等^[84]通过有限元分析发现,长细比、荷载比和截面周长是影响偏压矩形钢管再生混凝土柱抗火性能的主要因素,长细比越大耐火极限越小,膨胀变形越大,荷载比越大耐火

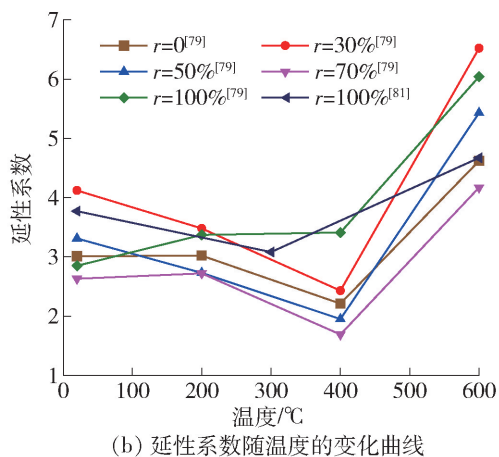
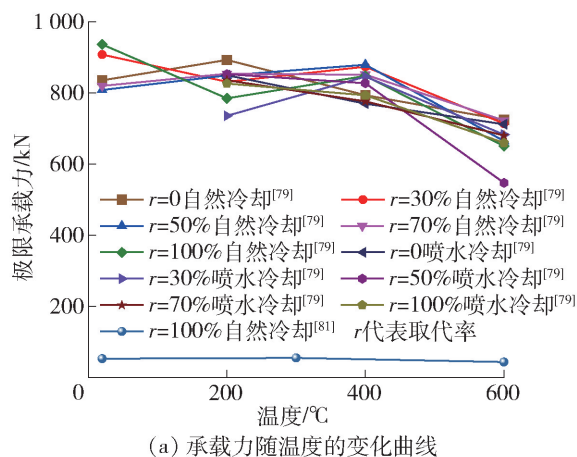


图 18 温度对极限承载力及延性系数的影响

Fig. 18 Influence of temperature on the ultimate bearing capacity and ductility coefficient

极限越小且膨胀变形越小,截面周长越大耐火极限越大且膨胀变形越大,偏心率对耐火极限和膨胀变形影响较小.

综上,目前有关高温后钢管再生混凝土柱的轴压性能和抗震性能的研究相对较多,对其偏心受压性能的研究较少,而实际工程中以偏心受压居多;研究中虽涉及再生细骨料取代试件的研究,但取代率为100%,没有其他取代率的研究,需要进行更多的细化研究,才更具参考价值.

3 结论及展望

本文重点分析型钢再生混凝土柱和钢管再生混凝土柱的压弯性能、抗震性能及耐火性能研究现状.研究表明:钢-再生混凝土组合柱的受力过程及破坏形态与钢-普通混凝土组合柱类似,但因再生骨料取代天然骨料,钢-再生混凝土组合柱的压弯性能、抗震性能略弱于钢-普通混凝土组合柱,抗火性能略好于钢-普通混凝土组合柱,合理设计的钢-再

生混凝土组合柱可用于一定范围内的再生混凝土组合结构。但如下研究仍有待深化:

1) 对已有研究结论中相互矛盾的部分,需进行深化研究,阐明原因,支撑理论体系构建。

2) 有关钢-普通强度再生混凝土组合柱研究较多,而对于钢-高强/高性能再生混凝土组合柱研究较少,需要加强;目前钢-再生混凝土组合柱性能的研究,主要涉及再生粗骨料取代试件,再生细骨料取代的钢管再生混凝土试件是否也可用于工程,相关研究很少,需深化开展。

3) 开展钢-再生混凝土组合柱试验研究较多,相对的有限元理论建模和数值模拟分析较少,究其原因,再生混凝土本构关系的选取是个难点问题,这正是精细化有限元建模的关键。在试验研究基础上,需要深入开展考虑核心再生混凝土约束效应的钢-再生混凝土柱精细化有限元分析,使试验研究与数值模拟相互验证、相互补充。

4) 实际工程环境复杂且受多种荷载共同作用,开展多因素耦合作用下钢-再生混凝土组合柱性能的研究,对科学指导工程实践是必要的。

5) 目前,虽已有学者通过试验研究提出一些改善钢-再生混凝土组合柱受力性能的措施,但总体上仍需深化探索。

6) 亟须研究钢-再生混凝土柱性能化抗震设计方法,并将其合理用于再生混凝土结构的抗震设计。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1-10.
- [2] OLORUNSOGO F T, PANDAYACHEE N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes[J]. Cement Concrete Research, 2002, 32(8): 179-185.
- [3] HANSEN T C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state of the art report developments 1945—1985[J]. Materials and Structures, 1986, 19(3): 201-246.
- [4] PADMINI A K, RAMAMURTHY K, MATHEWS M S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 829-836.
- [5] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C Z. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete and overview[J]. Materials and Structure, 2006, 39(6): 655-664.
- [6] 曹万林, 赵羽习, 叶涛萍. 再生混凝土结构长期工作性能研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 1-17.
- CAO W L, ZHAO Y X, YE T P. A review of recent advances in the long-term working characteristic of recycled concrete structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 1-17. (in Chinese)
- [7] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-8.
- [8] 薛建阳, 崔卫光, 陈宗平, 等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7): 73-76.
- XUE J Y, CUI W G, CHEN Z P, et al. Experimental study on axial compressive behaviors of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns[J]. Building Structure, 2013, 43(7): 73-76. (in Chinese)
- [9] 王妮, 陈宗平, 李启良, 等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 133-141.
- WANG N, CHEN Z P, LI Q L, et al. Experimental study on the behavior of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns under axial compression loading[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 133-141. (in Chinese)
- [10] 梁炯丰, 张广武, 胡明华, 等. 型钢部分包裹再生混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 48(8): 72-75, 42.
- LIANG J F, ZHANG G W, HU M H, et al. Experimental study on mechanical properties of section steel partially encased recycled aggregate concrete short columns under axial compression[J]. Building Structure, 2019, 48(8): 72-75, 42. (in Chinese)
- [11] 陈宗平, 应武挡, 陈宇良. 型钢再生混凝土柱的正截面极限承载力计算[J]. 混凝土, 2013(10): 10-13.
- CHEN Z P, YING W D, CHEN Y L. Research on the ultimate bearing capacity calculation of steel reinforced recycled concrete columns[J]. Concrete, 2013(10): 10-13. (in Chinese)
- [12] 陈宗平, 钟铭, 陈宇良, 等. 型钢再生混凝土偏压柱受力性能试验及承载力计算[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 160-170.
- CHEN Z P, ZHONG M, CHEN Y L, et al. Mechanical behavior and computed bearing capacity of steel reinforced recycled-aggregate-concrete columns under eccentric loading[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 160-170. (in Chinese)
- [13] 梁炯丰, 蒋涛, 王俭宝, 等. 型钢部分包裹再生混凝土偏心受压短柱(强轴)受力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(8): 76-79.

- LIANG J F, JIANG T, WANG J B, et al. Experimental study on mechanical behavior of section steel partially encased recycled aggregate concrete short columns (strong axis) subjected to eccentric compression [J]. Building Structure, 2019, 49(8): 76-79. (in Chinese)
- [14] 薛建阳, 林建鹏, 马辉, 等. 型钢再生混凝土偏心受压柱刚度及变形分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(8): 109-113.
- XUE J Y, LIN J P, MA H, et al. Stiffness and deformation analysis of steel reinforced recycled concrete eccentric compression columns [J]. Industrial Construction, 2013, 43(8): 109-113. (in Chinese)
- [15] 薛建阳, 马辉, 陈宗平, 等. 型钢再生混凝土柱保护层厚度力学分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 202-206.
- XUE J Y, MA H, CHEN Z P, et al. Mechanical analysis on the cover thickness of steel reinforced recycled concrete column[J]. Engineering Mechanical, 2013, 30(5): 202-206. (in Chinese)
- [16] 薛建阳, 孟刚, 刘祖强, 等. 型钢再生混凝土组合柱正截面受力性能的有限元分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(9): 23-29.
- XUE J Y, MENG G, LIU Z Q, et al. Finite-element analysis of mechanical behaviors of normal cross-section of steel recycled aggregate concrete composite columns [J]. Industrial Construction, 2013, 43(9): 23-29. (in Chinese)
- [17] 曹万林, 郭晏利, 乔崎云, 等. 型钢再生混凝土高轴压比柱抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 47-55.
- CAO W L, GUO Y L, QIAO Q Y, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled concrete columns with high axial compression ratio[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 47-55. (in Chinese)
- [18] 薛建阳, 马辉, 刘义. 反复荷载下型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(1): 36-46.
- XUE J Y, MA H, LIU Y. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete columns under low-cyclic reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 36-46. (in Chinese)
- [19] 马辉, 薛建阳, 刘云贺, 等. 型钢再生混凝土组合柱水平承载力试验及计算方法研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4): 455-468.
- MA H, XUE J Y, LIU Y H, et al. Analysis on the calculation methods of the horizontal bearing capacity for steel reinforced recycled concrete composite columns[J]. Journal of Experimental Mechanical, 2015, 30(4): 455-468. (in Chinese)
- [20] 薛建阳, 马辉. 不同剪跨比下型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2013, 33(4): 228-234.
- XUE J Y, MA H. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled concrete column under different shear-span ratios [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 228-234. (in Chinese)
- [21] 马辉, 李宁, 薛建阳. 低周反复荷载作用下型钢再生混凝土柱延性分析[J]. 建筑结构, 2014, 44(15): 51-56.
- MA H, LI N, XUE J Y. Ductility analysis on steel reinforced recycled concrete columns under the low cyclic loading[J]. Building Structure, 2014, 44(15): 51-56. (in Chinese)
- [22] 马辉, 毛肇玮, 薛建阳, 等. 型钢再生混凝土组合柱轴压比限值研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(4): 50-55.
- MA H, MAO Z W, XUE J Y, et al. Study on the limit value of axial compression ratio of steel reinforced recycled concrete composite columns [J]. Building Structure, 2016, 46(4): 50-55. (in Chinese)
- [23] 刘祖强, 薛建阳, 马辉, 等. 型钢再生混凝土柱正截面承载力试验及数值模拟[J]. 工程力学, 2015, 32(1): 81-87, 95.
- LIU Z Q, XUE J Y, MA H, et al. Testing and numerical simulation of the normal cross-section bearing capacity of steel reinforced recycled concrete columns [J]. Engineering Mechanical, 2015, 32(1): 81-87, 95. (in Chinese)
- [24] British Standards Institution. BS 5400, steel, concrete and composite bridges, part 5: code of practice for design of composite bridges [S]. London: British Standards Institutions, 2005.
- [25] British Steel. SHS design manual for concrete filled columns, parts 1, structural design [S]. London: British Steel, 1992.
- [26] 薛建阳, 刘锦禄, 马辉, 等. 型钢再生混凝土长柱恢复力模型的试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(9): 35-39, 161.
- XUE J Y, LIU J L, MA H, et al. Experimental study on restoring force model of steel reinforced recycled aggregate concrete columns[J]. Industrial Construction, 2013, 43(9): 35-39, 161. (in Chinese)
- [27] 薛建阳, 张杰, 马辉, 等. 低周反复荷载下型钢再生

- 混凝土长柱非线性数值模拟分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(9): 40-45.
- XUE J Y, ZHANG J, MA H, et al. Non-linear numerical simulation analysis of steel recycled aggregate concrete column under low-cycle reversed loading[J]. Industrial Construction, 2013, 43(9): 40-45. (in Chinese)
- [28] 陈宗平, 周春恒, 谭秋虹. 高温后型钢再生混凝土柱轴压性能及承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 70-81.
- CHEN Z P, ZHOU C H, TAN Q H. Axial compression performance and bearing capacity calculation of steel reinforced recycled concrete column under high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 70-81. (in Chinese)
- [29] 陈宗平, 叶培欢, 薛建阳, 等. 高温后型钢再生混凝土偏压柱的力学性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(11): 39-44.
- CHEN Z P, YE P H, XUE J Y, et al. Mechanical properties of steel reinforced recycled aggregate concrete eccentric compression column after high temperature[J]. Industrial Construction, 2014, 44(11): 39-44. (in Chinese)
- [30] 陈宗平, 周春恒. 高温后型钢再生混凝土柱损伤机理及刚度退化研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 129-137.
- CHEN Z P, ZHOU C H. Investigation on damage mechanism and rigidity degeneration of steel reinforced recycled concrete column after high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 129-137. (in Chinese)
- [31] KONNO K, SATO Y, KAKUTA Y, et al. Property of recycled concrete column encased by steel tube subjected to axial compression[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1997, 19(2): 231-238.
- [32] KONNO K, SATO Y, UEDA T, et al. Mechanical property of recycled concrete under lateral confinement[J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, 20(3): 287-292.
- [33] 马辉, 胡广宾, 李哲, 等. 取代率对圆钢管型钢再生混凝土组合短柱轴压性能影响研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 158-165.
- MA H, HU G B, LI Z, et al. Research on the influence of RCA replacement percentage on axial compression performance of recycled concrete filled circular steel tube-profile steel composite short column[J]. Industrial Construction, 2017, 47(5): 158-165. (in Chinese)
- [34] 马辉, 邹昌明, 王德法, 等. 方钢管型钢再生混凝土组合短柱轴压性能非线性分析[J]. 计算力学学报, 2018, 35(5): 627-634.
- MA H, ZOU C M, WANG D F, et al. Nonlinear analysis of axial compression behavior of recycled concrete filled square steel tube-profile steel composite short columns[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2018, 35(5): 627-634. (in Chinese)
- [35] MOHANRAJ E K, KANDASAMY S, MALATHY R. Behavior of steel tubular stub and slender columns filled with concrete using recycled aggregates[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2011, 53(2): 31-38.
- [36] MALATHY R, MOHANRAJ E K, KANDASAMY S. Comparative study on behaviour of concrete-filled steel tubular columns using recycled aggregates [C] // Excellence in Concrete Construction Through Innovation- Proceedings of the International Conference on Concrete Construction. London: CRC Press, 2009: 453-458.
- [37] 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 H C, CAO W L, DONG H Y, et al. Experimental research on high strength recycled concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 128-136. (in Chinese)
- [38] 马辉, 郭婷婷, 李哲, 等. 圆钢管型钢再生混凝土组合柱轴压性能及承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(2): 97-105.
- MA H, GUO T T, LI Z, et al. Axial compression performance and bearing capacity calculation of recycled concrete filled circular steel tube-profile steel composite columns[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2): 97-105. (in Chinese)
- [39] 牛海成, 曹万林, 周中一, 等. 足尺方钢管高强再生混凝土柱轴压试验[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(3): 395-402.
- NIU H C, CAO W L, ZHOU Z Y, et al. Full-scale test on the performance of high-strength recycled concrete-filled square steel tube columns under axial compression[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(3): 395-402. (in Chinese)
- [40] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论: 研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 36-54.
- [41] 福建省住房和城乡建设厅. 钢管混凝土结构技术规范: DBJ 13—51—2003 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [42] AISC. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American

- Institute of Steel Construction, 1999.
- [43] Architectural Institute of Japan. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S]. Tokyo, Japan: Architectural Institute of Japan, 1997.
- [44] 王振波, 刘飞, 华竹君, 等. 膨胀剂对钢管再生混凝土柱轴压性能影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(1): 44-46.
- WANG Z B, LIU F, HUA Z J, et al. Influence of expansive agent on recycled concrete filled steel tube columns under axial compression[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(1): 44-46. (in Chinese)
- [45] 张兆强, 赵均海, 邓勇军. 方钢管钢纤维再生混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(11): 168-174.
- ZHANG Z Q, ZHAO J H, DENG Y J. Experimental research on axial compression behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete-filled square steel tubular short columns[J]. Industrial Construction, 2018, 48(11): 168-174. (in Chinese)
- [46] 俞茂宏. 强度理论新体系[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- [47] 陈宗平, 郑述芳, 李启良, 等. 方钢管再生混凝土长柱偏心受压承载性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 21-29.
- CHEN Z P, ZHENG S F, LI Q L, et al. Experimental study on behavior of recycled aggregate concrete filled square steel tubular long columns under eccentric compression loading[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9): 21-29. (in Chinese)
- [48] 海军后勤学院. GJB 4142—2000: 战时军港抢修早强型组合结构技术规程[S]. 北京: 中国人民解放军总后勤部, 2000.
- [49] 余小龙, 王成刚, 柳炳康, 等. 方钢管再生混凝土长柱偏心受压试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(8): 1110-1116.
- YU X L, WANG C G, LIU B K, et al. Experimental study of the behavior of recycled aggregate concrete filled square steel tubular long columns under eccentric compression [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40(8): 1110-1116. (in Chinese)
- [50] 曹万林, 牛海成, 周中一, 等. 圆钢管高强再生混凝土柱重复加载偏压试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12): 31-37.
- CAO W L, NIU H C, ZHOU Z Y, et al. Experimental study on high strength recycled concrete-filled circular steel tube columns under repeated eccentric loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12): 31-37. (in Chinese)
- [51] 中国工程建设标准化协会. CECS 28: 90: 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.
- [52] 肖建庄, 刘胜, TRESSERRAS J. 钢管/GFRP 管约束再生混凝土柱偏心受压试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(2): 21-26.
- XIAO J Z, LIU S, TRESSERRAS J. Eccentric loading test on recycled aggregate concrete columns confined by steel tube/GFRP tube [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(2): 21-26. (in Chinese)
- [53] 中国工程建设协会. CECS 28: 2012: 钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [54] BISBY L, RANGER M. Axial-flexural interaction in circular FRP-confined reinforced concrete columns [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(9): 1672-1681.
- [55] 闻洋, 张迎春, 梁东旭, 等. 薄壁钢管再生混凝土柱轴压敏感因素对比分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(5): 777-785.
- WEN Y, ZHANG Y C, LIANG D X, et al. Contrastive analysis on the axial compression sensitive factors of thin-walled steel tube recycled concrete columns[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(5): 777-785. (in Chinese)
- [56] LI B, ZHANG Q, MENG S. Finite element analysis of recycled concrete filled circular steel tubular stub columns under compressive loading[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(1): 263-268.
- [57] 董宏英, 谢翔, 曹万林, 等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(10): 1096-1106.
- DONG H Y, XIE X, CAO W L, et al. Experiment on seismic performance of recycled aggregate concrete filled circular steel tube columns [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(10): 1096-1106. (in Chinese)
- [58] 孟二从, 苏益声, 陈朋朋, 等. 低周反复荷载下方钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(4): 790-797.
- MENG E C, SU Y S, CHEN P P, et al. Experimental study on seismic behavior of recycled-concrete filled square steel tube columns under cyclic reversed loading [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2015, 40(4): 790-797. (in Chinese)
- [59] 韩彰, 龚玉云. 方钢管再生混凝土柱的抗震性能试验及设计参数影响分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(21): 54-62.

- HAN Z, GONG Y Y. Analysis on seismic performance and design influence factors of recycled concrete filled steel tube columns [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(21): 54-62. (in Chinese)
- [60] 张锐, 王成刚, 张传兵, 等. 方钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(3): 369-372.
- ZHANG R, WANG C G, ZHANG C B, et al. Experimental research on seismic behavior of square steel tubular column filled with recycled aggregate concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2015, 38(3): 369-372. (in Chinese)
- [61] 黄一杰, 肖建庄. 钢管再生混凝土柱抗震性能与损伤评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 330-335, 354.
- HUANG Y J, XIAO J Z. Seismic behavior and damage assessment of recycled aggregate concrete-filled steel tube columns [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(3): 330-335, 354. (in Chinese)
- [62] 陈宗平, 张向冈, 薛建阳, 等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能与影响因素分析[J]. 工程力学, 2016, 33(6): 129-137.
- CHEN Z P, ZHANG X G, XUE J Y, et al. Analysis on seismic performance and influence factors of recycled concrete filled circular steel-tube columns [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(6): 129-137. (in Chinese)
- [63] YANG Y F, HAN L H, ZHU L T. Experimental performance of recycled aggregate concrete-filled circular steel tubular columns subjected to cyclic flexural loadings [J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12(2): 183-194.
- [64] YANG Y F, HAN L H. Experimental behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Construction Steel Research, 2006, 62(12): 1310-1324.
- [65] 王成刚, 梁恒斌, 吴景春, 等. 方钢管再生混凝土柱滞回特性的试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(2): 135-142.
- WANG C G, LIANG H B, WU J C, et al. Experimental research on hysteresis characteristic of square recycled aggregate concrete filled steel tubular columns [J]. Industrial Construction, 2019, 49(2): 135-142. (in Chinese)
- [66] MINER M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [67] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳. 钢管再生混凝土柱的抗震破坏机理与损伤分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 174-182.
- ZHANG X G, CHEN Z P, XUE J Y. Analysis of seismic failure mechanism and damage for recycled aggregate concrete filled steel tube column [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 174-182. (in Chinese)
- [68] FAJFAR P. Equivalent ductility factors taking into account low-cycle fatigue [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21: 837-848.
- [69] PARK Y, ANG A. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 740-757.
- [70] 吴波, 赵新宇, 张金锁. 薄壁圆钢管再生混合柱的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 1-12.
- WU B, ZHAO X Y, ZHANG J S. Tests on seismic behavior of thin-walled circular steel tubular columns filled with Demolished Concrete Blocks [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 1-12. (in Chinese)
- [71] 李祝情, 肖景平, 王成刚, 等. 薄壁圆钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(3): 364-367, 432.
- LI Z Q, XIAO J P, WANG C G, et al. Experimental research on seismic behavior of circular thin-walled steel tubular columns filled with recycled aggregate concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2016, 39(3): 364-367, 432. (in Chinese)
- [72] 李兵, 孟爽, 嵇凤颖. 不同取代率方钢管再生混凝土柱抗震性能的研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(1): 78-85.
- LI B, MENG S, JI F Y. Finite element analysis of seismic performance of recycled concrete filled square steel tubular columns [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(1): 78-85. (in Chinese)
- [73] 李兵, 孟爽, 杨永生. 不同参数变化对方钢管再生混凝土柱抗震性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 11(6): 1066-1074.
- LI B, MENG S, YANG Y S. Effects of different parameters on seismic performance of recycled concrete filled square steel tubular columns [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2015, 11(6): 1066-1074. (in Chinese)
- [74] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 等. 圆钢管再生混凝土柱抗震性能影响因素有限元分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(2): 211-219.
- ZHANG X G, CHEN Z P, XUE J Y, et al. Finite

- element analysis of seismic performance influence factor for recycled aggregate concrete filled circular steel tube column[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(2): 211-219. (in Chinese)
- [75] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007: 712-737.
- [76] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳. 再生混凝土的物理与力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(6): 1684 - 1689.
- ZHANG X G, CHEN Z P, XUE J Y. Physical and mechanical performance of recycled aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(6): 1684-1689. (in Chinese)
- [77] 陈敏. 高温后方钢管再生混凝土柱力学性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- CHEN M. Study of recycled aggregate concrete-filled steel tube column on mechanical properties after high temperature[J]. Nanning: Guangxi University, 2016. (in Chinese)
- [78] 刘文超, 曹万林, 张建伟, 等. 火灾后钢管再生混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 45-50.
- LIU W C, CAO W L, ZHANG J W, et al. Experimental study on axial compression behavior of recycled concrete-filled steel tubular columns after fire exposure [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5): 45-50. (in Chinese)
- [79] 柯晓军, 安进, 苏益声, 等. 高温后方钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(6): 885-892.
- KE X J, AN J, SU Y S, et al. Experimental study on seismic performance of recycled aggregate concrete-filled square steel tube column after high temperature [J]. Journal of Experimental Mechanical, 2018, 33(6): 885-892. (in Chinese)
- [80] 罗超宁, 查晓雄. 钢管再生混凝土柱耐火性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 36(增刊2): 35-41.
- LUO C N, LI X X. Research on fire resistance of recycled concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Building Structures, 2016, 36(Suppl 2): 35-41. (in Chinese)
- [81] YNAG Y F, HOU R. Experimental behavior of RACFST stub columns after exposed to high temperature[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 59: 1-10.
- [82] YANG Y F, ZHANG L, DAI X H. performance of recycled aggregate concrete filled square steel tubular columns exposed to fire [J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(9): 1340-1356.
- [83] 杨有福, 张磊. 钢管再生混凝土柱的耐火极限[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 419-424, 431.
- YANG Y F, ZHANG L. Fire resistance of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 419-424, 431. (in Chinese)
- [84] 姜舟, 毛小勇. 偏压矩形钢管再生混凝土柱抗火性能有限元分析[J]. 江苏建筑, 2019(3): 33-36.
- JIANG Z, MAO X Y. Finite element analysis of fire resistance performance for recycled aggregate concrete filled rectangular steel tube (RACFRST) columns under eccentric loading [J]. Jiangsu Construction, 2019(3): 33-36. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)