

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.004

型钢再生混凝土组合结构受力性能研究现状及展望

马 辉¹, 毛肇玮¹, 薛建阳², 陈宗平³, 刘云贺¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 为进一步推广型钢再生混凝土组合结构的发展和应用, 本文在综合介绍组合结构研究背景的基础上, 重点分析了型钢与再生混凝土之间界面黏结滑移性能、型钢再生混凝土梁受弯及抗剪性能、型钢再生混凝土柱轴压、偏压性能及抗震性能、高温后型钢再生混凝土梁和柱受力性能、型钢再生混凝土梁柱节点及框架结构抗震性能等方面的研究现状, 指出了型钢再生混凝土组合结构受力性能研究有待进一步解决的问题, 并提出了相关研究建议及展望, 为该领域的深入研究及型钢再生混凝土组合结构的推广应用提供参考。

关键词: 型钢再生混凝土; 组合结构; 受力性能; 抗震性能; 研究现状

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)02-0149-09

A review on mechanical performance of steel reinforced recycled concrete composite structures

MA Hui¹, MAO Zhaowei¹, XUE Jianyang², CHEN Zongping³, LIU Yunhe¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to further promote the development and the application of steel reinforced recycled concrete (SRRC) composite structures, on the basis of introducing the research background of SRRC composite structure, this paper mainly analyzes the bond-slip performances between steel and recycled concrete, the flexure and shear performances of SRRC beams, the axial compression, eccentric compression and seismic performance of SRRC columns, the mechanical properties of SRRC beams and columns after high temperature, and the seismic performances of SRRC beam-column joints and frame structure. Some problems remaining to be further solved and suggestions for further studies of SRRC composite structure are also recommended, providing the technical reference for the popularization and application of SRRC composite structure.

Key words: steel reinforced recycled concrete; composite structure; mechanical performance; seismic performance; research status

随着我国建筑工业的急剧发展, 大量混凝土的使用导致砂、石等天然材料长期过度开采, 造成巨大的能源和资源消耗, 对我国的可持续发展带来了越来越严重的社会、经济以及生态环境问题。据中商产业研究院最新数据显示: 仅 2014 年, 我国商品混凝土产量就达 15.5 亿立方米, 与 2013 年相比增长

了 32.9%。与此同时, 由人类拆除、建造等建筑活动产生的建筑垃圾堆积如山; 另外, 地震、海啸及洪水等自然灾害也造成大量的建筑废弃物。2014 年度《我国建筑垃圾资源化产业发展报告》指出: 2014 年, 我国年建筑垃圾产生量超过 15 亿吨, 而全国再生利用率仅为 5% 左右。综上可知, 一方面是天然

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408485, 51178384); 中国博士后科学基金资助项目(2015M572585); 住房和城乡建设部科学技术计划资助项目(2015-K2-011); 陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目(20150114); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JQ5024); 西安市建设科技资助项目(SJW2014025); 西安理工大学科学研究计划资助项目(2015ZRPT003)

作者简介: 马辉, 男, 副教授, 博士, 研究方向为钢与混凝土组合结构及再生混凝土结构。E-mail: mahuiwell@163.com

不可再生资源的过度开采;另一方面是大量建筑废弃物对生态环境造成的严重污染。因此,如何合理有效地处理和利用这些大量建筑废弃物,已成为目前社会所必须面对和解决的重要问题之一。再生混凝土的提出为处理上述问题提供了有效手段,它既能实现对废弃混凝土的再次利用,又可解决大量建筑垃圾带来的环境问题。对此,国内外学者已进行了大量研究,国外等发达国家对废弃混凝土再利用研究的较早^[1-4],主要集中在对再生混凝土基本力学性能及耐久性的研究。我国对再生混凝土技术的研究起步较晚^[5-8],主要集中在再生骨料的生产加工,再生混凝土的配制,再生混凝土抗拉压、剪切等物理力学性能和耐久性能,钢筋再生混凝土结构及构件的静力学性能和抗震性能等。结果表明:与普通钢筋混凝土结构相比,由于再生混凝土力学性能逊色于普通混凝土,这就在一定程度上限制了再生混凝土的工程应用。

钢与混凝土组合结构能够有效提高构件及结构的各项力学性能^[9-10]。部分学者鉴于“组合结构”的力学性能优势,将再生混凝土应用于组合结构中以提高其结构或构件的受力性能。型钢再生混凝土组合结构就是其中一种组合形式,国外对于该组合结构的研究还未见报道,本文主要针对目前国内有关该组合结构的研究现状进行重点分析,主要包括型钢与再生混凝土之间界面黏结滑移性能、型钢再生混凝土梁受弯及抗剪性能、型钢再生混凝土柱轴压、偏压性能及抗震性能、高温后型钢再生混凝土梁柱受力性能、型钢再生混凝土梁柱节点及框架结构抗震性能等,为型钢再生混凝土组合结构的进一步研究和应用提供参考,并提出了需要进一步解决的问题及研究建议。

1 型钢与再生混凝土之间界面黏结滑移性能研究

型钢与再生混凝土之间能够协同工作的前提是两者之间具有足够的黏结强度,且两者之间的界面黏结滑移性能对组合结构的承载力、刚度变形、裂缝及耐久性等研究都具有直接的影响。对此,有关专家学者进行了深入研究:文献[11]的推出试验研究表明:加载端先于自由端出现滑移现象;沿型钢的埋置长度方向,黏结应力一般呈指数分布,且最大值出现在加载端附近;不同黏结部位的黏结应力不同:型钢翼缘内侧最高,外侧次之,型钢腹板处最小。文献[12]的研究表明:当取代率大于70%时,随取代率的增加,平均初始滑移强度和界面耗能能力呈增

大趋势;当取代率小于70%时,骨料取代率对界面耗能能力的影响不大。文献[13]的试验结果表明:型钢与再生混凝土之间的平均黏结强度大于钢管与再生混凝土之间的平均黏结强度;随混凝土强度的提高,黏结强度有一定提高。综上所述,目前关于型钢与再生混凝土界面间黏结滑移性能的研究都是基于单向荷载作用下的推出试验,而对于重复荷载作用下(如低周反复荷载、疲劳荷载等)、高温或火灾、低温及腐蚀环境下型钢与再生混凝土之间的黏结滑移性能尚未研究;同时,考虑增加抗剪连接件对型钢再生混凝土黏结滑移性能影响的研究也很少涉及。

2 型钢再生混凝土梁受力性能研究

2.1 抗弯性能

文献[14]对型钢再生混凝土梁的受弯性能进行了试验研究,试件的典型受弯破坏特征如图1所示。研究表明:型钢再生混凝土梁的破坏过程经历了弹性、弹塑性和破坏3个阶段;试件的荷载-挠度曲线(图2)的直线段较长,表现出良好的承载能力和变形性能。图3表明实验梁的抗弯承载力随着取代率的增加有所提高。文献[15]研究表明:型钢再生混凝土梁基本符合平截面假定;实验梁的开裂弯矩、极限承载力主要受纵向受力筋配筋率的影响,受骨料取代率的影响不大;在相同配筋率和荷载水平条件下,型钢再生混凝土梁的极限承载力及挠度大小与型钢普通混凝土梁相当。文献[16]研究表明:型钢再生混凝土梁的破坏形式与型钢普通混凝土梁形似;在相同配筋率条件下,再生粗骨料取代率对组合梁的极限承载力影响不大。

综上所述,目前关于型钢混凝土梁受弯性能的试验研究中考虑的影响因素不够全面,大多只考虑了再生骨料取代率、再生混凝土强度及钢筋配筋率的影响,而型钢配筋率、材料强度、混凝土保护层厚度等因素对构件受弯性能的影响也不容忽视;此外,对于长期荷载作用下型钢再生混凝土梁承载力、挠度及裂缝宽度等的研究尚还未涉及。



图1 型钢再生混凝土梁受弯典型破坏特征
Fig. 1 Typical flexural failure characteristics of SRRACB concrete beams

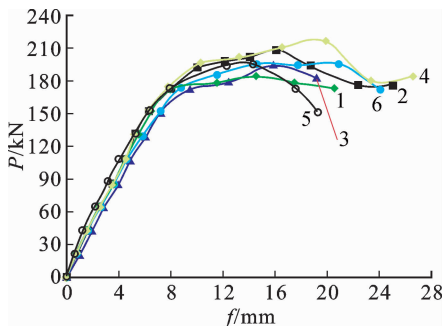


图2 受弯荷载-挠度曲线

Fig. 2 Curves of bending load-deflection

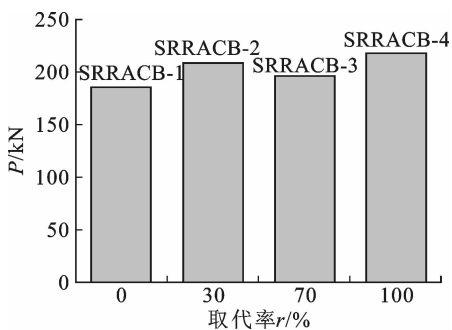


图3 取代率对受弯承载力的影响

Fig. 3 Influence of replacement ratio on the flexural bearing capacity

2.2 抗剪性能

文献[17]的试验研究表明:型钢再生混凝土梁主要发生剪切斜压破坏和弯剪破坏,再生骨料取代率对梁的受剪承载力影响不大(图4);试验梁的受剪承载力随着剪跨比的增加而降低,随混凝土强度的增大而增大。

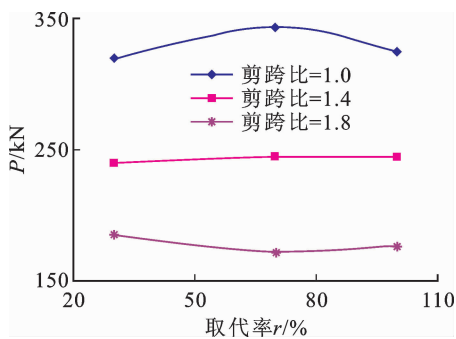


图4 取代率对梁受剪承载力的影响

Fig. 4 Influence of replacement ratio on the shear bearing capacity of beams

文献[18]的研究表明,与型钢普通混凝土梁相似,型钢再生混凝土梁的破坏过程经历了初裂、裂缝发展及试件破坏3个阶段,对试件形态破坏起关键性影响的因素是剪跨比。文献[19]结合试验研究,通过对试验数据拟合提出了型钢再生混凝土梁抗剪承载力计算公式。文献[20]结合 Monte-Carlo 法进

行了组合梁抗剪承载力的可靠度分析,分析结果表明:在所分析参数范围内,其可靠度指标能够满足现有规范对型钢再生混凝土梁抗剪承载力的要求,可应用于实际工程。综上所述:目前关于型钢再生混凝土梁抗剪性能的试验尚没有考虑在动荷载作用下的研究,也缺少型钢再生混凝土梁抗剪承载力参数扩展分析;此外,对设置抗剪连接件的型钢再生混凝土梁的受剪性能研究尚未涉及。

2.3 高温下型钢再生混凝土梁的力学性能研究

文献[21]进行了不同温度下型钢再生混凝土梁的受弯性能试验研究,结果表明:高温后型钢再生混凝土梁的破坏形态主要有弯曲破坏、黏结破坏和斜压破坏三种(图5),与常温下基本相同;400℃以上高温对梁抗弯承载力影响明显(图6);文献[22]的研究表明:试验梁的初始刚度和峰值荷载随温度的升高而降低;取代率的变化对实验梁的变形性能影响不大;文献[23]对不同温度作用后型钢再生混凝土梁的受剪性能进行了试验研究,试验结果表明:试验梁的抗剪承载力随温度的升高有所降低(图7);取代率对抗剪承载力的影响不大;文献[24]研究发现:高温后,型钢再生混凝土梁的承载力,刚度及延性均明显降低,骨料取代率仅对高温后试件的延性有较大影响,对承载力影响不大。综上所述:目前对于高温后再生混凝土的材料力学性能及本构关系研究较少,这是进一步深入分析高温后型钢再生混凝土梁受力性能的基础,也是了解型钢再生混凝土梁抗火机理的前提;此外,关于火灾高温后型钢再生混凝土梁在动力荷载作用下的力学性能研究尚未涉及。



图5 高温后型钢再生混凝土梁受弯破坏形态

Fig. 5 Flexural failure pattern of SRRACB beams after high temperature

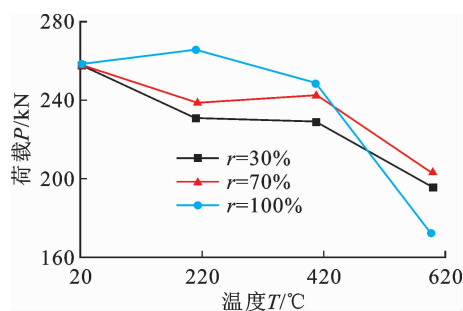


图6 温度对抗弯极限荷载的影响

Fig. 6 Influence of temperature on the flexural ultimate load

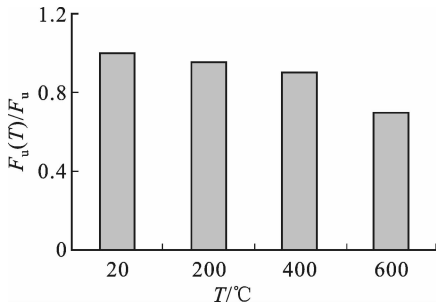


图 7 温度对抗剪承载力的影响

Fig. 7 Influence of temperature on the shear bearing capacity

3 型钢再生混凝土柱受力性能研究

3.1 轴压性能

文献[25]的研究表明:型钢再生混凝土柱轴压承载力随着长细比的增加而逐渐下降,受再生粗骨料取代率的影响不大;文献[26]采用 OpenSees 软件对型钢再生混凝土轴压柱进行了有限元模拟,结果表明:试件的轴压承载力受再生粗骨料取代率的影响不大,随混凝土强度的提高而增大。文献[27]的试验结果表明:试件的轴压极限承载力受再生粗骨料取代率和混凝土强度等级的影响较大;柱轴压极限承载力随体积配箍率的增大明显提高;基于试验结果,还提出了型钢再生混凝土柱轴心受压承载力计算公式。

综上所述,目前关于型钢再生混凝土柱轴压性能的研究,一方面考虑的影响参数还不够全面,关于混凝土保护层厚度、骨料粒径大小及型钢配钢率等对柱轴压性能影响的研究较少;另一方面,缺乏对于腐蚀、火灾等特殊环境下型钢再生混凝土柱轴压性能的研究实例,同时对型钢再生混凝土轴心受压柱的精细化有限元分析还未见报道。

3.2 偏压性能

文献[28]的研究表明:型钢再生混凝土柱的偏心受压破坏形态与普通型钢混凝土柱基本相同;承载力受再生骨料取代率的影响不大;由荷载-位移曲线可知(图 8),柱受压承载力随偏心距的增大逐渐减小。文献[29]根据试验研究结果进行理论分析,提出了型钢再生混凝土偏压柱的刚度和侧向挠度变形计算公式。文献[30]在试验研究的基础上,推导了型钢再生混凝土偏压柱的正截面承载力计算公式,并验证了其正确性。文献[31]结合试件破坏特征及再生混凝土的材料特性,根据板的弹塑性稳定理论,分析了型钢再生混凝土柱临界开裂保护层厚度的计算方法。

综上所述:目前关于型钢再生混凝土柱偏压性能的研究主要以试验研究和理论分析为主,考虑的设计参数不够全面,有必要对柱的受压性能进行有限元参数扩展分析;此外,对纯弯作用,受扭作用以及压、弯、剪多种复杂荷载共同作用下组合柱受力性能的研究几乎没有。

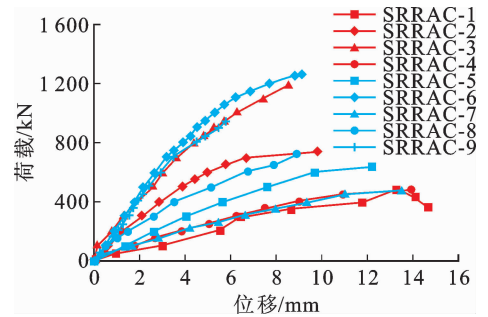


图 8 型钢再生混凝土偏压柱荷载-纵向位移曲线

Fig. 8 Load-longitudinal displacement curve of SRRAC bias columns

3.3 高温后型钢再生混凝土柱的力学性能研究

文献[32]的试验研究表明:高温后型钢再生混凝土柱轴压破坏形态均呈灯笼状破坏;高温后试件的刚度及剩余承载力退化明显(图 9~10),且退化程度随温度升高而变大;高温后试验短柱的平均承载力降低了 13%~50%,特别是在 600°C 时下降 32%~42%。文献[33]的研究结果表明:试验柱的极限承载力和抗弯刚度随火灾温度的升高而降低(图 11);随着取代率的增加,极限压应变及延性增大,而极限承载力有所降低(图 12);试件的极限承载力及抗弯刚度随偏心率的增大明显降低。

综上所述:目前关于火灾高温后型钢再生混凝土柱力学性能的研究主要为静力单调加载试验研究,缺少重复荷载及往复荷载作用下的有关组合构件的动力特性研究;现有研究主要集中在高温后型钢再生混凝土梁、柱构件的力学性能,而对于梁柱节点和框架结构的抗火性能尚未涉及。

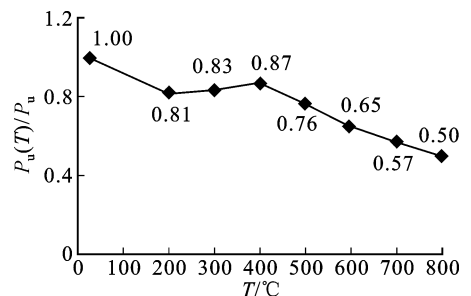


图 9 温度对短柱剩余承载力的影响

Fig. 9 Influence of temperature on the remaining bearing capacity of short columns

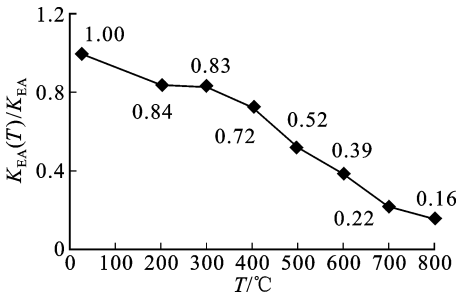


图 10 温度对短柱轴向刚度的影响

Fig. 10 Influence of temperature on the axial stiffness of short columns

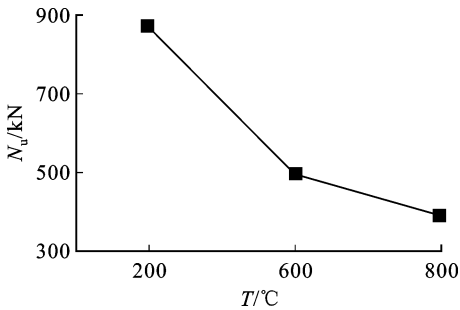


图 11 温度对偏压柱极限承载力的影响

Fig. 11 Influence of temperature on the ultimate bearing capacity of bias columns

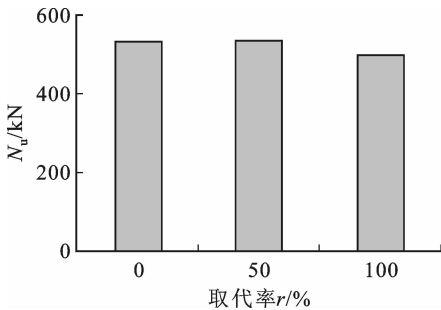


图 12 取代率对偏压柱极限承载力的影响

Fig. 12 Influence of replacement ratio on ultimate bearing capacity of bias columns

3.4 抗震性能

文献[34]通过低周反复荷载试验对型钢再生混凝土柱的抗震性能进行了研究,结果表明:型钢再生混凝土柱的主要破坏形态有3种:剪切斜压破坏、弯剪破坏以及弯曲破坏(图13);滞回曲线呈饱满的梭形,表明柱具有较好的延性及耗能能力(图14);取代率对组合柱的承载力影响不明显,但构件延性随取代率的增加而有所降低;文献[35]的研究结果表明:实验短柱的延性系数均小于3.0,表明短柱抗震性能较差,可以通过降低轴压比或增大体积配筋率来提高型钢再生混凝土短柱的抗震延性。文献[36]研究表明:随剪跨比的增大,试件的水平承载力降低,刚度退化减慢,延性及耗能有所提高。文献[37]

在型钢再生混凝土长柱拟静力试验研究的基础上,经过试验数据拟合和理论分析,提出了型钢再生混凝土长柱的三折线恢复力模型。综上所述:目前学者对型钢再生混凝土柱的抗震性能进行了一定的研究,得出了一系列结论,但对型钢再生混凝土柱地震损伤性能的研究尚未涉及,这是实现其抗震性能化设计的关键。此外,对于反复荷载作用下的型钢再生混凝土柱黏结滑移性能也未见报道,这是提出型钢再生混凝土柱抗震设计精确方法的关键。现有研究的型钢再生混凝土柱的混凝土强度等级都在C40以下,对于高强或高性能的再生混凝土材料的型钢再生混凝土柱抗震性能研究几乎没有。



(a) 剪切斜压破坏 (b) 弯剪破坏 (c) 弯曲破坏

图 13 反复荷载下型钢再生混凝土柱破坏形态

Fig. 13 Failure pattern of SRRC columns under low reversed cyclic loading

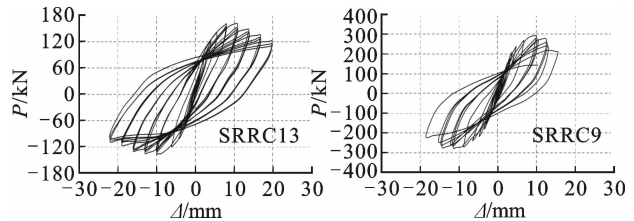


图 14 反复荷载下型钢再生混凝土柱部分荷载-位移滞回曲线

Fig. 14 Load-displacement hysteresis curve of SRRC columns under reversed cyclic loading

4 型钢再生混凝土梁柱节点及框架受力性能研究

4.1 梁柱节点

文献[38]对型钢再生混凝土梁柱节点试件进行了低周反复荷载试验研究,结果表明:框架中节点的破坏过程分为弹性、带裂缝工作和破坏3个阶段,且均发生核心区剪切破坏;节点试件的滞回曲线呈一定捏缩的纺锤形,具有较好的耗能能力;随再生骨料取代率的增加,节点的抗剪承载力及耗能能力降低,延性逐渐减小,但其抗震性能与型钢普通混凝土框架节点相比变化不大;图15为梁柱节点的骨架曲

线。由图可知,在弹性段,骨料取代率对节点的初始刚度影响不大,在带裂缝工作阶段曲线开始出现偏差,但是偏差不大;当荷载达到水平最大值以后,随取代率的增大,骨架曲线的下降段变得陡峭,表明试件的延性性能有所降低,屈服后变形能力相对减小。综上所述,目前关于型钢再生混凝土梁柱节点受力性能的研究很少,所涉及的变化参数有限,故考虑不同设计影响对节点抗震性能的影响需展开进一步研究;同时,型钢再生混凝土梁柱节点的受力机理、破坏形态以及抗剪承载力设计方法也尚未报道;此外,对于型钢再生混凝土梁柱中间层的边节点及顶层角节点的受力性能研究尚未涉及。

且多为缩尺模型试验,缺乏足尺实验研究;此外,有关型钢再生混凝土框架结构模型的振动台实验研究几乎没有。



(a) 整体变形

(b) 中节点破坏形态

图 16 型钢再生混凝土框架变形破坏形态

Fig. 16 Deformation failure pattern of SRRC frame

5 结论及展望

通过上述对型钢再生混凝土组合构件及结构研究现状的分析,可知目前对于型钢再生混凝土组合结构的受力性能进行了一定的研究,并已经取得了一定成果,但仍存在许多问题有待进一步研究。

1) 现有的型钢再生混凝土组合结构受力性能研究中,鲜有学者对再生混凝土材料进行改性研究,所涉及再生混凝土材料强度相对较低(C40以下),且强度、延性及耐久性较差等缺点仍然没有得到很好的解决。因此,在现有的基础上,通过加入粉煤灰、纤维及外加剂等,开发出高强或高性能再生混凝土材料,并应用于钢与混凝土组合结构中是其未来发展趋势之一。

2) 目前关于型钢与再生混凝土界面间黏结滑移性能的研究均基于推出试验进行,考虑的实际影响因素不足,对于在复杂荷载作用下(如低周反复荷载、疲劳荷载等)、高温或火灾、严寒低温及腐蚀环境下型钢与再生混凝土之间的黏结滑移性能尚未研究;同时,对设有抗剪连接件的型钢再生混凝土黏结滑移性能研究也很少涉及。

3) 对型钢混凝土梁受弯及受剪性能有限元参数分析较少;长期荷载作用下型钢再生混凝土梁承载力、挠度及裂缝宽度等的研究尚未涉及;同时,对设置抗剪连接件的型钢再生混凝土梁受剪性能的研究几乎没有。此外,动荷载作用下(如疲劳荷载)型钢再生混凝土梁受弯及受剪性能研究也未见报道。

4) 缺少对型钢再生混凝土柱轴心受压及偏心受压精细化有限元分析;对于火灾、腐蚀等特殊环境下型钢再生混凝土柱受压性能的研究尚属空白;纯弯作用,受扭作用以及压、弯、剪多种复杂荷载共同作用下型钢再生混凝土偏压柱受力性能的研究几乎没有。同时,对型钢再生混凝土柱地震损伤性能的研究

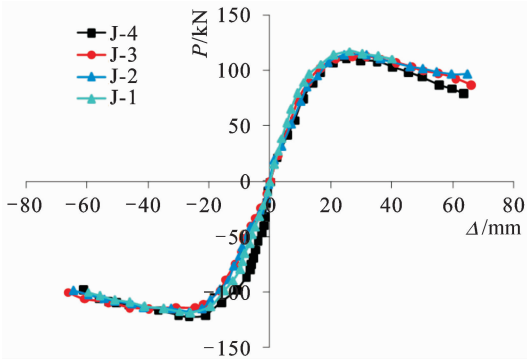


图 15 型钢再生混凝土梁柱节点荷载-位移骨架曲线

Fig. 15 Load-displacement skeleton curves of SRRC beam-column node

4.2 框架结构

文献[39]完成了对一榀三层两跨型钢再生混凝土框架的低周反复荷载实验,结果表明:框架结构呈“强柱弱梁”破坏机制(图16),其荷载-位移滞回曲线饱满,表明具有很好的耗能能力;破坏时框架层间位移角介于 $1/17 \sim 1/40$ 之间,整体位移角达到 $1/22$,位移延性系数平均值为4.3,粘滞阻尼系数为0.28,表现出良好的变形能力和抗倒塌能力。文献[40]对4榀单层单跨再生混凝土空心砌块填充墙-型钢再生混凝土框架结构进行了抗震性能试验研究,结果表明:框架结构破坏机制属于“梁铰机制”,结构中墙体部分先于框架部分破坏;其滞回曲线较为饱满,表现出良好的耗能能力和抗倒塌能力;文献[41]进行了3榀不同填充程度的型钢再生混凝土框架-再生混凝土空心砌块墙体混合结构的低周反复荷载试验研究,结果表明:结构具有较高的承载力和抗侧刚度,全高填充墙框架结构初始刚度大,但刚度衰减快;半高填充墙初期承载力和刚度较大,后期退化规律与空框架相似。

综上所述:目前关于型钢再生混凝土框架结构的研究尚少,对其地震损伤破坏机理研究尚未涉及,

研究尚未涉及。

5) 目前对高温后型钢再生混凝土构件静力性能进行了一定的研究,但高温后型钢再生混凝土构件的动力性能(如抗震性能等)研究较少。此外,对于型钢再生混凝土梁柱节点及框架结构的抗火性能的研究尚未涉及。

6) 现有型钢再生混凝土梁柱节点受力性能的研究中所涉及的变化参数很少,故考虑不同设计参数及节点形式(如边节点)对其抗震性能的影响有待于进一步研究;同时,型钢再生混凝土梁柱节点的受力机理、破坏模式及其破坏形态和抗剪承载力设计方法也尚未报道。关于型钢再生混凝土组合框架结构地震损伤破坏机理的研究尚未涉及,且多为缩尺模型试验,缺乏足尺实验研究;此外,关于型钢再生混凝土框架结构模型的振动台试验研究几乎没有。

参考文献:

- [1] KHATIBJ M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(4):763-769.
- [2] OIKONOMOU N D. Recycled concrete aggregates [J]. Concrete and Concrete Composites, 2005, 27 (2): 315-318.
- [3] OLORUNSOGO F T, PADAYACHEE N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32 (2):179-185.
- [4] BAIRAGI N K, KISHORE. Behavior of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates [J]. Conservation and Recycling,1993,9(3):109.
- [5] 陈卫明,郑玉莹,颜培松.再生混凝土研究进展[J].中国建材科技,2006,4:89-93.
CHEN Weiming, ZHEN Yuying, YAN Peisong. Research progress of recycled concrete[J]. Chinese Building Materials Science and Technology Journal, 2006, 4: 89-93.
- [6] 张亚梅,秦鸿根,孙伟,等.再生混凝土配合比设计初探[J].混凝土与水泥制品,2002,123(1):7-9.
ZHANG Yamei, QIN Honggen, SUN Wei, et al. The mix proportion design of recycled concrete [J]. China Concrete and Cement, 2002, 123(1):7-9.
- [7] 安新正. 腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性试验研究 [D]. 北京:中国矿业大学, 2012.
AN Xinzheng. Experimental study on durability of recycled concrete structure exposed in corroded environment [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012.
- [8] 曹万林,尹海鹏,张建伟,等.再生混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].北京工业大学学报,2011,37(2):191-198.
CAO Wanlin, YIN Haipeng, ZHANG Jianwei, et al. seismic performance experimental research of Recycled concrete frame structure [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(2):191-198.
- [9] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构 [M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [10] 尚军,李自林,张聪,等.型钢混凝土 T 形短肢剪力墙非线性分析[J].西安理工大学学报,2013,29(3):362-366.
SHANG Jun, LI Zilin, ZHANG Cong, et al. Nonlinear analysis of T-shaped RC steel reinforced concrete short-pier shell wall [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29 (3):362-366.
- [11] 陈宗平,郑华海,薛建阳,等.型钢再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度分析[J].建筑结构学报,2013,34(5):130-138.
CHEN Zongping, ZHENG Huahai, XUE Jianyang, et al. Push-out test on interface bond slip behavior and analysis on bond strength between steel and recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (5):130-138.
- [12] 陈宗平,陈宇良,郑华海,等.型钢-再生混凝土界面黏结强度及其影响因素分析[J].工业建筑,2013,43(9):1-6.
CHEN Zongping, CHEN Yuliang, ZHENG Huahai, et al. Analysis of influence factors and bond strength of steel-recycled aggregate concrete interface [J]. Industrial Construction, 2013, 43(9):1-6.
- [13] 陈宗平,徐金俊,郑华海.钢-再生混凝土界面黏结机制及强度计算方法[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(2):350-362.
CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai. The interface bonding mechanism and strength calculation method between Steel and recycled concrete [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22 (2): 350-362.
- [14] 陈宗平,陈宇良,覃文月,等.型钢再生混凝土梁受弯性能试验及承载力计算[J].工业建筑,2013,43(9):11-16.
CHEN Zongping, CHEN Yuliang, QIN Wenyue, et al. Test of flexural behavior and ultimate capacity calculation of steel reinforced recycled aggregate concrete beams [J]. Industrial Construction, 2013, 43 (9): 11-16.
- [15] 薛智升.型钢再生混凝土梁受弯性能实验研究[D].成都:西华大学,2012.
XUE Zhisheng. Experimental study on the flexural be-

- havior of steel reinforced recycled aggregates concrete beams[D]. Chengdu: Xihua University, 2012.
- [16] 李园园. 型钢再生混凝土梁的抗弯性能实验及数值模拟研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2015.
LI Yuanyuan. The bending performance experiment and numerical simulation research of steel recycled concrete beams [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2015.
- [17] 薛建阳, 王秀振, 马辉, 等. 型钢再生混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7):69-72.
XUE Jianyang, WANG Xiuzhen, MA Hui, et al. Experimental study on shear performance of steel reinforced recycled aggregate concrete beams[J]. Building Structure, 2013, 43(7):69-72.
- [18] 王秀振. 型钢再生混凝土梁受剪性能试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.
WANG Xiuzhen. Experimental Study on Shear Behavior of Steel Reinforced Recycled Concrete Beams[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [19] 陈宗平, 陈宇良, 钟铭. 型钢再生混凝土梁受剪性能试验及承载力计算[J]. 实验力学, 2014, 29(1):97-103.
CHEN Zongping, CHEN Yuliang, ZHONG Ming. Test of flexural behavior and ultimate capacity calculation of steel reinforced recycled aggregate concrete beams[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1):97-103.
- [20] 马辉, 薛建阳, 林建鹏, 等. 型钢再生混凝土梁抗剪承载力及其可靠度分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(9):7-10.
MA Hui, XUE Jianyang, LIN Jianpeng, et al. Reliability analysis on shear capacity of steel recycled aggregate concrete beam[J]. Industrial Construction, 2013, 43(9):7-10.
- [21] 陈宗平, 郑巍, 薛建阳, 等. 高温后型钢再生混凝土梁受弯试验及承载力计算[J]. 工业建筑, 2014, 44(11):45-50.
CHEN Zongping, ZHENG Wei, XUE Jianyang, et al. Flexural behavior test and bearing capacity calculation of steel reinforced recycled aggregate concrete beams after high temperature [J]. Industrial Construction, 2014, 44(11):45-50.
- [22] 陈宗平, 梁莹, 薛建阳, 等. 高温后型钢再生混凝土梁变形性能及刚度计算[J]. 工业建筑, 2014, 44(11):58-63.
CHEN Zongping, LIANG Ying, XUE Jianyang, et al. Deformation performance and calculation of flexural rigidity of steel reinforced recycled aggregate concrete beams after high temperature[J]. Industrial Construction, 2014, 44(11):58-63.
- [23] 陈宗平, 王欢欢, 薛建阳, 等. 高温后型钢再生混凝土梁的受剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(11):51-57.
CHEN Zongping, WANG Huanhuan, XUE Jianyang, et al. Shear properties experiment of steel reinforced recycled aggregate concrete beams after elevated temperatures [J]. Industrial Construction, 2014, 44(11):51-57.
- [24] 陈宗平, 郑巍, 陈宇良. 高温后型钢再生混凝土梁的受力性能及承载力计算[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2):49-58.
CHEN Zongping, ZHENG Wei, CHEN Yuliang. Mechanical behavior and bearing capacity calculation of steel reinforced recycled concrete beam after experiencing high temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(2):49-58.
- [25] 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 Jianyang, CUI Weiguang, CHEN Zongping, et al. Experimental study on axial compressive behaviors of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns [J]. Building Structure, 2013, 43(7):73-76.
- [26] 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 Jianyang, MENG Gang, LIU Zuqiang, 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.
- [27] 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 Ni, CHEN Zongping, LI Qiliang, 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.
- [28] 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 Zongping, ZHONG Ming, CHEN Yuliang, 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.
- [29] 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 Jianyang, LIN Jianpeng, MA Hui, et al. Stiffness and deformation analysis of steel reinforced recycled concrete eccentric compression columns[J]. Industrial Construction, 2013, 43(8):109-113.
- [30] 薛建阳, 周升, 崔卫光. 型钢再生混凝土偏心受压柱正截面承载力计算方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(2):166-170.
- XUE Jianyang, ZHOU Sheng, CUI Weiguang. Normal section bearing capacity calculation method of steel recycled concrete eccentric compression columns [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology(Natural Science Edition), 2014, 46(2):166-170.
- [31] 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 Jianyang, MA Hui, CHEN Zongping, et al. Mechanical analysis on the cover thickness of steel reinforced recycled concrete column[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5):202-206.
- [32] 陈宗平, 郑巍, 周春恒, 等. 高温后型钢再生混凝土短柱轴压性能试验[J]. 工业建筑, 2014, 44(11):32-38.
- CHEN Zongping, ZHENG Wei, ZHOU Chunheng, et al. Test of steel reinforced recycled aggregate concrete axial compression short columns after high temperature [J]. Industrial Construction, 2014, 44(11):32-38.
- [33] 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 Zongping, YE Peihuan, XUE Jianyang, et al. Mechanical properties of steel reinforced recycled aggregate concrete eccentric compression column after high temperature [J]. Industrial Construction, 2014, 44(11):39-44.
- [34] 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 Jianyang MA Hui, LIU Yi. 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.
- [35] 薛建阳, 马辉. 低周反复荷载下型钢再生混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(12): 123-131.
- XUE Jianyang, MA Hui. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete short column under low-cyclic reversed loading[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12):123-131.
- [36] 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 Jianyang, MA Hui. 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.
- [37] 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.
- XUE Jianyang, LIU Jinlu, MA Hui, et al. Experimental study on restoring force model of steel reinforced recycled aggregate concrete columns[J]. Industrial Construction, 2013, 43(9):35-39.
- [38] 薛建阳, 鲍雨泽, 任瑞, 等. 低周反复荷载下型钢再生混凝土框架中节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(10):1-8.
- XUE Jianyang, BAO Yuze, REN Rui, et al. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete inner-frame joints under low-cyclic reversed loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10):1-8.
- [39] 薛建阳, 王刚, 刘辉, 等. 型钢再生混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2014, 46(5): 629-634.
- XUE Jianyang, WANG Gang, LIU Hui, et al. Seismic performance experimental research on steel recycled concrete frame[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2014, 46(5):629-634.
- [40] 薛建阳, 高亮, 罗峥, 等. 再生混凝土空心砌块填充墙-型钢再生混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3):77-84.
- XUE Jianyang, GAO Liang, LUO Zheng, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled aggregate concrete frame infilled with recycled aggregate concrete hollow blocks[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3):77-84.
- [41] 薛建阳, 雷思维, 高亮, 等. 型钢再生混凝土框架-空心砌块墙抗侧刚度试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(3):73-81.
- XUE Jianyang, LEI Siwei, GAO Liang, et al. Experimental study on lateral stiffness of steel recycled concrete frame with recycled concrete hollow block wall [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3):73-81.