

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.11.048

再生混凝土结构工程应用研究综述

汪小南^{1,2}

(1.武汉市城市建设投资开发集团有限公司,湖北 武汉 430000;2.武汉市市政工程设计研究院有限责任公司,湖北 武汉 430023)

摘 要: 为了研究再生混凝土技术和工程应用,通过对其生产工艺、早期强度、变形性能、配合比、抗冻融性能、抗碳化性能、抗氯离子渗透性能和徐变性能等方面的详述与分析,发现它具有巨大的潜力,具备了废弃混凝土处理的可靠手段。如直接使用再生混凝土来替换混凝土,还需要考虑一下两者存在的些许差异,所以更为深入的研究和探讨依然有必要。

关键词: 再生混凝土;建筑固废;绿色建筑材料;普通混凝土

中图分类号: TU528.59

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)11-0203-04

0 引 言

近十年来,建筑固废总量增长了近 4 倍,未来仍将保持较高水平^[1]。为满足建筑固废资源化和建筑资源可持续发展的需求,再生混凝土在建筑结构领域得到广泛推广^[2]。建筑固废资源化是将建筑废弃多次分解与合成,加工成高品质原材料或回到原始状态,来实现建筑固废产业“闭环”^[3],进一步解决建筑固废带来的环境与社会问题^[4]。在细观结构中,水泥基材料界面过渡区的复杂程度是区分原生与再生混凝土材料的关键,附着老砂浆存在是再生混凝土材料、构件及结构性能劣化的根本原因^[5]。

再生混凝土完全或部分替代传统混凝土的粗/细骨料,减少了山砂和山石开采,保护了生态的平衡^[6]。在工程应用中,再生混凝土结构的使用较多,理论研究基础扎实,工程背景较多,既能满足“双碳”要求,又能较好的解决固废工程应用的问题^[7]。在本文中,我们提供了切实可行的再生混凝土生产工艺和研究背景,并对近年来的研究成果和工程应用情况进行了综述。其中,对再生混凝土框架和钢与再生混凝土组合框架这两类结构进行了详细的介绍,包括其研究现状和应用情况。此外,学习了再生混凝土技术标准和部分实际工程实例,给出了推广依据。

1 生产工艺

再生混凝土的生产工艺是制约再生混凝土结构工程应用的关键因素之一。在国外,再生混凝土的生产工艺较为成熟,其功能不同而工艺有所区别。日本的生产工艺具有两大特点:现场直接转化和再生利用率较高,有利于搬运中的损耗,但再生混凝土品质极难保证。在汲取日本的生产工艺经验后,德国生产工艺主要看重再生混凝土的强度及使用性能,其粉碎分离技术较先进,用途广范,但该生产工艺尚处于较低水平,生产效率低下,成本高昂。随后,俄罗斯自主研发并生产了双筛网筛分机组,使得再生混凝土的生产工艺化零为整,提出了一整套较为完善地再生混凝土生产工艺^[8]。

在国内,再生混凝土的生产工艺起步较晚,但发展迅速,并形成了满足当前经济技术需要的一整套十分完整的再生混凝土生产工艺^[9]。再生混凝土在制备中,首先对废旧混凝土进行破碎与筛分,得到直径为 5~40 mm 的骨料,称之为一级处理,随后对一级处理获得的骨料进行加温、破碎与筛分,该过程称之为二级处理。值得注意的是,一级处理制备骨料仅适用于 C30 以下混凝土,二级处理的骨料可用于 C30 以上混凝土^[10]。加温时,要求温度高达 300℃并持时一段时间,因此,二级处理的经济合理性及使用有待商榷^[10]。

2 再生混凝土结构研究现状

2.1 再生混凝土框架

框架是建筑物的重要抗震配件之一,其抗震性能

收稿日期: 2023-05-25

作者简介: 汪小南(1975—),男,硕士,高级工程师,主要从事项目管理工作。

或抗倒塌性能研究至关重要。Xiao等^[11]进行了低周反复荷载试验,发现100%再生骨料取代率的试件具有最佳的延性,各试件的延性系数相近。曹万林等^[12]开展了2层2跨、2榀1:2框架试验,其中,试件1采用100%再生混凝土材料,结果表明两试件均符合“强柱弱梁”的要求,其破坏机理及特征均一致。张鹏等^[13]对现有试验进行ANSYS有限元分析,证明了该法在再生混凝土框架模拟中的合理性,并获得了各截面材料的应力云图与变形曲线。肖建庄等^[14]对开展了某再生混凝土结构的三维六自由度振动台试验,模型为1:4缩尺的6层2跨2开间框架。发现在相同地震动作用下,各楼层的最大层剪力和最大倾覆力矩总体上随高度递减。通过数据拟合得到的剪力系数和动力放大系数,结合滞回特性和四折线型恢复力模型,对结构的性能指标进行了分析,并基于变形和能量组合双破坏准则评估了抗震能力。经过多次振动台试验,发现它的破坏情况较为严重,但在9度罕遇下并未倒塌,说明其抗倒塌性能较好。雷斌等^[15]发现预制或现浇的施工工艺对再生混凝土框架延性影响极小。

2.2 钢与再生混凝土组合框架

再生混凝土初始损伤对结构受力性能影响较大,增加结构含钢率能够有效缓减甚至避免再生骨料性能较差带来的负面影响。张向冈^[16]发现取代率为100%时,再生混凝土框架梁发生弯剪破坏或弯曲破坏,属于梁铰破坏机制;破坏时,框架模型的粘滞阻尼系数均不低于0.2,表现出良好的耗能性能;最后,通过对模型的破坏位移转角为1/41和1/30的抗震性能进行研究后建立了“三水准”下的性能水准目标。孟二从^[17]对再生混凝土柱-再生混凝土深弯梁组合结构进行了设计,该结构为8榀方钢管框架结构,并进行了模型的抗震性能试验,发现再生粗骨料和再生细骨料分别用于填充方钢管和填充墙;框架模型以剪切破坏为主,柱底产生压弯塑性铰,填充墙局部压坏、脱落,并提出了抗剪承载力的理论计算方法,计算值与试验值吻合较好。而毛捷^[18]则通过数值模拟,发现100%再生骨料取代情况下结构,其抗震性能良好。李帅^[19]同时通过模型试验和数值模拟对方钢管再生混凝土框架结构进行了研究,发现延性系数范围为3.35~3.43。此外,研究还发现增加再生混凝土的强度等级、钢材的屈服强度和柱钢管的厚度均有助于提高模型的抗震性能。胡乐乐^[20]采用了ANSYS和SPA2000等软件,对10层钢管混凝土

和钢管再生混凝土框架体系进行了分析,这些分析结果均为钢管混凝土和钢管再生混凝土框架结构的抗震性能评估提供了重要的参考。任瑞、刘菲、崔蔓蔓、罗峥和雷思维^[21-25]发现填充墙优先破坏,其次是梁端柱脚的塑性铰破坏,说明随着填充墙的增加,刚度退化速率增加;拉筋间距的减小,结构的承载力与延性均增加;承载力与初始刚度排序为空框架<半高砌筑填充墙框架<全高砌筑填充墙框架,延性与耗能三者接近;随高宽比的增加,承载力、初始刚度、刚度退化速率均增加,延性减小;性能评估发现,在空框架填砌墙体,即使填砌不规则,所得结构均能很好的满足抗震设防要求,处于安全范围。王召猛^[26]基于肖建庄等^[21-25]对再生混凝土本构关系的研究,对Pushover分析了4层、8层和12层的框架,认为装配式钢筋再生混凝土框架结构均具有较好的抗震能力,最后总结出了该框架模型再生骨料取代率与滞回耗能的规律。郑志毅^[27]研究了100%取代率和不同粉煤灰掺量(10%、15%、20%、25%、30%)下再生混凝土挂墙板在抗压、抗渗、抗热下的抗弯性能,以期将研究成果应用于福建省具有抗渗要求和热工性能要求的装配式结构工程中,研究表明,由100%再生粗骨料取代率和15%粉煤灰掺量制备的装配式结构再生混凝土挂墙板具有最优抗渗性能,如果外挂墙体为非承重部件,30%粉煤灰掺量也满足抗渗要求;其中,100%取代率和30%粉煤灰掺量、150 mm墙板厚,结构保温性能最优,可用于福建省装配式结构的节能设计。纪昌威^[28]对1榀钢框架-再生混凝土墙板结构和3榀单层单跨钢框架-预制再生混凝土墙结构进行低周反复荷载破坏试验,建立了三维精细化有限元模型;墙厚、再生混凝土强度、高跨比、轴压比对结构抗震性能影响不容忽视;在多遇地震、基本烈度下,满足最大弹性变形和“小震不坏”要求,具有足够的承载力,达到了“生命安全”的性能目标;在罕遇地震下,其弹性变形满足层间位移限值,延性较好,满足“防止倒塌”要求。

3 再生混凝土技术标准与工程实例

在我国,针对再生混凝土再利用的研究起步晚、起点低、发展迅速,在“十三五”规划后迎来了快速发展的契机,取得大量系统的研究成果和技术规程与标准^[29]。相关规范规定了再生粗、细骨料的选取,为后续再生混凝土的制备和使用提供了科学依据。为了进一步推广技术应用,国家出台了《工程施工废弃

物再生利用技术规范》(GB/T 50743—2012),住建部于2018年发布了《再生混凝土结构技术标准》(JGJ/T 443—2018)。通过这些规范和标准的制定和推行,给予了再生混凝土科学应用的契机。

与上述技术标准与规程相比,再生混凝土应用于工程要早许多,如2002年的新江湾机场道路、2003年的同济大学刚性路面、2004年的上海空心砌块砌体试点房屋、2009年的四川都江堰示范工程、2011年的北京建筑工程学院土木与交通学院第六实验楼(如图1所示)以及陕西省于2019年建成了首个再生混凝土示范工程,即临潼绿色产业园项目办公楼(如图2所示)。这些实际工程案例的建设和成功应用进一步验证了再生混凝土技术的可行性和可靠性。研究表明^[30],再生混凝土结构体系的承载能力均弱于同等级强度的普通混凝土结构体系。对于再生混凝土构件的计算,有必要进行适当的折减处理,以考虑其相对较低的强度和其他特性,这样的折减计算方法可以有效地评估再生混凝土结构的承载能力,并为工程设计和结构安全提供准确的依据。在上述工程中,在承载力计算中就采用了折减再生混凝土材料性能的方法,工程建成至今,再生混凝土结构在各项性能指标上表现良好,未出现明显的裂纹,没有出现任何工程质量问题。这些成功案例表明再生混凝土结构在抗震设计和工程应用方面取得了显著的成果。这些结构的良好性能证明再生混凝土的可靠性和可行性,为进一步推广和应用再生混凝土结构提供了有力的支持。这些成功案例不仅在工程实践中得到验证,也对再生混凝土的未来发展和广泛应用提供了有益的借鉴。其他类型的工程实例,包括2004年建成的同济道路、2007年建成的复旦道路、2012年世博会建成的3层展厅、2014年扬州建成的5层办公楼、2008年四川灾后重建以及2016年上海建成的12层写字楼,使用至今,依然具有良好的寿命保障和承载力。



图1 北京建筑工程学院第六实验楼



图2 临潼绿色产业园项目办公楼

关于再生混凝土结构体系的落地工程较少,但研究成果系统且丰硕,在绿色建筑与资源可持续、循环利用的创想下,亟需进一步大力推广,来解决环境与资源危机问题。

4 结论

(1)建筑固废资源化是实现新型建筑材料的根本路径,将建筑废弃材料分类后的再利用,有利于形成建筑生命周期“闭环”。但再生混凝土技术依然困难较多,诸如交叉学科探析、新旧结构维护等均弱于普通混凝土,因此再生混凝土的推广应用范围较局限。进一步研究和改进再生混凝土的强度、耐久性、磨损性能、力学性能和结构性能,探索方法和材料的改良,使其达到高性能水平,可以有效增强其在建筑领域的可行性和竞争力。这将为可持续建筑发展和资源循环利用做出重要贡献。

(2)原生与再生混凝土物理性能试验发现,二者存在较多差异。在再生骨料的破碎过程中,常会出现细小裂纹和空洞,这对结构的微观力学稳定性造成不利影响。因此,寻求或提出更优化的再生混凝土破碎工艺变得尤为迫切。此外,考虑微观损伤效应对再生混凝土性能的提升具有关键意义。因此,未来的研究应侧重于发展针对再生骨料的优化破碎工艺,以减少细小裂纹和空洞的生成,从而提升再生混凝土的性能。同时,考虑微观损伤效应,进行性能改进和优化,对实现再生混凝土各项性能的提升至关重要。

(3)再生混凝土应该与混凝土区别开,包括施工工艺、配合比等方面,混凝土厂家批量化再生骨料或再生混凝土的做法是不可取的。应该充分认识二者差异,探析并制定满足再生混凝土的标准规范,在确保它满足正常使用和极限承载力要求下,具有良好的质量保证和耐久性可靠度需求,才能将它普及推广。

参考文献:

- [1] XIAO J Z, WANG C H, DING T, et al. A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 868–881.

- [2] 肖建庄,夏冰,肖绪文. 工程结构可持续性设计理论架构[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 1-12.
- [3] DING T, XIAO J Z, VIVIAN W Y, et al. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China [J]. Waste Management, 2016, 56: 367-375.
- [4] 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.
- [5] OLLIVIER J R, MASO J C, BOURDETTE B. Interfacial transition zone in concrete [J]. Advanced Cement Based Materials, 1995, 2(1): 30-33.
- [6] DONG H Y, LI Y N, CAO W L, et al. Seismic behavior of full-scale steel reinforced recycled concrete columns under high axial compression ratio[J]. Structures, 2021, 29: 1882-1897.
- [7] ZHANG X G, GAO X. The hysteretic behavior of recycled aggregate concrete-filled square steel tube columns[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109523.
- [8] 屈志中. 钢筋混凝土破坏及其利用技术的新动向[J]. 建筑技术, 2001(2): 102-104.
- [9] 卫国祥,雷颖占混凝土再生骨料的研究分析[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(8): 115-117.
- [10] 董祥. 碾压混凝土在道路建设中的应用及施工技术[J]. 路基工程, 2008(3): 15-17.
- [11] XIAO J Z, SUN Y D, FALKNER H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete [J]. Engineering Structures, 2006, 28(1): 1-8.
- [12] 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.
- [13] 张鹏,周德源,孙跃东,等. 再生混凝土框架结构受力性能非线性分析[J]. 建筑结构, 2007, 37(12): 36-39.
- [14] 肖建庄,王长青,丁陶. 再生混凝土框架结构抗震性能及其评价[J]. 土木工程学报, 2013, 60(8): 55-66.
- [15] 雷斌,徐原威,胡明玉,等. 再生混凝土框架结构延性研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2548-2556.
- [16] 张向冈. 钢管再生混凝土构件及其框架的抗震性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [17] 孟二从. 方钢管再生混凝土柱-再生混凝土深弯梁混合框架结构抗震性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [18] 毛捷. 钢管型钢再生混凝土框架-混凝土核心筒结构抗震性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.
- [19] 李帅. 方钢管再生混凝土框架结构的抗震性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [20] 胡乐乐. 管再生混凝土框架体系抗震性能的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [21] 任瑞. 型钢再生混凝土框架抗震性能及设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [22] 刘菲. 型钢再生混凝土框架-再生砌块填充墙恢复力性能的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [23] 崔蔓蔓. 型钢再生混凝土框架拟动力试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [24] 罗峥. 型钢再生混凝土框架-再生砌体墙结构拟静力试验与抗震性能评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [25] 雷思维. 型钢再生混凝土框架-再生砌块填充墙结构抗侧性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [26] 王召猛. 装配式钢筋再生混凝土框架结构抗震性能评估[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [27] 郑志毅. 装配式框架结构再生混凝土挂墙板的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [28] 纪昌威. 钢框架-再生混凝土墙板结构体系地震响应分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [29] 马辉,干秀英,席嘉诚,等. 型钢再生混凝土柱-钢梁组合框架抗震性能拟静力试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(3): 603-617.
- [30] 王长青,肖建庄,李春祥. 再生混凝土框架结构恢复力特征参数的应变率效应分析[J]. 土木工程学报, 2021, 54(8): 24-36.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com