

文章编号:1673-2049(2016)06-0060-13

再生骨料混凝土破坏机理与改性研究综述

李文贵¹, 龙初¹, 罗智予¹, 黄政宇¹, 龙炳煌², 任杰强³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 3. 梅溪湖投资(长沙)有限公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:针对再生骨料混凝土破坏机理与破坏性能改性研究做了系统性的归纳和总结。提出了再生骨料混凝土的研究背景、思路、目标、内容和技术路线的改性研究体系。根据再生骨料混凝土受拉破坏和受压破坏的破坏形态和断面特征总结了其破坏的一般规律,依据破坏机理得到再生骨料混凝土力学性能提高的改性研究思路,并提出了相应的改性方法。介绍了再生骨料的强化技术,如纳米材料、纤维材料和矿物添加剂改性再生骨料混凝土的研究,归纳了再生骨料混凝土需进一步解决的问题,即再生骨料加工机制的形成、数值模拟技术的发展、应用体系的形成和有效监测机制的建立。结果表明:界面过渡区是再生骨料混凝土的最薄弱区域,改善再生骨料混凝土的破坏性能最为关键的是强化界面过渡区;相关结论可为改善再生骨料混凝土破坏性能和推广其在工程中的应用提供支持。

关键词:再生骨料混凝土;破坏机理;改性;力学性能;综述

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

Review of Failure Mechanism and Modification Research of Recycled Aggregate Concrete

LI Wen-gui¹, LONG Chu¹, LUO Zhi-yu¹, HUANG Zheng-yu¹,
LONG Bing-huang², REN Jie-qiang³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. Meixi Lake Investment (Changsha) Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: The failure mechanism and modification research of damage performance of recycled aggregate concrete (RAC) were systematically summarized. The research background, idea, objective, content and technical route of recycled aggregate concrete were put forward. According to the failure mode and fracture characteristics of recycled aggregate concrete under tensile and compressive damage, the general laws of damage were summarized. Based on the failure mechanism, the modification research ideas of improving the mechanical properties were obtained, and the modification method was proposed. The strengthening technology of recycled aggregate was introduced, such as nano materials, fiber materials and mineral additives used to modify recycled aggregate concrete. The problems that need to be solved for recycled aggregate concrete were also summarized, including the formation of recycled aggregate processing mechanism, the development of numerical simulation technology, the formation of application

收稿日期:2016-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51408210);中央高校基本科研业务费专项资金项目(531107040800)

作者简介:李文贵(1982-),男,湖南安仁人,讲师,工学博士,E-mail:wengui_li1021@126.com。

system and the establishment of effective monitoring mechanism. The results show that interfacial transition zone is the weakest area of recycled aggregate concrete, and strengthening the interfacial transition zone is the key to improve the failure behavior of recycled aggregate concrete. The relevant conclusion can be used to provide support for improving the performance of recycled aggregate concrete and its application in engineering.

Key words: recycled aggregate concrete; failure mechanism; modification; mechanical property; review

0 引言

随着社会快速发展,基础设施大量重建,使得混凝土的需求也日益增大,而且面对大量被拆建筑废弃物的处理问题,势必给环境带来一定的危害。因此,提出了再生骨料混凝土的设想,希望通过再生骨料混凝土部分取代普通混凝土,在满足社会需求的同时又能降低对环境的危害,实现资源的循环利用,再生骨料混凝土的研究也就成了当今社会研究的重点课题。然而,由于再生骨料中老砂浆的大量存在,致使其在各项力学性能方面相比普通混凝土都存在一定的缺陷^[1-3],并且目前对于再生骨料混凝土技术的加工机制还不够完善,对于提高各项力学性能指标也还有许多亟需突破的瓶颈。这些都在很大程度上限制了再生骨料混凝土的发展。到目前为止,再生骨料混凝土大多应用于一些非承重构件或道路的路面。关于再生骨料混凝土破坏机理与改性方法的研究对提高再生骨料混凝土的破坏性能,加强其在工程中的应用具有重要的意义。

根据相关研究发现,不管是再生骨料混凝土的受拉破坏还是受压破坏,都表现为老砂浆的断裂和界面过渡区的破坏,并且破坏过程中初始微裂缝往往最先出现在界面过渡区,然后再向砂浆区域延伸和扩展。因此,界面过渡区就是再生骨料混凝土的最薄弱环节,而造成这种现象的主要因素是老砂浆的存在。老砂浆在很大程度上影响界面过渡区在数量、分布和性能上的不同。

近年来,各国已有不少学者对再生骨料混凝土进行了研究,并在改善再生骨料性能,提高再生骨料混凝土强度等方面取得了阶段性研究成果,本文将对这些成果进行梳理和总结,以期为进一步拓展和完善再生骨料混凝土破坏机理和改性研究工作提供参考。

1 再生骨料混凝土研究内容

1.1 研究背景

已有大量研究表明,再生骨料混凝土在抗压强

度、抗拉强度和抗劈裂强度等方面相对于普通混凝土来说存在着一定的性能缺陷^[4-7]。Nixon等^[8-9]通过试验发现再生骨料混凝土的抗压强度比普通混凝土要低,降低幅度为8%~24%,这在一定程度上限制了再生骨料混凝土的应用。

由于再生骨料混凝土与普通混凝土惟一的区别人就是骨料不同,可以断定再生骨料在很大程度上决定着再生混凝土的性能。再生骨料含有大量的老砂浆,而老砂浆又比天然骨料疏松、强度低,有高的吸水率和压碎指标。再生骨料混凝土的界面过渡区由于老砂浆的存在,也会致使新老砂浆的结合不稳定、不密实,容易出现界面过渡区的破坏^[10]。这些都是再生骨料混凝土相比于普通混凝土的不足之处,也恰好说明其强度为何要比普通混凝土低。

1.2 研究思路

通过总结有关再生骨料混凝土力学性能、破坏机理等方面的研究,就再生骨料混凝土受拉破坏和受压破坏的破坏形态与断面情况来研究其破坏的一般规律。找到再生骨料混凝土相对普通混凝土性能相对低的真正原因,然后从改善这些薄弱环节入手,达到改善其力学性能的目的,实现由破坏机理到破坏性能提高的改性思路。

1.3 研究目标

再生骨料混凝土破坏机理和改性研究的总体目标是实现对再生骨料混凝土破坏机理与改性研究的科学认识和有效处置。具体包括:

(1)对再生骨料混凝土破坏机理有一个科学的认识,能详细了解其破坏全过程和破坏发展趋势。

(2)对界面过渡区的微观结构和组成认识更深刻,找到其薄弱原因。

(3)找到改善界面过渡区性能的有效办法,例如添加合适的纳米材料等。

(4)找到合适的再生骨料强化方法和提高老水泥砂浆强度的方法,加强其在工程中的应用。

(5)找到提高再生骨料混凝土破坏性能的有效方法,实现再生骨料混凝土的应用与推广。

1.4 研究内容

1.4.1 再生骨料混凝土破坏机理

破坏机理的研究主要包括破坏形态的分析、破坏区域断面观察与细观结构分析、微裂缝的开展与发展轨迹研究等。由于再生骨料混凝土和普通混凝土最大差别就是老砂浆的存在,所以目前强化再生骨料混凝土大都从老砂浆入手,认为通过除去再生骨料表面的老砂浆就可以很好改善再生混凝土性能。显然这些方法都是有效的,但不够严谨,研究再生骨料混凝土破坏机理的主要目的就在此,希望通过再生骨料混凝土的破坏机理找到其破坏的一般规律,抓住其真正意义上的薄弱环节,然后通过合适的措施与技术手段来改善其缺陷,达到提高再生骨料混凝土破坏性能目的。

1.4.2 再生骨料混凝土界面过渡区

越来越多研究表明,界面过渡区是混凝土最薄弱环节,破坏往往都是由界面过渡区首先开始,然后裂缝进一步扩展和贯穿,最终造成整个混凝土块的破坏。然而,对于再生骨料混凝土,界面过渡区更多更复杂,影响因素也更多^[11-15]。因此,为了强化再生骨料混凝土,需要弄清其界面过渡区细观结构,分析其各组分的性质与相互关系。从本质上弄清界面过渡区为何是再生骨料混凝土的薄弱区域,微裂缝为何最先从此处开展,具体又与哪些因素相关等。只有从事物的本源出发,才能找到最有效的解决办法。

1.4.3 再生骨料

研究再生骨料是因为它是再生骨料混凝土的重要组成部分,在很大程度上影响着再生骨料混凝土的力学性能。尽管已有许多研究都证实老砂浆是影响再生骨料性能的主要因素,并对此提出了一些改良方法。然而,需要在此基础上对再生骨料开展进一步研究,看如何才能处理好再生骨料表面老砂浆孔隙率高、密实度低和吸水性大的问题,怎样才能最大限度降低老砂浆对再生骨料混凝土性能的影响,实现再生骨料强化,加快再生骨料混凝土在实际工程中的应用。

1.4.4 再生骨料混凝土水泥砂浆

相关研究表明,再生骨料混凝土中新老砂浆含量(质量分数)占到75%,使再生骨料混凝土性能在一定程度上趋于砂浆。老砂浆对再生骨料混凝土性能的影响是多方面的,它涉及到再生骨料的强度和界面过渡区的性能。因此,为了改善再生骨料混凝土的破坏性能,在水泥砂浆方面必须做出2点改善。

首先,提高再生骨料表面老砂浆强度,减少孔隙率,增加密实度;其次,强化新水泥砂浆,增强新老砂浆粘结性能,减少界面粘结破坏。另外,普通混凝土中新水泥砂浆强度的提高对它将来成为再生骨料的一部分应用于再生骨料混凝土也是有帮助的,因为相关研究表明再生骨料混凝土性能与再生骨料初始强度息息相关。

1.5 技术路线

再生骨料混凝土破坏性能改性研究的技术路线主要是走理论与实践相结合的路径。通过理论与实践的对比来说明问题的可行性。再生骨料混凝土改性研究技术路线如图1所示。

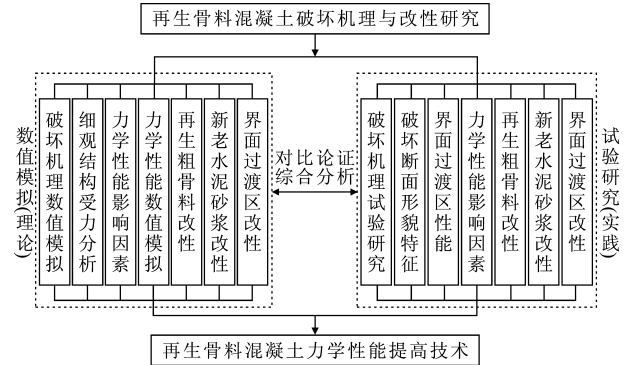


图1 再生骨料混凝土改性研究技术路线

Fig. 1 Technical Route of Research on Modification of Recycled Aggregate Concrete

2 再生骨料混凝土破坏性能提高机理

2.1 再生骨料混凝土破坏形态

已有研究表明,再生骨料混凝土的破坏形态与普通混凝土类似,但在局部又存在一定差别,尤其是再生骨料混凝土内各相材料在破坏时表现出的形态。总的来说,再生骨料混凝土试块的破坏主要表现为受拉破坏和受压破坏。

2.1.1 受拉破坏

目前来看,针对再生骨料混凝土受拉破坏的研究并不太多,就其破坏形态来看,再生骨料混凝土的破坏面主要表现为砂浆的断裂,其次是天然骨料与新砂浆或老砂浆界面过渡区的破坏,而再生骨料的断裂相对较少。现有研究表明,再生骨料混凝土的抗拉强度与再生骨料的取代率、配合比、水灰比等很多因素相关。Tabsh等^[16]的劈裂受拉试验表明,再生骨料混凝土的劈裂受拉强度与再生骨料混凝土的配合比有关,一般较普通混凝土劈裂受拉强度降低10%~25%。Ikeda等^[17-18]发现再生骨料混凝土抗拉强度较普通混凝土降低6%~10%,Sagoe-Crent-

sil 等^[19]的试验则表明再生骨料混凝土的抗拉强度与抗压强度的比值略高于普通混凝土, Gupta^[20]的试验发现水灰比较低时,再生骨料混凝土的抗拉强度低于普通混凝土,而水灰比较高时,再生骨料混凝土的抗拉强度则高于普通混凝土。

图 2 为再生骨料混凝土轴心受拉断面。从图 2 可以看出:断裂面大部分是新砂浆,同时能明显看到老砂浆的断裂,如图 2 中标示①;有沿着天然骨料与老砂浆的界面过渡区,如图 2 中标示②;存在沿着天然骨料与新砂浆的界面过渡区,如图 2 中标示③;极少有天然骨料的断裂,偶有断裂也往往是针片状的,如图 2 中标示④。总之,断面大部分是新老砂浆的断裂,并且部分沿天然骨料与新砂浆或老砂浆之间的界面过渡区,未见沿新砂浆与老砂浆之间的界面过渡区断裂的现象。

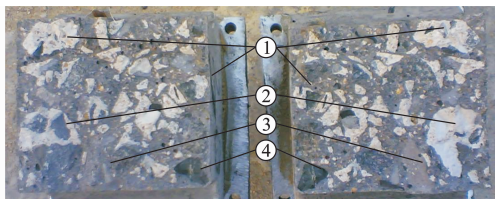


图 2 再生骨料混凝土轴心受拉断面

Fig. 2 Axial Tension Section of Recycled Aggregate Concrete

2.1.2 受压破坏

由于受压是混凝土的主要性能,关于再生骨料混凝土受压破坏和抗压强度的研究屡见不鲜。肖建庄等^[21]研究表明,再生骨料混凝土抗压强度与再生骨料取代率、水灰比、龄期等密切相关,而再生骨料混凝土的破坏面基本上始于粗骨料和水凝胶体的粘结破坏。李旭平^[22]通过对再生骨料混凝土力学性能的研究表明,再生骨料混凝土相比普通混凝土弹性模量降低,峰值应变和脆性增加,其棱柱体在单轴受压条件下破坏形态为纵向劈裂破坏。张学兵等^[23]通过研究证实,水灰比对不同配合比的再生骨料混凝土抗压强度影响很大。

纵观现有研究,再生骨料混凝土试块的受压破坏主要呈斜裂缝破坏,也有少数呈局部压溃现象,如图 3 所示。再生骨料混凝土大多数断裂面为老砂浆断裂和界面过渡区破坏,即天然骨料与新砂浆或老砂浆之间的界面过渡区。

2.2 破坏性能提高机理

从上述关于再生骨料混凝土受拉破坏和受压破坏的破坏形态来看,其断裂面主要表现为老砂浆断裂和界面过渡区破坏。这不但证实再生骨料中含有的



(a) C25



(b) C40

图 3 再生骨料混凝土抗压破坏面

Fig. 3 Compressive Failure Section of Recycled Aggregate Concrete

老砂浆是导致其性能劣于普通混凝土的原因,也在一定程度上肯定了再生骨料混凝土中老砂浆和界面过渡区就是其薄弱区域的研究结论。

肖建庄等^[24-25]做了再生骨料混凝土细微观结构和破坏机理研究,表明再生骨料混凝土界面过渡区表现出疏松、孔隙率高等特点,是其破坏的薄弱区域,并认为在再生骨料混凝土力学性能中起决定性作用的是新硬化水泥砂浆。李文贵等^[26]通过再生骨料混凝土单轴受压破坏机理试验研究也证实了上述结论,并得出初始微裂缝最先出现在新界面过渡区还是老界面过渡区与两者相对力学性能有关。张学兵等^[27]通过 DSP 浆液预处理再生骨料对再生骨料混凝土破坏机理做了分析,发现直接在再生骨料混凝土中加入 DSP 浆液能使再生骨料界面过渡区得到强化,破坏一般发生在薄弱骨料中,能显著提高再生骨料混凝土强度。刘琼等^[28]通过试验与格构数值模拟对再生骨料混凝土破坏机理进行了研究,结果表明再生骨料混凝土中砂浆的增加是再生骨料混凝土力学性能劣化的根本原因,而且其破坏与普通混凝土破坏差不多,大多表现为斜裂缝。

综合分析上述有关再生骨料混凝土破坏机理的研究,可以认为老砂浆和界面过渡区就是再生骨料混凝土的薄弱区域,对再生骨料混凝土力学性能的

影响不可忽视。不过到目前为止,在这方面还没有相对成熟的研究方法,通常是利用扫描电镜观测界面形貌,然后再对界面过渡区对再生混凝土性能的影响做出定性分析。

由此看来,要提高再生骨料混凝土破坏性能,在老砂浆和界面过渡区寻求突破是最佳选择,再生骨料混凝土力学性能改性研究体系如图4所示。对于老砂浆可以通过各种强化再生骨料的方法进行去除。对于界面过渡区,主要是老砂浆的疏松、高孔隙率引起的老砂浆断裂和天然骨料与新老硬化砂浆之间的粘结破坏。要想改善界面过渡区的性能,首先可通过某种合适的纳米材料或是聚合物来填充界面过渡区的孔隙结构,或是利用纳米材料的火山灰效应、晶核效应、钉扎效应等来强化再生骨料混凝土界面结构;其次,可以通过改善新水泥砂浆来强化界面过渡区的性能,增强新水泥砂浆与老硬化砂浆、新水泥砂浆与天然骨料之间的粘结强度,毕竟再生骨料混凝土中水泥砂浆的成分占绝大部分;最后,当再生骨料混凝土的改性发展到一定程度后,可根据再生骨料混凝土不同的需求来改善其破坏性能,发展不同特性的再生骨料混凝土。

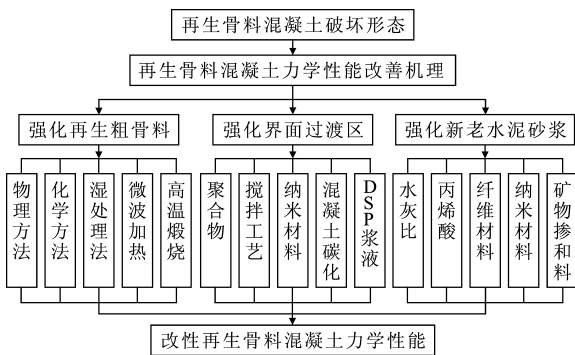


图4 再生骨料混凝土力学性能改性研究体系

Fig. 4 Research System of Mechanical Properties Modification of Recycled Aggregate Concrete

3 再生骨料混凝土改性

3.1 再生骨料强化技术

由于再生骨料具有强度低、压碎指标大和孔隙率高^[29-30]等特点,可通过去除再生骨料表面老砂浆来强化再生骨料。再生骨料强化技术作用机理在于通过减少老砂浆含量来降低再生骨料孔隙率和吸水率,并利用化学浆液浸泡填充再生骨料孔隙结构,减少微裂纹的存在,从而达到强化再生骨料的目的。目前其主要方法有物理强化法、化学强化法、高温蒸压和微波加热等,现针对具体方法做简要介绍。

3.1.1 物理强化方法

(1) 机械研磨

现有研究表明,机械研磨能在一定程度上去除再生骨料表面老砂浆,有效改善再生骨料性能。Montgomery^[31]在研究再生骨料表面砂浆量对再生骨料混凝土性能影响时,就曾使用球磨法很好地除去了再生骨料表面的老砂浆。何德湛^[32]发现在日本经立式偏心装置研磨和卧式回转装置研磨处理的再生骨料性能都有很大提高,其中经立式偏心装置研磨处理后的再生骨料相对原混凝土的回收率达到了67%,并且达到了日本关于再生骨料性能的标准。

(2) 加热研磨

加热研磨是在原有机械研磨基础上发展的一种改良方法,相比机械研磨效果要更好,但工序更复杂。日本相关工厂采用加热研磨法使再生骨料经60 min加热和120 min研磨后,其表面砂浆附着率可减少到0%~20%,吸水率和孔隙率都明显下降,性能得到显著提升。Bru等^[33]曾利用选择性加热研磨法对废弃混凝土块先微波辐射,再通过机械研磨去除骨料表面老砂浆,得到了性能很好的再生骨料。另外,Tateyashiki等^[34-35]也都通过试验证实了加热研磨法能制得品质不错的再生骨料。

(3) 颗粒整形

颗粒整形强化法主要是通过再生骨料高速自击与摩擦来击掉骨料表面附着的砂浆或水泥石,除掉骨料颗粒上较为突出的棱角,使其成为较为干净、圆滑的再生骨料,从而实现再生骨料的强化。李秋义等^[36-37]通过对骨料颗粒整形研究发现,再生骨料经颗粒整形强化后其性能显著提高,某些高品质再生粗骨料的性能甚至可与天然碎石相媲美,并且再生细骨料的性能也有大幅改善。朱崇绩等^[38]通过对骨料的颗粒整形发现,经颗粒整形后的再生骨料制得的混凝土对氯离子抗渗透性和抗碳化能力明显增强。

(4) 搅拌工艺

合理的搅拌工艺除了能强化再生骨料,还能在一定程度上改善界面过渡区性能。二次搅拌工艺主张在考虑混凝土组分中各物料相互均匀混合的基础上,利用物料投放量、搅拌顺序来改良混凝土内部结构,提高其性能,二次搅拌工艺主要特点是可以消除水泥颗粒抱团现象,使水泥水化更充分,同时能有效改善界面过渡区高水灰比的情况,提高混凝土强度。Ryu等^[39-40]通过二次搅拌工艺制备再生骨料混凝土的研究表明,与常规搅拌工艺相比,相同条件下经二

次搅拌工艺制备的再生骨料混凝土抗压强度与抗拉强度都有不同程度提高,而且发现界面过渡区厚度下降了38%。Tam等^[41]发现采用二次搅拌工艺使界面过渡区更加致密,可明显提高再生骨料混凝土强度并减少其离散性。Tamura等^[42]采用减压搅拌工艺制备再生骨料混凝土,发现其能使混凝土抗压强度提高20%。此外,赵悟等^[43-44]通过不同的搅拌方法证实了搅拌工艺有助于提高再生骨料混凝土强度和性能。

(5)湿处理法

湿处理法主要是用水对再生骨料进行冲洗,然后通过分离再生骨料中的杂质而获得品质较好的再生骨料。这种处理方法比较简单,对于除掉再生骨料中的粉尘而增强界面粘结力有一定成效。Jungmann^[45]通过改善生产工艺,在筛分之前先对破碎的再生骨料进行水冲洗,获得了品质不错的再生骨料。Katz^[46]通过超声波清洗再生骨料的研究发现,此类处理方法效果并不明显,可能只对基体混凝土比较弱的再生骨料才有所改善。

不难发现湿处理法与其他强化方法相比最大的特点就是操作简单,可以就地取材,而且冲洗掉骨料表面的粉尘对于改善再生骨料混凝土界面过渡区也有一定成效,但仅仅用水冲洗其优化性能是有限的,因此还需寻求与其他强化方法的结合来使用。

综上所述,这些物理强化方法在改性再生骨料方面都取得了一定的成效,但有些方法可能对设备要求较高,且工序也较复杂,而那些工序简单的可能强化效果又不够好。因此,如何进行再生骨料加工工艺的改良还需开展进一步研究与探讨。

3.1.2 化学方法

(1)化学浸泡

与物理强化方法不同,化学浸泡主要是改善再生骨料表面的孔隙结构,通过加强其密实度来达到强化效果。化学浸泡分为化学溶液浸泡和化学浆液浸泡。Kou等^[47]采用聚乙烯醇浸泡再生骨料的研究发现,改性后再生骨料的表观密度显著提高,吸水率明显下降。陈建良等^[48]利用机械研磨结合聚乙烯醇浸泡的方法处理再生骨料,发现处理后再生骨料混凝土的和易性与抗压强度均有所提高。杨宁等^[49]通过试验发现在骨料表面喷洒聚乙烯醇溶液外裹水泥的方法可以将再生骨料混凝土立方体抗压强度提高约22%。这种方法相对其他方法来说是一种可行性较强的方法。Abbas等^[50]证实采用浓硫酸钠溶液浸泡再生骨料,再伴随机械搅拌使砂浆

冻结与解冻剥离,能很好去除再生骨料表面老砂浆,改善再生骨料性能。这些都是通过化学溶液浸泡强化再生骨料,效果也各有不同,但经化学溶液浸泡后对再生骨料耐久性有没有影响还有待进一步研究。

对于通过化学浆液浸泡强化再生骨料,范小平等^[51]发现用水灰比1:1的水泥外掺无机铝盐复合防水剂浆液可以很好地强化再生骨料。杜婷等^[52]通过高活性超细矿物掺和料浆液对再生骨料进行强化试验,发现再生骨料在水泥外掺Kim粉混合浆液的浸泡下性能改善比较显著。Katz^[53]尝试在再生骨料表面覆盖一层硅粉颗粒,以期与残留在再生骨料表层的水泥水化产物反应而使骨料表面覆盖一密实层,因此采用硅粉溶液强化再生粗骨料,发现7d和28d抗压强度分别提高了30%和15%,而早期强度比后期强度增长要多,说明硅粉溶液的填充效应相比火山灰效应要占主导作用。

(2)聚合物和碳化

鉴于再生骨料的某些特性,可以尝试利用聚合物的填充作用和参与水泥水化反应改变其絮凝结构等来改善再生骨料混凝土性能。已有不少学者在这方面做了相关研究,但根据其所选材料的不同,最终达到的效果也各有差异。王子明等^[54]通过苯乙烯-丁二烯橡胶(SBR)、聚丙烯酸酯(EVA)、乙炔醋酸-乙炔酯(PAE)三种聚合物对再生细骨料进行了改性研究,发现聚合物对再生细骨料砂浆的抗压强度并无改善,只是经PAE乳液处理后再生细骨料抗弯强度明显增加。Kou等^[55]的研究表明,用聚乙烯醇(PVA)浸渍再生骨料可显著提高再生骨料的物理性能,尤其是改善再生骨料的吸水性。

Spaeth等^[56]采用硅烷聚合物、硅氧烷聚合物和硅烷与硅氧烷复掺的聚合物浸泡再生骨料,发现均能减小再生骨料吸水性,且减小量与聚合物的种类相关。Tsujino等^[57]也得到了与上述类似的结论,但发现经硅烷聚合物处理后的再生骨料制得的再生骨料混凝土抗压强度反而降低,这极有可能是由于试验方法的不同所致。

针对上述现象,同样是通过聚合物的浸泡来填充再生骨料孔隙结构,为何有的有效而有的又无效,这需要研究几种材料之间的化学效应。Grabiec等^[58]通过生物沉淀法生成CaCO₃晶体,使其填充在再生骨料表面附着的砂浆中以增加其密实度,发现对提高再生骨料混凝土强度有不错成效。

众所周知碳化使混凝土碱性降低,易导致钢筋锈蚀,但由于碳化令水泥水化产物发生改变,在一定

程度上可使混凝土更加密实,硬度提高。Zhang等^[59]受此启发,通过CO₂强化处理再生骨料,发现能使再生骨料吸水率和压碎指标明显减小,表观密度显著增大,对提高再生骨料强度有不错成效。

3.1.3 高温蒸压与微波加热

为了除去再生骨料表面的老砂浆而强化再生骨料性能,高温蒸压和微波加热也有一定成效。崔正龙等^[60]通过试验发现高温蒸压养护再生骨料效果并不理想,而且后期强度还有一定幅度的下降趋势,这可能是高温蒸压使骨料本身受到了损伤。

Akbarnezhad等^[61]对再生骨料进行了高功率(10 kW)的微波强化,证实微波确实对去除再生骨料表面砂浆有一定作用,但过高的功率瞬间加热会导致再生骨料内部天然骨料温度过高,从而导致骨料本身的高温损伤。肖建庄等^[62]在此基础上提出了低功率微波加热强化再生骨料的设想,即通过微波加热循环的方法去除再生骨料上附着的老砂浆,从而提高再生骨料的品质。与传统的外裹纯水泥浆和机械研磨法等相比,微波加热改性再生骨料效果更为明显。另外,戴俊等^[63]通过试验证实利用微波加热辅助机械剔选能显著改善再生骨料性能。

3.2 纳米材料改性再生骨料混凝土

纳米材料是指颗粒尺寸在纳米量级(100 nm)以内的超细材料,它的超细化特性使得其晶体结构与电子结构发生变化,具有许多特殊性质,如体积效应、表面效应、尺寸效应和宏观量子隧道效应等,被誉为21世纪最有前途的材料。据Richardson^[64]的研究发现,水泥的水化产物C-S-H凝胶尺寸在纳米级范围,并且在水泥的水化产物中C-S-H凝胶比重大占到了70%。因此,研究与C-S-H同一尺度的纳米材料对水泥基材料的改性作用已经引起许多学者的兴趣。

目前,纳米材料改性再生骨料混凝土破坏性能的主要途径是将无机纳米材料(纳米SiO₂、纳米硅粉和纳米CaCO₃等)引入混凝土中,通过填充再生骨料混凝土内部的孔隙与微裂纹来改善其内部结构,使水泥石与骨料的界面结构得到优化,起到早期强度提高、基体韧性增强的效果。钱晓倩等^[65]通过引入高活性纳米粒子(纳米CaCO₃和硅溶胶)和纳米矿物掺和料,并采用不同搅拌工艺制得纳米改性再生骨料混凝土,研究表明高活性纳米粒子和纳米矿物掺和料可提高再生骨料混凝土早期和后期强度,改善混凝土耐久性。张津践^[66]通过纳米CaCO₃对再生骨料进行强化,研究表明经处理后再生骨料

混凝土拌和性得到改善,抗压强度得到提高。朱勇年等^[67]采用纳米SiO₂浸渍再生骨料的方式对再生骨料进行了改性处理,发现经纳米SiO₂改性处理后的再生骨料混凝土力学性能明显改善,其强度与变形性能甚至与普通预拌混凝土相当,但惟一的不足就是纳米SiO₂价格昂贵,不利于其推广应用。

纳米材料的价格因素决定了它不能像聚合物那样大量的投入来填充再生骨料的孔隙结构,但它的尺寸效应决定了其能融入再生骨料的每一处微裂纹,通过阻裂和化学效应等改善再生骨料混凝土的微观结构,达到强化目的。Jo等^[68]研究了掺纳米SiO₂的水泥砂浆的各方面性能及其微观结构,发现纳米SiO₂不仅可以作为有效填充物改善水泥砂浆的微观结构,而且还可以很好地发挥火山灰效应提高水泥砂浆的强度。Li等^[69]对添加纳米微粉(纳米SiO₂和纳米Fe₂O₃)水泥砂浆的微观结构进行了研究,最终得到了和上述类似的结论。

除了可利用纳米材料的特性填充、阻裂再生骨料混凝土外,还可利用纳米材料与水泥水化产物的反应或纳米材料促进混凝土界面结构电子云的重新排布等来强化再生骨料混凝土界面过渡区。Chen等^[70]通过将纳米TiO₂掺入到水泥基材料中的研究发现,纳米TiO₂在水化过程中可作为晶核显著增强水泥水化速度和水化程度,减少总孔隙率并改善孔径分布,提高混凝土强度。

综上所述,纳米材料在改性再生骨料混凝土的破坏性能上有它的先天优势,在一定条件下可充分发挥它的性能来改善界面过渡区的孔隙结构,促进界面电子云重新排布等强化界面结构。具体通过什么材料、依据它的什么特性强化效果会更好,还需今后在纳米材料改性再生骨料混凝土的深度和广度方面开展更多研究。

3.3 纤维增强再生骨料混凝土

纤维材料在混凝土中的应用已是一个热点问题,大量的研究围绕如何利用纤维材料增强、增韧混凝土展开。随着纤维材料在高性能混凝土和超高性能混凝土中取得不错成效,逐渐在再生骨料混凝土中的研究也多了起来。周静海等^[71]利用废弃纤维对再生骨料混凝土的改性研究发现,废弃纤维的掺入可有效改善再生骨料混凝土力学性能,提高其强度。Du等^[72]研究发现,再生纤维对再生骨料混凝土的劈裂抗拉、抗折及抗裂性能都有显著改善,但抗压强度略有降低,这可能与纤维材料的性能和掺量有关,一般来说纤维材料的抗拉性能比较显著,可以

起到增强混凝土延性和韧性的作用。

钢纤维能提高再生骨料混凝土抗拉强度与改善其脆性破坏特征,但对是否能提高其抗压强度的结论并不统一。潘超权等^[73]通过对钢纤维改性再生骨料混凝土力学性能的研究表明,钢纤维的掺入对再生骨料混凝土立方体抗压强度影响不大,而金宝宏等^[74]通过试验却发现钢纤维的掺入对提高再生骨料混凝土抗压强度有一定作用,这可能与钢纤维的掺入量和掺入方式有关。

董江峰等^[75]通过玄武岩纤维对再生骨料混凝土性能的研究表明,在50%骨料取代率的情况下,玄武岩纤维用量为 $4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时对再生骨料混凝土力学性能提高最明显。吴建华等^[76]通过聚丙烯纤维和硅粉对再生骨料混凝土的强化试验研究,证实利用聚丙烯纤维和硅粉对再生骨料混凝土进行强化可明显改善其力学性能,提高其强度。

上述研究说明研究者在纤维材料改性再生骨料混凝土的广度和深度方面已开始寻求扩展,并不再停留在那么几种材料上,而是结合再生骨料混凝土自身的特性寻求材料的结合来改性。

3.4 矿物添加剂改性

由于有各种外加剂在改善普通混凝土性能的成功先例,以及硅灰可以提高普通混凝土强度的应用与推广,因此在矿物添加剂改性再生骨料混凝土性能方面寻求突破也是一种不错的选择。Tangchirapat等^[77]通过在再生骨料混凝土中加超细粉煤灰的研究表明,超细粉煤灰对提高再生骨料混凝土强度有着非常明显的作用。张亚梅等^[78]通过对再生骨料预吸水处理,然后以粉煤灰等量取代30%水泥,发现再生骨料混凝土工作性能得到改善,抗压强度和抗压弹性模量均有提高,并且还通过研究证实高效减水剂的单掺和粉煤灰与高效减水剂的复掺都能改善再生骨料混凝土的性能,提高其强度。

王社良等^[79]通过粉煤灰和硅灰对再生骨料混凝土力学性能影响的研究表明,当粉煤灰单掺时,随着粉煤灰掺量的增加,再生骨料混凝土抗拉强度和抗压强度都逐渐降低,而当粉煤灰和硅灰复掺时,再生骨料混凝土抗压强度、抗折强度显著提高,这说明同一种材料不同的处理方式对再生骨料混凝土的改性效果也是不同的。

孙庆和等^[80]通过煅烧硅藻土改性再生骨料混凝土发现,煅烧硅藻土能显著提高再生骨料混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度。王俊杰等^[81]通过磷渣微粉对再生骨料混凝土性能影响的研究表明,磷渣

微粉能够有效改善再生骨料混凝土内的孔隙结构,消耗氢氧化钙并生成C-S-H凝胶和钙矾石,能够很好提高材料密实度和强度。

通过上述矿物添加剂改性再生骨料混凝土的研究发现,在充分考虑再生骨料混凝土特殊性的同时结合材料本身的特性,并适当借鉴其在普通混凝土、超高性能混凝土中的研究成果也是很有必要的。

4 尚需解决的问题

4.1 再生骨料加工机制

再生骨料对再生混凝土性能的影响是毋庸置疑的。再生骨料与天然骨料最本质的区别就在于多了老砂浆成分,虽说目前关于强化再生骨料的方法多种多样,但最后效果也各有不同。然而,抛开这些因素,由于废旧混凝土来源复杂,因此再生骨料的生产与加工必须标准化、规模化,只能在有相应资质的工厂加工处理,而且要做到不同强度等级的分类,绝不允许有私人的小工厂、小作坊存在,只有这样才能保证再生骨料的品质。因此,强化再生骨料是实现再生骨料混凝土技术发展的前提条件。

4.2 数值仿真技术

一项土木工程技术的发展除了有效的试验研究外,合理的理论分析也是分不开的。就再生骨料混凝土技术的应用与推广来说,对再生骨料混凝土进行细微观结构的模拟对于了解其宏观性能也是非常有意义的。虽然目前学者提出了各种细微观数值模型,如格构模型、随机粒子模型、微平面模型、MH模型、梁-颗粒模型和细胞自动机模型等,但这些模型都各有不足,只符合再生骨料混凝土某一方面的性能要求,并不十分完善。因此,在数值模拟这方面的技术手段也还有待提升。

4.3 应用体系的形成

目前,关于再生骨料混凝土的应用还处于试验和谨慎使用阶段,虽然已经有一些示范工程的研究,并且制定了相应的再生骨料和再生骨料混凝土的技术规程与技术标准,但考虑到再生骨料混凝土的离散性,现阶段应用仍然比较谨慎。每一项研究的最终目的都是为了应用,因此在改性再生骨料混凝土破坏性能的研究达到一定成效后,应该建立科学有效的应用体系,研究如何在保证再生骨料混凝土强度的条件下最大限度地实现它的应用与推广。

4.4 建立科学有效的监测机制

对再生骨料混凝土在工程中的应用,特别是在某些重要承重构件中的应用,应该建立科学有效的

监测机制,能够随时随地掌握其在环境作用与受力条件下的各项性能指标。例如随着时间的延长,它的表面碳化情况怎么样,内部钢筋锈蚀怎么样,经化学浸泡后再生混凝土耐久性是不是受影响,与相同条件下的普通混凝土构件相比又存在哪些不足等。对这些信息进行综合分析后,再对该再生骨料混凝土构件性能做出进一步改善,为今后指导工程应用提供依据。

5 结 语

(1) 现有研究资料表明,再生骨料混凝土比普通混凝土有更大的离散性和更为复杂的界面过渡区。为了提高改性再生骨料混凝土的破坏性能,必须先了解其破坏机理,根据不同需求与破坏形态找到不同的改性措施。

(2) 根据再生骨料混凝土的研究背景与现实状况提出了改性再生骨料混凝土的研究体系,包含再生骨料混凝土的研究目标、研究内容、研究技术路线、破坏性能提高机理和改性技术等。

(3) 依据现有资料提出了由破坏机理到破坏性能改善的改性思路,并对再生骨料混凝土的改性研究进行了综述,指出了完善再生骨料混凝土发展与应用需进一步解决的问题。

(4) 无论是受拉破坏还是受压破坏,再生骨料混凝土都表现为老砂浆的断裂和界面过渡区的破坏,由此可断定界面过渡区就是其最薄弱区域,因此,要想改善再生骨料混凝土破坏性能,最为关键的就是强化界面过渡区。

参考文献:

References:

[1] OTSUKI N, MIYAZATO S, YODSUDJAI W. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(5): 443-451.

[2] TOPCU I B, SENDEL S. Properties of Concretes Produced with Waste Concrete Aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8): 1307-1312.

[3] 李 娟. 再生骨料附着砂浆对混凝土强度的影响及再生骨料二灰碎石试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.

LI Juan. Influence of Mortar Adhesive to Recycled Aggregate on Strength of Concrete and Research of Lime-fly Ash Stabilized Recycle Aggregate[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.

[4] GERARDU J J A, HENDRIKS C F. Recycling of Road Pavement Materials in the Netherlands [R]. Utrecht: Rijkswaterstaat, 1985.

[5] RAMAMURTHY K, GUMASTE K S. Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. Indian Concrete Journal, 1998, 72(1): 49-53.

[6] DHIR R K, LIMBACHIYA M C, LEELAWAT T. Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings, 1999, 134(3): 257-274.

[7] HANSEN T C. Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete Second State-of-the-art Report Developments 1945-1985 [J]. Material and Structures, 1986, 19(3): 201-246.

[8] NIXON P J. Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete — A Review [J]. Materials & Structures, 1978, 11(5): 371-378.

[9] RAVINDRARAJAH R S, TAM C T. Properties of Concrete Made with Crushed Concrete as Coarse Aggregate [J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37(130): 29-38.

[10] 清华大学建筑工程系. 国外混凝土强度问题研究概况 [J]. 力学进展, 1975, 5(1): 1-21.

Department of Structural Engineering, Tsinghua University. The Research Situation of Foreign Concrete Strength [J]. Advances in Mechanics, 1975, 5(1): 1-21.

[11] 陈云钢, 孙振平, 肖建庄. 再生混凝土界面结构特点及其改善措施 [J]. 混凝土, 2004(2): 10-13.

CHEN Yun-gang, SUN Zhen-ping, XIAO Jian-zhuang. Characteristics and Strengthening Methods of Interfacial Zone Between Aggregate and Cement Paste in Recycled-aggregate Concrete [J]. Concrete, 2004(2): 10-13.

[12] 水中和, 潘智生, 朱文琪, 等. 再生集料混凝土的微观结构特征 [J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(12): 99-102.

SHUI Zhong-he, PAN Zhi-sheng, ZHU Wen-qi, et al. Microscopic Structural Features of the Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(12): 99-102.

[13] 万惠文, 徐金龙, 水中和, 等. 再生混凝土 ITZ 结构与性质的研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(11): 29-32.

WAN Hui-wen, XU Jin-long, SHUI Zhong-he, et al. Study on the Structure and Properties of Interfacial Transition Zone (ITZ) of the Regenerated Concrete

- [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004,26(11):29-32.
- [14] ELSHARIEF A, COHEN M D, OLEK J. Influence of Aggregate Size, Water Cement Ratio and Age on the Microstructure of the Interfacial Transition Zone[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(11): 1837-1849.
- [15] TASONG W A, LYNSDALE C J, CRIPPS J C. Aggregate-cement Paste Interface: Part I. Influence of Aggregate Geochemistry [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 1019-1025.
- [16] TABSH S W, ABDEL FATAH A S. Influence of Recycled Concrete Aggregates on Strength Properties of Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1163-1167.
- [17] IKEDA T, YAMANE S. Strengths of Concrete Containing Recycled Aggregate [C]//KASAI Y. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Tokyo: CRC Press, 1988: 585-594.
- [18] RAVINDRARAJAH R S, TAM C T. Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregates in Concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1987, 39(141): 214-220.
- [19] SAGOE-CRENTSIL K K, BROWN T, TAYLOR A H. Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(5): 707-712.
- [20] GUPTA S M. Strength Characteristics of Concrete Made with Demolition Waste as Coarse Aggregate [C]//Phoenix Pub House. Proceedings of the International Conference on Recent Development in Structure Engineering. New Delhi: Phoenix Pub House, 2001: 364-373.
- [21] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1558-1561.
XIAO Jian-zhuang, LI Jia-bin, SUN Zhen-ping, et al. Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(12): 1558-1561.
- [22] 李旭平. 再生混凝土基本力学性能研究 (I) —— 单轴受压性能 [J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 598-603.
LI Xu-ping. Study on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete (I) — Behaviour Under Uniaxial Compression [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5): 598-603.
- [23] 张学兵, 邓寿昌, 邓旭华, 等. 影响再生混凝土强度几个主要因素的试验研究 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2005, 27(1): 129-133.
ZHANG Xue-bing, DENG Shou-chang, DENG Xuhua, et al. Experimental Research on a Few Main Factors Influencing Strength of the Recycled Concrete [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2005, 27(1): 129-133.
- [24] 肖建庄, 刘琼, 李文贵, 等. 再生混凝土细观结构和破坏机理研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(4): 24-30.
XIAO Jian-zhuang, LIU Qiong, LI Wen-gui, et al. On the Micro and Meso-structure and Failure Mechanism of Recycled Concrete [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(4): 24-30.
- [25] XIAO J Z, LI W G, CORR D J, et al. Effects of Interfacial Transition Zones on the Stress-strain Behavior of Modeled Recycled Aggregate Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 52: 82-99.
- [26] 李文贵, 肖建庄, 易伟建, 等. 模型再生混凝土单轴受压破坏机理试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(增2): 340-348.
LI Wen-gui, XIAO Jian-zhuang, YI Wei-jian, et al. Experimental Study on Failure Mechanism of Modeled Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(S2): 340-348.
- [27] 张学兵, 方志, 郭雪怡, 等. DSP 强化与预处理的再生骨料混凝土强度及破坏机理分析 [J]. 工业建筑, 2012, 42(4): 15-20.
ZHANG Xue-bing, FANG Zhi, GUO Xue-yi, et al. Strength and Failure Mechanism Analysis of Recycled Aggregate Concrete Improved by DSP Grout [J]. Industrial Construction, 2012, 42(4): 15-20.
- [28] 刘琼, 肖建庄, 李文贵. 再生混凝土轴心受拉性能试验与格构数值模拟 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(增): 119-124.
LIU Qiong, XIAO Jian-zhuang, LI Wen-gui. Axial Tensile Test and Lattice Model Simulation on Recycled Concrete [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(S): 119-124.
- [29] 高丹盈, 张丽娟, 芦静云, 等. 再生骨料混凝土配合比设计参数研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 8-14.
GAO Dan-ying, ZHANG Li-juan, LU Jing-yun, et al. Research on Design Parameters of Mix Proportion for Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 8-14.

- [30] 张鸿儒,赵羽习,李智慧.再生骨料混凝土在某框架结构中的应用及长期应变监测[J].建筑结构学报,2016,37(5):177-184.
ZHANG Hong-ru,ZHAO Yu-xi,LI Zhi-hui. Application of Recycled Aggregate Concrete in a Frame Structure and Long-term Concrete Strain Monitoring on Site[J]. Journal of Building Structures,2016,37(5):177-184.
- [31] MONTGOMERY D G. Workability and Compressive Strength Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate[C]//University of Wollongong. Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate. Wollongong: University of Wollongong,1998:287-296.
- [32] 何德湛.日本混凝土强化处理技术[J].特种结构,2000,17(3):39.
HE De-zhan. Japanese Concrete Strengthening Treatment Technology[J]. Special Structures,2000,17(3):39.
- [33] BRU K,TOUZE S,BOURGEAIS F, et al. Assessment of a Microwave-assisted Recycling Process for the Recovery of High-quality Aggregates from Concrete Waste[J]. International Journal of Mineral Processing,2014,126:90-98.
- [34] TATEYASHIKI H,SHIMA H,MATSUMOTO Y, et al. Properties of Concrete with High Quality Recycled Aggregate by Heat and Rubbing Method[J]. Proceedings of JCI,2001,23(2):61-66.
- [35] 马新伟,韩兆祥,李学英,等.废弃混凝土高温处理技术与脱水水泥浆再水化活性研究[J].青岛理工大学学报,2009,30(4):93-97.
MA Xin-wei,HAN Zhao-xiang,LI Xue-ying, et al. Thermal Treatment of Waste Concrete and the Rehydration Properties of the Dehydrated Cement Paste [J]. Journal of Qingdao Technological University,2009,30(4):93-97.
- [36] 李秋义,李云霞,朱崇绩.颗粒整形对再生粗骨料性能的影响[J].材料科学与工艺,2005,13(6):579-581,585.
LI Qiu-yi,LI Yun-xia,ZHU Chong-ji. The Influence of a Particle Shape Correcting Technique in Properties of Recycled Coarse Aggregate[J]. Materials Science & Technology,2005,13(6):579-581,585.
- [37] 朱亚光,韩纪权,李秋义,等.颗粒整形再生骨料混凝土力学性能的试验研究[J].青岛理工大学学报,2009,30(4):115-118.
ZHU Ya-guang,HAN Ji-quan,LI Qiu-yi, et al. Experimental Research on the Influence by Particle Shaping on Mechanical Performance of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Qingdao Technological University,2009,30(4):115-118.
- [38] 朱崇绩,李秋义,李云霞.颗粒整形对再生骨料混凝土耐久性的影响[J].中国建材科技,2007,16(3):6-10.
ZHU Chong-ji,LI Qiu-yi,LI Yun-xia. The Affection by Aggregate-shaping on Durability of the Recycled Aggregate Concrete[J]. China Building Materials Science & Technology,2007,16(3):6-10.
- [39] RYU J S. Improvement on Strength and Impermeability of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate [J]. Journal of Materials Science Letters,2002,21(20):1565-1567.
- [40] 孙成城,袁东,宋建学.二次搅拌工艺对再生混凝土强度的影响研究[J].混凝土,2008(6):125-128.
SUN Cheng-cheng,YUAN Dong,SONG Jian-xue. Study on Effect of Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete with Secondary Mixing Process [J]. Concrete,2008(6):125-128.
- [41] TAM V W Y,GAO X F,TAM C M. Microstructural Analysis of Recycled Aggregate Concrete Produced from Two-stage Mixing Approach [J]. Cement and Concrete Research,2005,35(6):1195-1203.
- [42] TAMURA H,NISHIO A,OHASHI J, et al. High Quality Recycled Aggregate Concrete (HIRAC) Processed by Decompression and Rapid Release [C]// American Concrete Institute. Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology. Farmington Hills: American Concrete Institute,2001:491-502.
- [43] 赵悟,冯忠绪.再生集料混凝土的振动拌和强化机理研究[J].混凝土,2006(8):17-20.
ZHAO Wu,FENG Zhong-xu. Research on the Strengthening Mechanism of Vibration Mixing of Recycled Concrete[J]. Concrete,2006(8):17-20.
- [44] 孔德玉,吴先君,韦苏.再生骨料混凝土研究[J].浙江工业大学学报,2003,31(1):28-32.
KONG De-yu,WU Xian-jun,WEI Su. Research on Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Zhejiang University of Technology,2003,31(1):28-32.
- [45] JUNGSMANN A. Building Rubble Treatment Using the Alljig in Europe and USA [J]. Aufbereitungstechnik,1997,38(10):543-549.
- [46] KATZ A. Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete[J]. Cement and Concrete Research,2003,33(5):703-711.
- [47] KOU S C,POON C S. Properties of Concrete Pre-

- pared with PVA-impregnated Recycled Concrete Aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 649-654.
- [48] 陈建良,倪竹萍. 强化处理改善再生骨料混凝土性能试验[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(2): 14-16.
CHEN Jian-liang, NI Zhu-ping. Strengthening Treatment to Improve the Performance of Recycled Aggregate Concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(2): 14-16.
- [49] 杨宁,王崇革,赵美霞. 再生骨料强化技术研究[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(3): 45-47.
YANG Ning, WANG Chong-ge, ZHAO Mei-xia. Research on Intensifying Technique of Recycled Aggregate[J]. New Building Materials, 2011, 38(3): 45-47.
- [50] ABBAS A, FATHIFAZL G, FOURNIER B, et al. Quantification of the Residual Mortar Content in Recycled Concrete Aggregates by Image Analysis[J]. Materials Characterization, 2009, 60(7): 716-728.
- [51] 范小平,徐银芳. 再生骨料的强化试验[J]. 上海建材, 2005(4): 22-23.
FAN Xiao-ping, XU Yin-fang. Strengthening Test of Recycled Aggregate[J]. Shanghai Building Materials, 2005(4): 22-23.
- [52] 杜婷,李惠强,吴贤国. 混凝土再生骨料强化试验研究[J]. 新型建筑材料, 2002, 29(3): 6-8.
DU Ting, LI Hui-qiang, WU Xian-guo. Experimental Study on Strengthening Concrete Recycled Aggregate [J]. New Building Materials, 2002, 29(3): 6-8.
- [53] KATZ A. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6): 597-603.
- [54] 王子明,裴学东,王志元. 用聚合物乳液改善废弃混凝土作集料的砂浆强度[J]. 混凝土, 1999(2): 44-47.
WANG Zi-ming, PEI Xue-dong, WANG Zhi-yuan. Improving the Strength of Mortar with Polymer Emulsion for the Waste Concrete Aggregate[J]. Concrete, 1999(2): 44-47.
- [55] KOU S C, POON C. Properties of Concrete Prepared with PVA-impregnated Recycled Concrete Aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 649-654.
- [56] SPAETH V, TEGGUER A D. Improvement of Recycled Concrete Aggregate Properties by Polymer Treatments[J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2013, 2(2): 143-152.
- [57] TSUJINO M, NOGUCHI T, TAMURA M, et al. Application of Conventionally Recycled Coarse Aggregate to Concrete Structure by Surface Modification Treatment[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007, 5(1): 13-25.
- [58] GRABIEC A M, KLAMA J, ZAWAL D, et al. Modification of Recycled Concrete Aggregate by Calcium Carbonate Biodeposition[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 145-150.
- [59] ZHANG J, SHI C, LI Y, et al. Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates Through Carbonation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(11): 1-6.
- [60] 崔正龙,童华彬,吴翔宇,等. 高温蒸压养护对再生混凝土力学性能影响的研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(3): 596-599.
CUI Zheng-long, TONG Hua-bin, WU Xiang-yu, et al. Research on Autoclave Curing Effect of the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(3): 596-599.
- [61] AKBARNEZHAD A, ONG K C G, ZHANG M H, et al. Microwave-assisted Beneficiation of Recycled Concrete Aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8): 3469-3479.
- [62] 肖建庄,吴磊,范玉辉. 微波加热再生粗骨料改性试验[J]. 混凝土, 2012(7): 55-57.
XIAO Jian-zhuang, WU Lei, FAN Yu-hui. Test on Modification of Recycled Coarse Aggregate by Microwave Heating[J]. Concrete, 2012(7): 55-57.
- [63] 戴俊,王倩. 再生混凝土骨料剔除新技术初探[J]. 混凝土, 2014(8): 133-135.
DAI Jun, WANG Qian. Preliminary Studies on New Beneficiation Technique of Recycled Concrete Aggregate[J]. Concrete, 2014(8): 133-135.
- [64] RICHARDSON I G. The Nature of C-S-H in Hardened Cements[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8): 1131-1147.
- [65] 钱晓倩,杨青,钱匡亮,等. 搅拌工艺及纳米材料对再生混凝土性能的影响[C]//中国建筑材料联合会. 第三届中国国际新型墙体材料发展论坛暨第二届中国建材工业固废国际大会论文集. 北京:中国建材报社, 2009: 123-129.
QIAN Xiao-qian, YANG Qing, QIAN Kuang-liang. The Performance of Recycled Concrete Affected by Nano-materials and Mixing Processes [C]//China Building Material Federation. Proceedings of the Third China International New Type Wall Materials Development Forum and the Second China Building Materials Industry Waste Utilization International Conference. Beijing: China Building Materials News

- Office, 2009: 123-129.
- [66] 张津践. 再生混凝土纳米强化技术及微观结构分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
ZHANG Jin-jian. Recycled Concrete's Nano-enhancement Technology and Microstructural Analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [67] 朱勇年, 张鸿儒, 孟涛, 等. 纳米 SiO₂ 改性再生骨料混凝土工程应用研究及实体性能监测[J]. 混凝土, 2014(7): 138-144.
ZHU Yong-nian, ZHANG Hong-ru, MENG Tao, et al. Performance of Nano-SiO₂ Modified Recycled Aggregate Concrete Applied in a Real Project[J]. Concrete, 2014(7): 138-144.
- [68] JO B W, KIM C H, TAE G, et al. Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(6): 1351-1355.
- [69] LI H, XIAO H G, YUAN J, et al. Microstructure of Cement Mortar with Nano-particles[J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 35(2): 185-189.
- [70] CHEN J, KOU S C. Hydration and Properties of Nano-TiO₂ Blended Cement Composites[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(5): 642-649.
- [71] 周静海, 李婷婷, 杨国志. 废弃纤维再生混凝土强度的试验研究[J]. 混凝土, 2013(3): 1-4.
ZHOU Jing-hai, LI Ting-ting, YANG Guo-zhi. Experimental Research on Mechanical Properties of Waste Fiber Recycled Concrete[J]. Concrete, 2013(3): 1-4.
- [72] DU Y F, WANG S L, YU B S, et al. Experimental Study on Hybrid Renewable Fiber Effect on Strength of Recycled Aggregate Concrete[J]. Industrial Construction, 2013, 43(11): 12-15.
- [73] 潘超权, 朱江, 陈图真, 等. 钢纤维改性再生骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(增): 1379-1383.
PAN Chao-quan, ZHU Jiang, CHEN Tu-zhen, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Steel Fiber Modified Recycled Aggregate Concrete[J]. Industrial Construction, 2014, 44(S): 1379-1383.
- [74] 金宝宏, 詹冬. 钢纤维再生混凝土强度的试验研究[J]. 混凝土, 2014(3): 102-105.
JIN Bao-hong, ZHAN Dong. Experimental Research on Mechanical Properties of Steel Fiber Recycled Concrete[J]. Concrete, 2014(3): 102-105.
- [75] 董江峰, 侯敏, 王清远, 等. 玄武岩纤维再生混凝土的基本力学性能[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(增2): 9-12.
DONG Jiang-feng, HOU Min, WANG Qing-yuan, et al. Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(S2): 9-12.
- [76] 吴建华, 马石城, 唐昭青, 等. 聚丙烯纤维和硅粉对再生混凝土的强化试验研究[J]. 混凝土, 2006(11): 36-38.
WU Jian-hua, MA Shi-cheng, TANG Zhao-qing, et al. Intensified Test Research on the Influence of Polypropylene Fiber & Silica Fume on Recycled Concrete[J]. Concrete, 2006(11): 36-38.
- [77] TANGCHIRAPAT W, BURANASING R, JATURAPITAKKUL C. Use of High Fineness of Fly Ash to Improve Properties of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(6): 565-571.
- [78] 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(1): 7-9.
ZHANG Ya-mei, QIN Hong-gen, SUN Wei, et al. Study on Mix Proportion Design of Recycled Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2002(1): 7-9.
- [79] 王社良, 于洋, 张博, 等. 粉煤灰和硅粉对再生混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2011(12): 53-55.
WANG She-liang, YU Yang, ZHANG Bo, et al. Experimental Study on Influence of Mechanic Properties of Recycled Concrete by Fly Ash and Silica Fume[J]. Concrete, 2011(12): 53-55.
- [80] 孙庆合, 魏永起, 孟云芳. 煅烧硅藻土改性高性能再生混凝土的制备及性能[J]. 混凝土, 2012(9): 129-133.
SUN Qing-he, WEI Yong-qi, MENG Yun-fang. Preparation and Properties of High Performance Recycled Concrete (HPRC) Ameliorated by Calcined Diatomite[J]. Concrete, 2012(9): 129-133.
- [81] 王俊杰, 王海龙. 磷渣微粉对再生混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土, 2011(6): 90-93.
WANG Jun-jie, WANG Hai-long. Influences of Phosphorous Slag as Cement Replacement on the Performances of Recycled Aggregate Concrete[J]. Concrete, 2011(6): 90-93.