

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201811054

再生混凝土结构长期工作性能研究进展

曹万林¹, 赵羽习², 叶涛萍¹

(1. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124; 2. 浙江大学 结构工程研究所, 杭州 310058)

摘要: 再生混凝土结构的应用是建筑垃圾资源化利用和建筑材料可持续发展的重大需求, 受到国内外学术界和工程界的共同关注和高度重视。再生混凝土结构长期工作性能研究是再生混凝土研究的一个重要方向, 其中再生混凝土的抗冻融性能、抗碳化性能、抗氯离子渗透性能、徐变性能、再生混凝土内钢筋锈蚀及锈裂、锈蚀钢筋与再生混凝土黏结性能和再生混凝土构件的长期工作性能是决定再生混凝土结构长期工作性能的重要组成部分。本文就以上7个方面的相关研究进行了总结和分析, 归纳了亟待深入研究的问题。结果表明: 1) 以上再生混凝土长期工作性能研究均有不同程度进展, 并取得了许多较有价值的结论, 但也有部分研究结论并不完全一致, 甚至相互冲突, 究其原因, 主要因再生骨料来源、配合比设计和试验方法不同所致, 仍需进一步深入研究; 2) 多数研究围绕中、低强再生混凝土展开, 高强再生混凝土方面涉及较少, 可多开展高强再生混凝土长期工作性能研究, 与目前大力推广使用的高强钢筋同步进行, 使二者充分发挥其性能, 避免浪费; 3) 宏观规律性结论较多, 细观结构机理研究较少, 可多进行细观机理研究; 4) 相较再生混凝土材料长期工作性能研究成果而言, 再生混凝土构件和结构部分的研究相对薄弱, 后续可多开展构件或结构方面的研究; 5) 再生混凝土长期工作性能研究多为单因素作用研究, 而实际工程多为多因素耦合作用, 后续可进一步深入多因素耦合作用效果研究, 以最大程度实现理论与实际吻合。期望本文能为后续再生混凝土长期工作性能的研究提供思路 and 方向, 为再生混凝土的推广应用提供数据和理论支持。

关键词: 再生混凝土; 再生粗骨料; 长期工作性能; 研究进展

中图分类号: TU37

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)06-0001-17

A review of recent advances in the long-term working characteristic of recycled concrete structure

CAO Wanlin¹, ZHAO Yuxi², YE Taoping¹

(1. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China;

2. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The application of recycled concrete structure is in line with the utilization of construction waste resources and the sustainable development of building materials. It has received attention from academic and engineering circles at home and abroad. The long-term working characteristic of recycled concrete structures is an important aspect in the research of recycled concrete, among which the freezing and thawing resistance, carbonation resistance, chloride-permeation resistance, creep of recycled concrete, steel corrosion and rust cracking in recycled concrete, corroded steel and recycled concrete bonding properties, and long-term performance of recycled concrete components are essential components to determine the long-term working performance of recycled concrete structures. The above-mentioned qualities of recycled concrete structures are studied in this paper, which is summarized as follows: 1) Progress has been made on the long-term working characteristic of recycled concrete structures, and some valuable conclusions have been drawn. However, some of the research conclusions are not completely consistent or even mutually exclusive, which might be attributed to the difference in recycled aggregate, mix design, and test methods. Therefore, further research is still needed. 2) Most of the research is mainly based on medium and low-strength recycled concrete, involving less on high-strength recycled concrete. More research on the long-term working characteristic of high-strength recycled concrete should be conducted along with the promotion of high-strength steel bars, so that recycled concrete and steel bars can fully draw on their respective advantages and waste can be avoided. 3) There are many macro researches yet few micro studies, so research on micro study should be enhanced. 4) Compared with the research results of long-term working characteristic of recycled concrete materials, the research on recycled concrete component and structural parts is relatively scarce, and subsequent research on components or structures should be carried out. 5) Long-term working characteristic of recycled concrete studies are mostly single factor studies, while engineering is mostly multi-factor coupling. Multi-factor coupling research can be carried out in the future in order to combine theory with practice. It is expected that this paper is able to provide ideas and directions for the study of the long-term working characteristic of recycled concrete, and provide statistical and theoretical support for the promotion and application of recycled concrete.

Keywords: recycled concrete; recycled coarse aggregate; long-term working characteristic; research progress

收稿日期: 2018-11-07

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703304);
国家自然科学基金(51878015)

作者简介: 曹万林(1954—), 男, 教授, 博士生导师;
赵羽习(1973—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 赵羽习, yxzhao@zju.edu.cn

再生骨料混凝土(以下简称“再生混凝土”)是指将建筑垃圾中含量较高的废弃混凝土块经破碎、清洗、分级、整形而得的再生骨料, 部分或全部代替天然骨料配制而成的混凝土。它不仅解决因大

量危旧建(构)筑物拆除产生的废弃混凝土处理困难及由此造成的环境质量恶化问题;同时还可以减少天然砂石的开采,缓解天然骨料日趋匮乏的压力、降低因大量开采自然资源造成的生态环境破坏,保护环境;是建筑垃圾资源化再利用的重大举措,也是实现资源与环境协调发展、可持续发展的重要途径,必将带来良好的社会、环境及经济效益,值得学术界和工程界的共同关注和高度重视。

然而,再生骨料表面粗糙,棱角分明,且有较多微裂纹,其基本性能与天然骨料相比,差异较大,如孔隙率大、吸水率大、密度小等,直接影响再生混凝土材料及构件的力学性能及耐久性能.再生骨料按粒径大小分再生粗骨料和再生细骨料两类,本文主要围绕再生粗骨料配制的再生混凝土进行综述。

对比分析发现,再生粗骨料与天然粗骨料基本

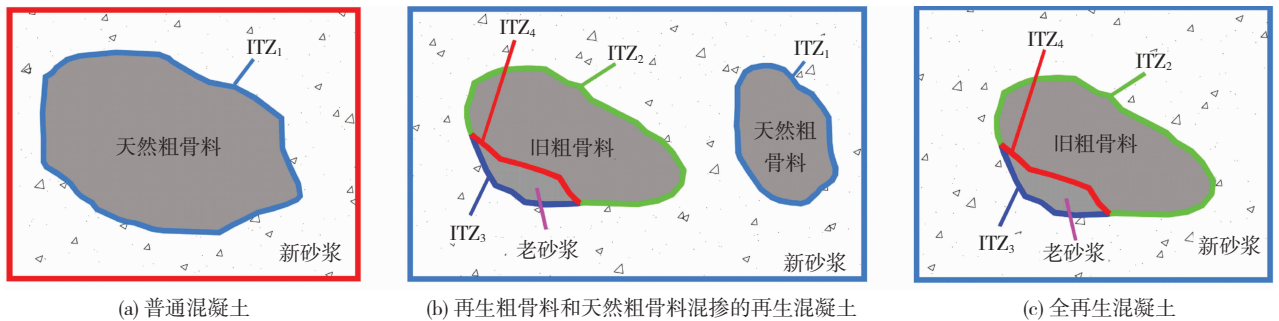


图 1 不同再生粗骨料取代率混凝土内部界面过渡区图

Fig. 1 Transition zone of internal interface of concrete with different recycled coarse aggregate replacement ratio

目前,关于再生混凝土性能及应用技术的研究较多,尤其以普通环境下再生混凝土材料或基本构件的短期力学性能研究居多,并总结出了其主要受力特点和性能规律,但这并不能完全代表实际工程所处的各种复杂环境下的工作性能,如:所处环境长期遭受温湿交替变化、有害介质的侵蚀或荷载的长期持续作用……而这些恰恰是再生混凝土结构长期工作无可避免的情形,也是大力推广再生混凝土应用必须进行的研究方向.其中,再生混凝土的抗冻融性能、抗碳化性能、抗氯离子渗透性能、徐变性能、再生混凝土内钢筋锈蚀及锈裂、锈蚀钢筋与再生混凝土黏结性能和再生混凝土构件长期工作性能,均是组成再生混凝土结构长期工作性能的重要部分.本文就上述 7 个方面的相关研究进行了综述和讨论,并对今后尚待开展的研究进行展望,以期对再生混凝土结构长期工作性能的进一步研究和再生混凝土的推广应用提供参考。

1 再生混凝土抗冻融性能

混凝土凝固硬化后,其内部孔隙中遗存的游离水和通过孔隙渗入的水会在环境温度下降到一定时

性能的不同,主要与其表面附着的疏松多孔的老砂浆有关,即再生粗骨料自带“旧粗骨料-界面-老砂浆”属性,当与水泥、砂、水等搅拌制备再生混凝土时,会与新砂浆形成更多界面过渡区,图 1 为不同再生粗骨料取代率混凝土内部界面过渡区图.由图 1 可知:1) 只有一种界面过渡区(天然粗骨料与新砂浆);2) 有 4 种界面过渡区(天然粗骨料与新砂浆,旧粗骨料与新砂浆,新砂浆与老砂浆,旧粗骨料与老砂浆);3) 有 3 种界面过渡区(旧粗骨料与新砂浆,新砂浆与老砂浆,旧粗骨料与老砂浆). Ollivier 等^[1]早在 20 世纪 90 年代就已证实,水泥基材料的薄弱环节是界面过渡区,即相同条件下再生混凝土较普通混凝土有更多更复杂的界面薄弱环节,这是普通和再生混凝土材料在细观结构的本质差异,是导致再生混凝土材料、构件及结构性能劣化的根本所在。

受冻结冰.当混凝土处于饱水状态时,毛细孔中的水结冰膨胀,产生膨胀压力^[2];凝胶孔中的水因其孔径很小而处于过冷而不结冰状态,并向毛细孔中冰的界面渗透,产生渗透压力^[3].混凝土毛细孔壁在膨胀压力和渗透压力共同作用下,孔壁破坏,内部开裂.而混凝土所处环境温度周期性升降,其内部的水冻成冰、冰融成水,循环反复,内部微裂纹不断产生和繁衍,损伤不断积累^[4].如果混凝土受冻结冰在强度形成初期发生,将会引起严重的强度损失和混凝土破坏^[5].

1.1 再生粗骨料的影响

文献[6-23]研究发现,再生混凝土抗冻性能较普通混凝土差,主要因为再生粗骨料孔隙率大,容易吸水饱和(10 min 便可达到饱和度的 85% 以上,30 min 能达 95% 左右).根据 Witesides 等^[24]研究结果(混凝土冻融破坏的临界饱和度约 92%)可知,再生粗骨料易于新水泥基体发生冻融破坏,成为决定再生混凝土冻融性能的关键.各国学者进行混凝土冻融性能试验方法不同,用于表征其抗冻性能指标不尽相同,中国的慢冻法用质量损失和抗压强度损失评价,快冻法和 ASTM 的快冻法主要用质量损失

和相对弹性模量评价.在冻融循环过程中,强度损失和质量损失越大,说明其抵抗冻融破坏的能力越差.曹万林等^[6]、韩古月等^[7]研究发现,再生混凝土经过冻融循环后的质量损失率随再生粗骨料取代率的增加而增大,即再生混凝土抗冻性能随再生粗骨料取代率的增加而减弱,且随冻融循环次数的增加,质量损失率增大,变化规律与普通混凝土相似,但普通和再生混凝土间质量损失率差值变小,见图2.其中,纵坐标中的相对值是再生混凝土与普通混凝土相应值的比值,下文如其类似,不再赘述.但文献^[25-28]试验发现,再生混凝土仍具较好抗冻性能,甚至优于普通混凝土.其中,Hendriks等^[28]指出再生粗骨料较大的孔隙率功不可没,其有微养护和降低界面水灰比作用.

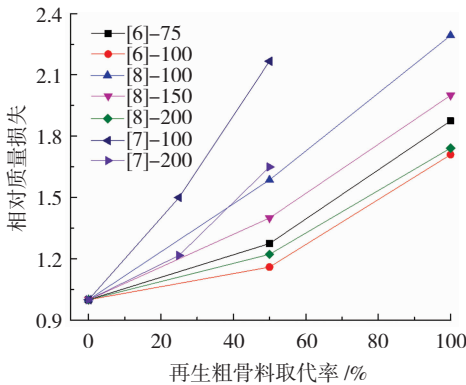


图2 再生混凝土冻融循环后的相对质量损失和再生骨料取代率关系

Fig. 2 Relationship between relative mass loss of recycled concrete after freeze-thaw cycle and recycled aggregate replacement ratio

Gokce等^[9]研究了再生混凝土冻融性能与再生粗骨料母体混凝土是否引气的关系,结果发现,未引气母体混凝土制备的再生混凝土抗冻性能明显低于普通混凝土,而引气母体混凝土制备的再生混凝土抗冻性能优于普通混凝土,引气与非引气母体混凝土混合配制的再生混凝土抗冻性能明显下降.引气剂的使用可提高混凝土抗渗性、抗裂性及抗冻性,影响再生骨料性能.引气母体混凝土虽在其内部形成较多气孔,但在骨料破碎过程中被大部分剔除,剩下颗粒粒径较小的再生骨料,而这些粒径较小的再生骨料在再生混凝土冻融循环过程中很难传播微裂纹,开裂程度降低,冻融性能改善.而未引气母体混凝土在破碎过程中,附着老砂浆存在严重微裂纹,且随粗骨料自身的解体,磨损颗粒表现出局部缺陷,对新砂浆造成破坏,裂缝形成后,再生混凝土出现严重破坏.但Dillmann^[10]研究发现再生混凝土冻融性能受母体混凝土强度影响甚微.对此,不同学者持有不

同见解,尚需进一步研究.

1.2 外加剂等的影响

Salem等^[11]试验发现,14%粉煤灰取代水泥的再生混凝土抗冻性能变化很小,当取代率增至28%时,抗冻性能明显提高.安新正等^[12]研究发现,单掺砖粒30%及以下,对再生混凝土抗冻性能影响很小,当掺量50%时,抗冻性能下降明显;在砖粒掺量分别为30%和50%、对应粉煤灰掺量分别为15%和10%时,对再生混凝土抗冻性能最有利.陈爱玖等^[13]利用扫描电镜和螺旋CT扫描技术研究了钢纤维橡胶再生混凝土的宏观和细观结构及其对抗冻性能的影响.结果发现,橡胶颗粒掺量是影响再生混凝土抗冻性能的主要因素,当其掺量(与砂的体积比)为20%时抗冻性能最好,掺量超过20%后,随着掺量的增大,混凝土内部孔洞数目增多,抗冻性能减弱;而钢纤维掺量的增强作用较小.覃银辉等^[14]对掺有防冻剂的再生混凝土进行了抗冻性能试验研究,发现YJ-4型防冻剂对提高再生混凝土抗冻性能有重要作用,是再生混凝土冬季施工的不二之选.

王晨霞等^[15]进行了盐碱与冻融耦合作用下再生混凝土耐久性能试验,分析了再生混凝土在同浓度不同种类盐碱溶液中经受不同冻融循环次数后的质量变化和动弹性模量变化.结果发现,3.5%的单盐和复合盐冻比水冻更具破坏性,且破坏性由强到弱的排序为:氯盐冻(NaCl) > 硫酸盐冻(Na₂SO₄) > 复合盐冻(NaCl + Na₂SO₄) > 水冻.

1.3 细微观研究

Gokce等^[9]对冻融后的再生混凝土进行了显微分析,发现微观裂缝首先出现并集中于再生粗骨料附着老砂浆,继而诱发其周围新砂浆形成裂缝,经过冻融循环后,裂缝于新砂浆中贯通,最终导致冻融破坏.魏毅萌等^[16]基于核磁共振(NMR)技术,对再生混凝土冻融破坏过程中内部孔隙分布及变化展开了研究.结果发现,混凝土内部孔隙扩展随着再生粗骨料取代率的增加而变得显著,抗冻性能降低,与图2的变化趋势相符.同时发现,采用核磁共振测得的再生混凝土内部孔隙分布变化及孔隙体积变化率能很好的反映再生混凝土抗冻性能,可作为衡量再生混凝土结构抗冻性能的指标.

1.4 改性措施

文献^[9,13,17]研究发现通过掺加引气减水剂即降低水灰比可以提高再生混凝土抗冻性能.文献^[11,17]试验发现掺加引气剂的再生混凝土抗冻性能明显提高,甚至超过普通混凝土.关瑞等^[18]通过试验发现,纳米SiO₂掺量1%和1.5%的纳米再生混凝土,其抗冻性能明显优于一般再生混凝土.陶爱

玖等^[13]研究发现在再生混凝土中掺入聚丙烯纤维,能有效抑制其冻胀开裂,提高抗冻性能。Oliveira 等^[19]、Gokce 等^[9]、Salem 等^[11]、肖开涛^[20]和 Rottler^[21]通过试验发现,降低再生粗骨料水饱和度、对再生骨料进行改性处理、掺加粉煤灰或偏高岭土等矿物掺合料以及减小再生骨料粒径均可提高再生混凝土抗冻性能。

张雷顺等^[17]发现通过增浆法(对再生骨料进行预湿水到饱和面干,并增加设计水泥浆 10% 作为再生粗骨料预裹浆)可明显改善再生混凝土抗冻性能,与陈爱玖等^[13]提出的裹水泥浆改善再生粗骨料来提高抗冻性能类似。霍俊芳等^[22]针对等砂浆配比设计法(简称“EMV 法”,即在配合比设计时,保证再生和普通混凝土中总砂浆含量相等)配制的再生混凝土存在工作性能缺陷,在原 EMV 法基础上掺加高效减水剂和粉煤灰进行改进,结果发现采用改进的 EMV 法配制再生混凝土,不仅可以解决原有工作性能缺陷,还可较好改善其抗冻性能。韩古月等^[7]通过对再生骨料进行颗粒优质整形,发现此举可明显改善再生混凝土抗冻性能。覃银辉等^[23]研究发现延长再生混凝土预养龄期对抗冻性能有利。

1.5 小结

综上,多数研究者发现再生混凝土抗冻性能较普通混凝土差,且随再生粗骨料取代率的增加而降低,主要因为再生粗骨料表面附有老水泥砂浆,孔隙率大,导致再生混凝土具有高吸水率且极易吸水饱和。但可通过减小再生混凝土内部孔径、细化内部孔结构、减小空气泡间距、改善再生粗骨料质量或优化施工工艺等来提高再生混凝土抗冻性能,如上文提到的添加适量的抗冻剂、减水剂、引气剂、掺合料(粉煤灰、偏高岭土、纳米 SiO₂ 或聚丙烯纤维),对再生粗骨料进行颗粒整形,增浆法,改进的 EMV 法,延长再生混凝土预养护龄期等均可提高再生混凝土抗冻性能。

然而,分析发现,以往的研究主要围绕中、低强再生混凝土展开,涉及到高强再生混凝土的较少;宏观规律性的研究成果较多而细微观机理研究较少;且多数为单纯冻融循环的研究,冻融与其它因素耦合的研究较少。再生骨料因为来源的不同,性能存在差异,且有吸水返水的特性,其抗冻机理较普通混凝土更为复杂,如要完全掌握其性能,仍需更多研究来不断完善。鉴于目前的研究成果,今后可多进行高强再生混凝土冻融性能研究、再生混凝土细微观机理研究、冻融和其它因素耦合作用的研究以及单掺再生细骨料和双掺再生粗细骨料的再生混凝土抗冻性能研究。

2 再生混凝土抗碳化性能

混凝土碳化是混凝土中性化最普通的发生形式,即空气中的 CO₂ 渗透到混凝土的孔隙和毛细孔中,并溶于孔中液体与水泥水化作用产物 Ca(OH)₂、CaSiO₃ 等反应生成 CaCO₃,堵塞混凝土的部分凝胶孔和毛细孔,使混凝土的密实性、抗压强度和脆性增加。同时,混凝土碱度和 PH 值下降,可破坏钢筋表面钝化膜,引起钢筋锈蚀,加剧其收缩变形,导致裂缝出现、黏结力降低,甚至导致钢筋保护层剥落。

2.1 再生粗骨料的影响

再生骨料的掺加,对再生混凝土碳化主要产生两方面的影响:1) 负面影响:再生骨料孔隙率较天然骨料大,导致再生混凝土孔隙率和吸水率较同水胶比的普通混凝土大,CO₂ 更易渗透到再生混凝土内部与水泥砂浆中的 CH 晶体反应,加快碳化速度,增大碳化深度^[29-30],抗碳化性能降低;2) 正面影响:再生骨料表面附着的老水泥砂浆,使再生混凝土总水泥含量增加,可碳化物质增多,对抗碳化性能有利。因此,再生混凝土碳化性能要同时受上述正负两方面的影响,其碳化结果是二者的综合。

文献[31-35]研究发现,相同环境或试验条件下,再生混凝土的碳化深度较普通混凝土大。本文归纳总结了部分参考文献中再生混凝土碳化深度随再生粗骨料取代率变化的情况,见图 3。

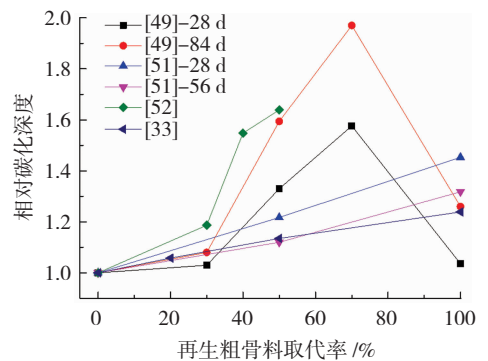


图 3 再生混凝土相对碳化深度和再生骨料取代率关系

Fig. 3 Relationship between relative carbonization depth of recycled concrete and recycled aggregate replacement ratio

文献[36-39]研究发现,再生混凝土碳化深度随再生粗骨料取代率的增加而增大,只是增幅不同, Silva 等^[35]通过大量前人试验数据归纳发现,100% 再生粗骨料取代的再生混凝土最大碳化深度可高达普通混凝土的 3.5 倍; Xiao 等^[32]研究发现再生混凝土的碳化深度随再生粗骨料取代率的增加呈现先增后减的变化,当取代率 70% 时,由再生粗骨料造成的负面影响达到最大,其碳化深度达到峰值,当取代率超过 70% 时,由再生骨料带来的负面影响开始小

于其正面影响,碳化深度降低.但 Ryu^[40] 研究发现再生混凝土碳化性能与再生粗骨料含量几乎无关.

Xiao 等^[32] 研究发现,再生混凝土碳化深度随再生粗骨料母体混凝土强度的增大而减小,当废弃混凝土母体强度较大时,再生混凝土抗碳化性能较好,甚至与普通混凝土相当. Poon 等^[41] 发现,再生混凝土碳化深度随再生粗骨料附着砂浆强度的增大而降低. Vieira 等^[42] 研究发现再生粗骨料颗粒直径影响再生混凝土碳化性能.但 Ryu^[40] 研究发现,再生混凝土碳化性能几乎不受再生粗骨料母体混凝土强度及其表面附着老砂浆质量的影响.

2.2 外加剂等的影响

Xiao 等^[32] 试验发现,再生混凝土碳化深度随水胶比的增加而增大,且相同水胶比下,随水泥用量的增加而减小;Xiao 等^[32] 同时研究了粉煤灰、硅灰和矿渣分别 10% 取代细骨料对再生混凝土碳化性能的影响,结果发现,添加这些矿物掺合料,虽然改善了内部孔结构、减小了总孔隙率,改善了再生粗骨料新旧砂浆界面过渡区,但水泥用量的减少降低了碱类物质含量,碳化深度不减反增,说明碱含量减少的负作用超过了内部密实度的改善作用.这与孙浩^[39] 得出的掺加粉煤灰会增大碳化深度的结论一致,但与掺加矿渣后碳化深度明显减小的结论相冲突. Matias 等^[43] 研究发现,使用高效减水剂的再生混凝土,其碳化深度低于普通混凝土,但随着时间的延续,改善效果逐渐减小,最终超过普通混凝土. Katz^[44] 研究了不同类型水泥对再生混凝土碳化性能的影响,结果发现使用白水泥的再生混凝土碳化深度较使用普通水泥小.

陈云钢^[38] 研究发现,掺加 Kim 粉结晶型和结晶渗透型液状界面改性剂对再生混凝土碳化性能影响较小.薛建阳等^[45] 用硅酸钠溶液处理过的再生骨料配制再生混凝土,结果发现其抗碳化性能降低. Shayan 等^[46] 将硅灰和石灰加入硅酸钠溶液,然后用该溶液对再生粗骨料进行浸渍表面处理,结果发现,虽强化了新旧砂浆界面过渡区,但硅酸钠溶液拥有很高的 CO₂ 吸附能力,碳化速率增大,抗碳化性能不仅没有提高反有不利影响.唐清照^[47] 研究了不同掺量橡胶颗粒对再生混凝土碳化性能的影响,结果发现,橡胶掺量 10% ~ 15% 时其抗碳化效果较好,0% ~ 10% 和 15% ~ 30% 时效果较差.

雷斌等^[48] 通过计算分析了再生混凝土梁截面碳化深度的分布,结果发现,梁截面上碳化深度分布并不均匀(受压区角部碳化深度值最小,受拉区角部最大,其值是受压区一般边数值的 2.2 倍,是相应无应力状态下同配比普通混凝土梁一般边的 2.4 倍).

2.3 细微观研究

李秋义等^[49] 研究了碳化作用对再生混凝土界面过渡区显微硬度及宽度的影响,从微观层面揭示碳化反应对再生混凝土的作用机理.研究发现,碳化反应能够提高再生混凝土中水泥浆体和界面过渡区的密实度和显微硬度;再生混凝土强度相同时,界面孔隙率的大小以及碳化作用对旧骨料 - 新浆体界面的影响最大,其次是旧骨料 - 老浆体界面,最小是老浆体 - 新浆体界面.秦睿等^[50] 对碳化前后的再生混凝土进行了电镜扫描,从微观角度证实了再生混凝土的碳化速度随碳化天数的增长而有所降低以及碳化作用与再生混凝土抗压强度之间的关系.

2.4 改性措施

孙浩^[39] 发现适量掺加矿渣粉和钢渣粉可以减小再生混凝土碳化深度,但不宜过多,其掺量应分别控制在 30% 和 10% 以下.王忠星等^[52] 通过研究发现,增加再生粗骨料颗粒整形次数可提高再生混凝土抗碳化性能,若颗粒整形后再经有机硅烷浸渍会进一步增强抗碳化性能,只要整形次数和处理方法得当,抗碳化性能不仅能与普通混凝土相当,甚至更好.闫春玲等^[53] 提出在再生混凝土中掺加碳纤维对提高抗碳化性能有利,并建议碳纤维体积率宜控制在 0.5% ~ 1.5%. Otsuki 等^[54] 发现采用二次搅拌工艺可减小再生混凝土碳化深度.

2.5 小结

综上,关于再生混凝土碳化性能的研究结论并不完全一致,有些甚至相互冲突,但多数研究者比较认同再生混凝土碳化深度比普通混凝土大,且随再生粗骨料取代率增加而增大的变化规律,说明再生骨料中可碳化物质增多的有利影响不及其孔隙率大带来的负效应.对此,可通过使用优质水泥、减小水灰比、掺加适量掺合料(矿渣粉、钢渣粉或碳纤维等)、进行颗粒整形或改善施工工艺等方法来减小总孔隙率、改善孔结构以实现再生混凝土碳化深度的减小.

尽管如此,再生混凝土碳化性能研究仍有几点需要深入进行:1)对已有研究结论中尚存的相互冲突的部分展开深入研究,查找原因,完善理论体系;2)再生混凝土碳化性能改善措施需要深入探索,尽量实现在保证可碳化物质不减的前提下,实现总孔隙率减小或孔结构的改善;3)对单掺再生细骨料及双掺再生粗细骨料的再生混凝土碳化性能展开研究,寻找规律;4)细微观机理研究尚需进一步加强,无论是相互矛盾结论的原因查找,还是一致认识的解释,均需要细微观研究的支撑.

3 再生混凝土抗氯离子渗透性能

大量工程实践证实,引起钢筋锈蚀的主要因素是氯离子侵蚀,原因主要有两点:1) 氯盐在很多环境中存在,如海水、盐渍土和工业废水;2) 氯离子具有很强的穿透力,当钢筋周围混凝土孔隙液中氯离子超过一定浓度时,即使碱度较高,氯离子也能破坏钢筋表面钝化膜,引起锈蚀发生,同时在钢筋锈蚀过程中氯离子仅起催化作用,并不改变锈蚀产物组成,且其在混凝土中的含量也不会因为腐蚀反应的进行而有所损耗.可见,氯离子侵蚀是导致混凝土耐久性退化的重要原因.而在诸多氯离子侵蚀方式中,以扩散、渗透和毛细作用为主.

3.1 再生粗骨料的影响

多数研究者^[33,55-57]通过试验发现再生混凝土的抗氯离子渗透性较普通混凝土差,且随再生粗骨料取代率的增加而降低,即氯离子渗透性增加,见图 4.

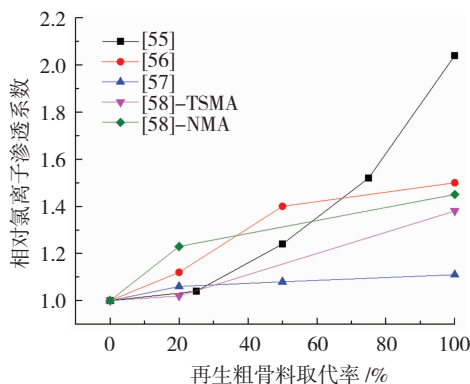


图 4 再生混凝土相对氯离子渗透性与再生骨料取代率关系
Fig. 4 Relationship between relative chloride ion permeability of recycled concrete and recycled aggregate replacement ratio

Wang 等^[58]研究发现,相同配比下再生混凝土的抗氯离子渗透性较普通混凝土低 14%; Olorunsogo 等^[59]研究发现,全再生混凝土 28 d、56 d 龄期的氯离子导电率较普通混凝土分别高 73.2% 和 86.5%; 罗伯光等^[55]通过 NEL 法测得全再生混凝土的氯离子渗透性是普通混凝土的 2.04 倍; Xiao 等^[32,60]通过不同的再生粗骨料质量、配合比、施工工艺及试验方法,发现再生混凝土的氯离子渗透性随再生粗骨料取代率的增加而增大.

3.2 外加剂等的影响

文献^[61-62]研究发现,再生混凝土的氯离子渗透性随水灰比的增大而增大, Andreu 等^[63]发现低水灰比再生混凝土的氯离子渗透性与普通混凝土类似, Villagrán-Zaccardi 等^[62]发现水灰比对氯离子含量的影响大于再生粗骨料取代率的影响,建议在高氯化物侵蚀地区将含水量限制在最小值. Vázquez

等^[64]研究发现,水泥类型、水胶比、水化程度、养护龄期及再生骨料取代率均可影响再生混凝土的氯离子渗透性,且发现低水灰比高再生粗骨料取代率的再生混凝土抗氯离子侵蚀能力较普通混凝土好.

文献^[64-66]研究发现再生混凝土的抗氯离子渗透性随粉煤灰掺量的增加先增后减. 罗伯光等^[55]试验发现硅灰能提高再生混凝土的抗氯离子渗透性,且效果较好,掺量 8% 能提高 30% ~ 62%, 而粉煤灰的效果与矿渣相当. 张景琦等^[67]通过 RCM 法计算研究了单掺或复掺矿物掺合料对再生混凝土氯离子渗透系数的影响,结果发现单掺普通矿粉的氯离子渗透系数比单掺粉煤灰的约降 50%; 在矿粉或粉煤灰中掺入超细矿粉或硅灰均能提高抗氯离子能力,尤其是双掺矿粉和硅灰比单掺矿粉能提高近 60%.

3.3 改善措施

罗伯光等^[55]、Berndt^[68]、Kou 等^[69]研究发现掺加矿渣或粉煤灰和矿渣双掺均可改善再生混凝土的抗氯离子渗透性能. 上官玉明等^[70]、王俊杰等^[71]、郝建民^[72]、Abbas 等^[73]、张津践^[74]和 Tam 等^[75]研究发现,对再生骨料进行颗粒整形、掺加磷渣微粉、掺加橡胶粉、用 EMV 法处理并掺加粉煤灰或矿渣、掺加高活性纳米 SiO₂、纳米 CaCO₃ 与纳米改性矿物掺合料双掺以及利用 H₂SO₄ 和 H₃PO₄ 溶液预浸泡再生骨料均可提高再生混凝土抗氯离子渗透性. Otsuki 等^[54]和 Ryu^[76]研究发现二阶段搅拌法或二次搅拌法均可提高再生混凝土抗氯离子渗透性. Bravo 等^[77]发现增加混凝土养护时间对再生混凝土抗氯离子渗透性有积极作用.

3.4 小结

综上,再生混凝土抗氯离子渗透性较普通混凝土差,且随再生粗骨料取代率的增加而减弱,但可通过一系列的措施来进行改善,如降低水胶比、选用合适外加剂或掺合料、进行再生骨料颗粒整形、改善施工工艺、延长养护时间等,只要处理得当,其抗氯离子渗透性能完全不输普通混凝土,甚至更优.但目前多数研究围绕再生粗骨料展开,而对再生细骨料或双掺再生粗细骨料的研究较少.另外,实际工程所处环境复杂多变,同时受多因素影响,特别是使用在海洋环境中的结构,不仅遭受氯盐侵蚀,还遭受硫酸盐侵蚀、碳化作用、冻融循环以及干湿循环等共同作用.

因此,今后可多开展以下几方面研究:1) 多因素共同作用下再生混凝土氯离子渗透性能研究,以最大限度与真实环境接近,指导实践;2) 以再生细骨料或再生粗细骨料混掺的再生混凝土为对象,进行氯离子渗透性能研究,探索其适用性及相应的改

善措施,推动和指导再生混凝土的工程应用。

4 再生混凝土徐变性能

混凝土在恒载作用下,随着时间的增长而持续增大的变形称为徐变。其中,砂浆是引起混凝土产生徐变的重要原因。而再生混凝土由于再生骨料表面老砂浆的存在,使其总砂浆含量较普通混凝土高,在长期恒载作用下,总砂浆含量高的再生混凝土的徐变较普通混凝土大。

4.1 再生粗骨料的影响

罗素蓉等^[78]通过试验发现,再生混凝土拉伸徐变增长规律同普通混凝土:早期发展迅速,后期发展减缓并趋于稳定;随再生粗骨料取代率的增加而增大,持荷 14 d 时,再生粗骨料取代率 50% ~ 100% 的再生混凝土拉伸徐变较普通混凝土增加 8% ~ 31%,基本徐变增长 7% ~ 23%。Domingo 等^[79]研究表明再生混凝土的徐变比普通混凝土大 51%。Gómez - Soberón 等^[80]研究发现再生混凝土徐变值较普通混凝土最大可增加 24.6%。Mellmann 等^[81]研究发现全再生混凝土徐变值比普通混凝土高 60%。可见,相同配比及持荷作用下,再生混凝土徐变较普通混凝土大,且随再生粗骨料取代率增加而增大,见图 5。

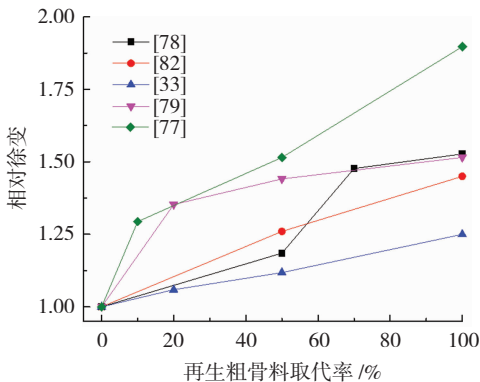


图 5 再生混凝土相对徐变和再生骨料取代率关系

Fig. 5 Relationship between relative creep of recycled concrete and recycled aggregate replacement ratio

4.2 外加剂等的影响

Ravindrarajah 等^[83-84]研究发现,再生混凝土徐变随强度等级的增加而减小,随再生粗骨料附着砂浆含量的增加而增大;随水灰比增加而增大,但随水灰比和荷载水平的变化,再生和普通混凝土徐变差值几乎不变。Dhir 等^[85]通过使用减水剂发现再生混凝土徐变减小了 30%;Cartuxo 等^[86]发现通过添加高减水率(60%)减水剂后再生混凝土徐变应变可减小 60%。

罗素蓉等^[78]研究发现,再生混凝土拉伸徐变随粉煤灰、粉煤灰和矿渣掺量的增加而增大,单掺

30% ~ 60% 粉煤灰和复掺 30% ~ 60% 粉煤灰和矿渣可使再生混凝土拉伸徐变分别增加 8% ~ 32% 和 3% ~ 22%。主要因为粉煤灰活性较水泥差,使得掺加粉煤灰的再生混凝土早期强度低且增长缓慢,掺量的增加必然引起相应拉伸徐变的增大;而矿渣活性较粉煤灰高,相同掺量下,复掺矿渣和粉煤灰比单掺粉煤灰徐变增长缓慢。而黄海生等^[87]研究发现适量单掺粉煤灰或复掺粉煤灰和矿粉均能对再生混凝土徐变起到有效控制,且单掺掺量 40% 和 30% 时效果最佳,而复掺效果更优。得出此结论的主要原因是矿物掺合料增加了再生混凝土的密实性和整体性。

4.3 改善措施

Dhir 等^[85]和 Cartuxo 等^[86]发现添加减水剂可有效减小再生混凝土徐变应变。Kou 等^[36]发现用粉煤灰替代 35% 水泥的再生混凝土,其 112 d 龄期的徐变较未添加粉煤灰的再生混凝土减小 20%。Fathifazl 等^[88]设计并使用了等砂浆配比法(上文提到的 EMV 法),发现再生混凝土徐变与普通混凝土相当甚至更低。Tam 等^[57]研究证实,相较于传统的一次搅拌法,采用二阶段搅拌法,可使再生混凝土的徐变应变减小 6%,通过调整混凝土的搅拌流程,有望将全再生混凝土的徐变应变减小 23%。Hiroshi 等^[89]发现采用 DC - RR 搅拌法,即经过正常搅拌程序后,再加上减压、快速释放两道程序,能够改善再生粗骨料与新水泥基体间界面的质量,可使再生混凝土徐变降低 20% 左右,与普通混凝土接近。

4.4 小结

综上,再生混凝土因再生骨料表面附着老砂浆的存在,其砂浆总含量增加,徐变增大,且随再生粗骨料取代率的增加而增大,但变化规律与普通混凝土相同,早期发展迅速,后期发展减缓并趋于稳定。可通过使用减水剂、掺加适量粉煤灰或复掺粉煤灰和矿粉、改善施工工艺等方法来减小徐变。理论上,能够改善再生混凝土干缩变形的措施均能减小其徐变,如掺加钢纤维、膨胀剂等,但这些尚需进一步试验验证。

因此,再生混凝土徐变性能研究仍有几个方面需要深入开展:1) 细观机理研究,深层次剖析其变化过程;2) 进一步探索减小徐变的改善措施,弥补目前研究的不足;3) 再生混凝土徐变物理模型的建立;4) 单掺再生细骨料及双掺再生粗细骨料对再生混凝土徐变性能的影响。

5 再生混凝土内钢筋锈蚀及锈裂

混凝土内钢筋锈蚀及混凝土构件锈胀开裂是混凝土结构耐久性退化的主要原因。钢筋锈蚀后产物

体积是原体积的 2~6 倍,其将对周围混凝土产生锈胀力,引起混凝土开裂,使有害介质更易进入混凝土内部,加速钢筋锈蚀.而再生混凝土由于其材料性能更差,耐久性退化更严重,存有内部钢筋锈蚀更早、锈胀裂缝发展更快的问题.

5.1 再生混凝土内钢筋锈蚀

Zhao 等^[90-92]对再生粗骨料取代率分别为 0%、33%、67% 和 100% 的 4 种混凝土采用干湿循环(每周周期浸泡于 3.5% 的 NaCl 溶液中 3 d,随后干燥 4 d)、通电等方法对其进行了加速锈蚀,并通过线性极化法、环氧包膜技术等测量钢筋锈蚀速率,对再生混凝土内钢筋始锈时刻及锈蚀速率时变规律进行了研究.结果发现,4 种混凝土内钢筋锈蚀电流密度时变曲线均存在波动,但总体趋势保持增长,且随再生粗骨料取代率的增加而增大,见图 6;相同侵蚀环境和时间内,混凝土内钢筋锈蚀率随再生粗骨料取代率增加而增大,但不成线性增长,当再生粗骨料取代率较低时钢筋锈蚀率与普通混凝土相差不大,而当取代率较高时钢筋锈蚀率明显增大.以上研究结论与 Corral 等^[93]和孙平等^[94]的一致.张椿民等^[95]研究发现,与再生骨料取代率相比,水灰比的增加使钢筋始锈时刻明显提前,当取代率和水灰比同时增大时,钢筋更易发生锈蚀.

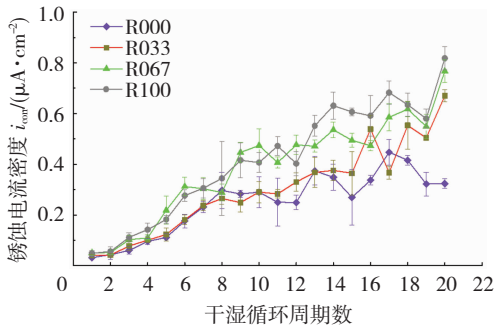


图 6 不同再生粗骨料取代率混凝土内钢筋锈蚀电流密度与时间关系^[92]

Fig. 6 Relationship between corrosion current density of steel in concrete with different recycled aggregate replacement ratio and time^[92]

朱燕等^[96]对比研究了水胶比和粉煤灰掺量对普通和再生混凝土内钢筋锈蚀的影响.结果发现,在水胶比和粉煤灰一定时,再生混凝土内钢筋锈蚀更严重;但再生混凝土内钢筋锈蚀规律与普通混凝土相同,随水胶比的增大而加重、随粉煤灰掺量的增加而先减后增.

5.2 再生混凝土锈裂

Zhao 等^[90-92]在 5.1 节再生混凝土内钢筋锈蚀的基础上,对再生混凝土的锈裂时刻、裂缝开展过程及形态进行了研究.结果发现,试件达到表面开裂时刻所需的钢筋锈层厚度 $T_{r,c}$ 随着再生骨料取代率的

增大而减小,见图 7,但低再生骨料取代率的再生混凝土,其表面锈裂时刻不会明显早于普通混凝土.并从试验切片中选取典型的能够代表不同再生骨料取代率混凝土的锈胀裂缝开裂路径的试样绘制裂缝开展路径示意图,见图 8.由图 8 可知,锈胀裂缝在钢筋-混凝土界面产生后,随着钢筋锈蚀的继续,裂缝尖端在水泥砂浆中向保护层表面开展,其开展路径主要沿天然或再生粗骨料与砂浆的界面展开,但也可能会开展到再生粗骨料内部,见图 8(b)中的框 1.此外,再生混凝土中新旧砂浆之间的界面粘结性能更好,而在同时存在多种界面的区域,锈胀裂缝更倾向于沿着天然粗骨料与砂浆的界面过渡区或者再生粗骨料中的原始骨料与砂浆的界面过渡区发展.

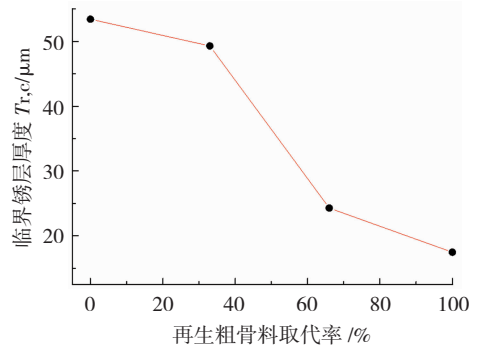


图 7 再生粗骨料取代率和临界锈层厚度的关系^[91]

Fig. 7 Relationship between recycled coarse aggregate replacement ratio and critical rust layer thickness^[91]

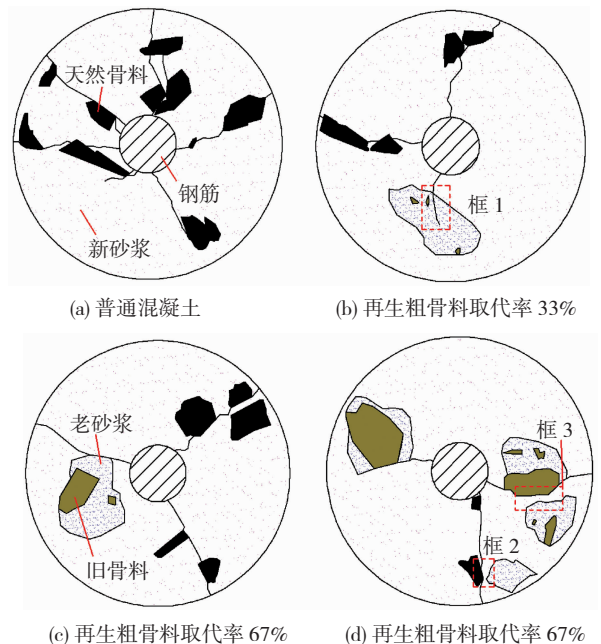


图 8 不同再生粗骨料取代率混凝土裂缝开展路径示意^[92]

Fig. 8 Schematic diagram of crack path of concrete with different recycled coarse aggregate replacement ratio^[92]

Zhao 等^[90-92]同时还进行了再生混凝土和普通混凝土锈胀裂缝形态对比,见表 1.当裂缝尚未到达混凝土保护层表面时,裂缝内宽外窄,再生混凝土和

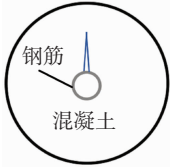
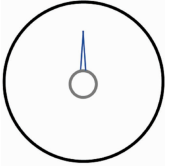
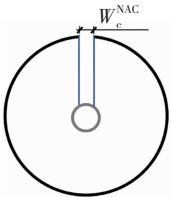
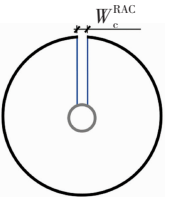
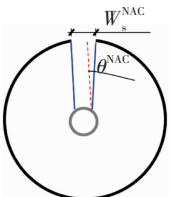
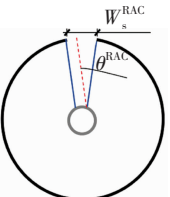
普通混凝土的裂缝形态相差较小;保护层开裂时刻,再生混凝土的锈层厚度小于普通混凝土,临界裂缝宽度也小于普通混凝土;当裂缝延伸至表面后,再生混凝土保护层表面裂缝宽度明显大于普通混凝土,说明再生混凝土锈胀裂缝张开的角度较普通混凝土大。

5.3 改性措施

朱燕等^[96]和孙平等^[94]通过试验发现,适量掺加粉煤灰能够抑制再生混凝土内钢筋锈蚀,只是二者在最佳掺量上有所不同:前者建议小于20%;后者则以再生粗骨料取代率50%为分界点,小于50%时取10%~20%,超过50%时取20%~30%。同时,孙平等^[94]指出增加再生混凝土保护层厚度能有效抑制再生混凝土内钢筋锈蚀,并指出适宜保护层厚度为40 mm。

表1 再生混凝土与普通混凝土裂缝形态对比^[90]

Tab.1 Comparison of crack morphology between recycled concrete and normal concrete^[90]

开裂状态	普通混凝土	再生混凝土	说明
内裂阶段			裂缝形态相似
开裂时刻			$T_{r,e}^{NAC} > T_{r,e}^{RAC}$ $W_c^{NAC} > W_c^{RAC}$
开裂以后			$\theta^{NAC} < \theta^{RAC}$ $W_s^{NAC} < W_s^{RAC}$

注: NAC表示普通混凝土, RAC表示再生混凝土, $T_{r,e}$ 表示混凝土的临界锈层厚度, W_c 表示混凝土开裂时刻的裂缝宽度, θ 表示混凝土裂纹角度, W_s 表示混凝土开裂后裂缝宽度。

5.4 小结

综上,再生混凝土内钢筋锈蚀率较普通混凝土大,且随再生骨料取代率的增加而增大,但不呈线性增长;随水胶比的减小而减小。再生混凝土达到表面开裂时刻所需的钢筋锈层厚度及开裂时刻裂缝宽度均随取代率的增大而减小,但开裂后裂缝展开角度随取代率的增大而增大。尽管混凝土内钢筋锈蚀无可避免,但可通过增加再生混凝土保护层厚度、掺加

适量粉煤灰来进行抑制或延缓。

目前,相较普通混凝土,再生混凝土内钢筋锈蚀及锈裂的研究尚未形成完整的理论体系,特别是细微观机理研究及钢筋锈蚀分布模型建立均需要深入研究。同时,抑制再生混凝土内钢筋锈蚀的措施研究较少。理论上,能够抑制再生混凝土碳化及氯离子渗透等引起钢筋锈蚀的措施均能改善钢筋锈蚀,但具体效果如何尚需进一步研究探讨。因此,以下内容研究尚待深入:1)再生混凝土内钢筋锈蚀的细微观机理研究;2)加强再生混凝土内钢筋锈蚀分布及锈胀开裂研究,建立再生混凝土锈裂预测模型;3)抑制或延缓再生混凝土内钢筋锈蚀的方法探究。

6 锈蚀钢筋与再生混凝土黏结性能

钢筋与混凝土的结合在二者接触面上产生由化学胶着力、摩阻力和机械咬合力组成的黏结作用,以此来实现二者间力的传递和变形协调,直接影响钢筋混凝土构件工作性能。但钢筋一旦锈蚀会对其黏结性能产生影响,主要表现:1)钢筋锈蚀将在钢筋与混凝土间生成铁锈层影响钢筋与混凝土接触面上的化学胶着力和摩阻力;2)钢筋横肋锈蚀降低钢筋与混凝土间的机械咬合力;3)钢筋锈胀引起混凝土保护层开裂降低混凝土对钢筋的约束。以上影响的综合,降低二者间的黏结强度,成为钢筋混凝土构件及结构耐久性退化的首要原因。

由5.1节可知,相同水胶比和环境条件下,再生混凝土内钢筋锈蚀较普通混凝土严重,加上再生混凝土材料性能较普通混凝土差,锈蚀钢筋与再生混凝土间的黏结性能时变规律及其与普通混凝土间的差异性值得深究。

6.1 再生粗骨料的影响

杨海峰等^[97]进行了再生粗骨料取代率0%、50%、100%的再生混凝土与钢筋锈蚀率0%、0.5%、1.5%和2.5%的锈蚀钢筋的黏结滑移性能试验,结果表明:钢筋锈蚀前,钢筋与再生混凝土间的黏结强度及峰值滑移量随再生骨料取代率的增加而降低,但随钢筋锈蚀率的增加,这一变化趋势越不明显;当锈蚀率为2.5%时,其黏结强度随取代率的增加变化较小,甚至有增长趋势。董宏英等^[98]和叶涛萍等^[99]研究发现,锈蚀钢筋与再生混凝土间的黏结强度随再生粗骨料取代率的增加整体呈下降趋势。Fernandez等^[100]试验发现锈蚀钢筋与再生混凝土间的黏结强度受再生粗骨料取代率影响较小,且在钢筋锈蚀较轻时,再生混凝土表面开裂较普通混凝土晚。图9为锈蚀钢筋与再生混凝土间相对黏结强度与再生粗骨料取代率关系图。

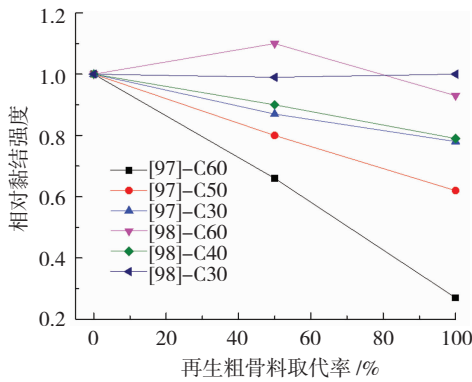


图 9 锈蚀钢筋与再生混凝土间相对黏结强度与再生骨料取代率关系

Fig. 9 Relationship between relative bond strength and recycled aggregate replacement ratio

6.2 钢筋锈蚀率等影响

肖建庄等^[101]进行了不同钢筋锈蚀率(0% ~ 7.62%)的锈蚀钢筋全再生混凝土拔出试验. 研究发现, 荷载-滑移曲线与普通混凝土基本相似, 但曲线下降段钢筋随锈蚀率的增加而变陡; 当锈蚀率大于 1.4% 时, 试件由钢筋拔出破坏转变为再生混凝土劈裂破坏; 黏结性能退化规律与普通混凝土相似, 先升后降, 但黏结强度退化速度更快. 曹芙波等^[102]进行了锈蚀钢筋再生混凝土梁式黏结滑移试验, 研究了不同钢筋锈蚀率对不同直径钢筋与再生混凝土间黏结滑移性能的影响, 结果发现: 钢筋锈蚀率为 0% 和 1% 时, 试件发生混凝土劈裂破坏; 锈蚀率为 9% 时, 发生钢筋拔出破坏, 当锈蚀率为 3% 和 6% 时, 试件同时发生钢筋拔出和混凝土劈裂破坏; 二者间的黏结应力随锈蚀率的增加先增后减, 锈蚀率为 1% 时黏结应力最大. 杨海峰等^[97]研究发现, 再生混凝土胀裂后, 钢筋与再生混凝土间的黏结刚度显著退化, 但再生混凝土开裂后, 黏结刚度下降幅度不明显.

Zhao 等^[103-105]通过拔出试验, 研究了有无箍筋的变形钢筋及光圆钢筋锈蚀后对再生骨料取代率 0% 和 50% 的混凝土试件黏结性能的影响. 结果发现, 无箍筋试件, 随钢筋锈蚀率增加, 普通和再生混凝土的极限滑移量均减小, 相对极限黏结强度均先增后减, 但相较普通混凝土, 再生混凝土极限黏结强度较小, 抵御滑移变形能力较弱, 裂缝宽度稍大; 而有箍筋试件, 再生混凝土极限黏结强度和抵御滑移变形的能力明显增强, 裂缝宽度有所降低, 普通和再生混凝土的极限滑移量和裂缝宽度均较为接近. 试验说明箍筋显著增强了混凝土的约束作用, 有效控制了裂缝开展. 董宏英等^[98-99]研究了钢筋锚固长度、混凝土强度等级及钢筋外形等对锈蚀钢筋与再生混凝土黏结性能的影响. 结果发现, 锈蚀后带肋钢筋与再生混凝土间的黏结强度明显高于锈蚀后光圆

钢筋, 黏结强度随锚固长度增加而减小, 随钢筋锈蚀率的增大而减小, 当钢筋锈蚀率达到某一界限后这种减小便不明显.

6.3 黏结应力-滑移本构关系

曹芙波等^[106]为能准确得出相同滑移值下不同锚固位置的黏结应力, 先拟合出相应位置处黏结应力与滑移值的关系式(式(1)), 再通过代入滑移值计算得出黏结应力(式(4)), 最后建立考虑位置函数的锈蚀钢筋与再生混凝土的黏结应力-滑移本构关系(式(5)). 具体表达如下:

$$f(\eta, s) = \begin{cases} k_1 \eta, & 0 \leq \eta \leq 0.2; \\ \frac{4k_1 + k_2}{15} - \frac{k_1 + k_2}{3} \eta, & 0.2 < \eta \leq 0.8; \\ k_2(\eta - 1), & 0.8 < \eta \leq 1. \end{cases} \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{5.4 + 53.86wd - 2.48(wd)^2 - 33.25s}{1 + 15.58wd - 0.72(wd)^2 - 7.05s + 5.53s^2}, \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{-5.47 + 1.27k_1}{1 - 0.24k_1}. \quad (3)$$

$$\tau(s) = f(\eta, s) \cdot \bar{\tau}(s) = f(\eta, s) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \Delta l_i}{l_a}. \quad (4)$$

$$\tau(s) = \begin{cases} \frac{k_1 \eta \sum_{i=1}^n \tau_i \Delta l_i}{l_a}, & 0 \leq \eta \leq 0.2; \\ \left(\frac{4k_1 + k_2}{15} - \frac{k_1 + k_2}{3} \eta \right) \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i \Delta l_i}{l_a}, & 0.2 < \eta \leq 0.8; \\ \frac{k_2(\eta - 1) \sum_{i=1}^n \tau_i \Delta l_i}{l_a}, & 0.8 < \eta \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\eta = x/l_a$ 为锚固点相对位置; s 为滑移值; l_a 为锚固长度; w 为锈蚀率, 取值范围为本次试验所取的锈蚀率范围 0% ~ 3.0%; d 为钢筋直径; k_1 和 k_2 为黏结滑移曲线上上升段斜率和下降段斜率; Δl_i 为钢筋微段长度.

根据上述黏结-滑移本构关系得出的曲线与试验曲线吻合较好, 可为有限元分析提供参考, 但整个过程是基于本试验的较低钢筋锈蚀率, 且过程繁琐, 是否适合实际工程应用, 尚待进一步验证.

肖建庄等^[101]基于黏结强度及黏结强度对应的滑移量, 建立了锈蚀钢筋与再生混凝土间无量纲化黏结-滑移全曲线两阶段拟合方程, 详见式(6)和式(7). 试验曲线与计算曲线吻合良好, 可用于模拟锈蚀钢筋与再生混凝土间黏结滑移全曲线.

上升段:

$$\frac{\tau}{\tau_u} = \left(\frac{s}{s_u}\right)^a, \quad (6)$$

下降段:

$$\frac{\tau}{\tau_u} = \frac{s/s_u}{b(s/s_u - 1)^2 + s/s_u}. \quad (7)$$

式中: τ 为黏结应力, s 为滑移量, τ_u 为黏结强度, s_u 为对应黏结强度时的滑移量, a 和 b 为相对于上升段和下降段的参数。

6.4 小结

综上, 锈蚀钢筋与再生混凝土间的黏结性能受各种因素影响后的退化规律与普通混凝土类似, 但黏结强度较普通混凝土低, 有随再生粗骨料取代率增加而变小的趋势。同时发现, 进行黏结滑移性能研究的试验大多以操作简便的中心拉拔试验为主, 而与实际受力较为符合的梁式黏结滑移试验较少; 试件以通电加速锈蚀试件为主, 很少有基于自然锈蚀试件的研究; 虽有锈蚀钢筋与再生混凝土黏结应力-滑移本构关系的建立, 但仍不够系统完善, 不具普遍适用性; 多数研究以黏结强度劣化为主, 缺少对黏结滑移机理、残余黏结强度等研究。

因此, 今后可多开展以下研究: 1) 为能更准确了解锈蚀钢筋与再生混凝土间的黏结性能, 可多进行梁式黏结滑移性能试验研究; 2) 自然锈蚀构件与通电加速锈蚀构件引起的黏结强度差异性不明, 应多进行自然锈蚀构件与通电加速锈蚀构件的比对性研究; 3) 深入研究锈蚀钢筋与再生混凝土间黏结-滑移关系, 进一步完善黏结应力-滑移本构关系模型; 4) 进一步加强黏结滑移机理研究, 深刻认识锈蚀钢筋与再生混凝土的黏结性能退化规律, 为再生混凝土构件及结构的寿命预测提供帮助。

7 再生混凝土构件长期受力性能

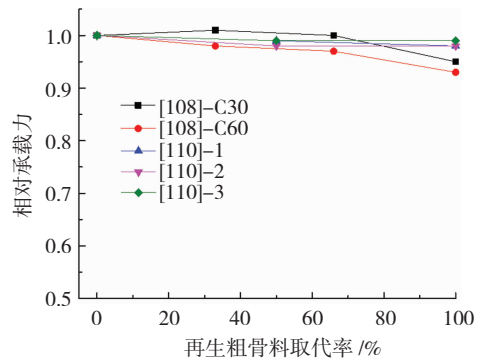
混凝土材料性能及耐久性能的研究是研究其构件及结构受力性能的前提和基础。构件是材料的集合, 但其受力性能并不是其材料性能的简单加减, 需要根据实际情况进行具体分析, 特别是特殊环境下构件的长期工作性能。

7.1 再生混凝土梁

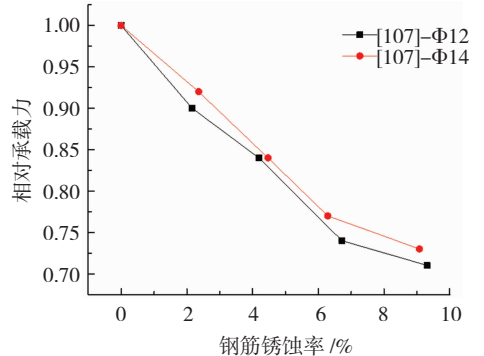
氯盐侵蚀下再生混凝土梁抗弯承载力随再生粗骨料取代率和钢筋锈蚀率的变化规律, 见图 10。由图 10 可知, 再生混凝土梁锈蚀后的抗弯承载力受再生粗骨料取代率影响较小, 而受钢筋锈蚀率影响显著。

曹芙蓉等^[107]研究发现, 当锈蚀率大于 9.31% 时, 梁由之前的弯曲破坏模式转变为黏结-剪切破坏模式。Ye 等^[108]研究发现, 锈蚀梁的承载力虽受再

生粗骨料取代率影响较小, 但其延性受再生粗骨料取代率影响较大, 并基于试验结果, 建议在长期氯盐环境下工作的抗弯梁试件不宜采用 100% 再生粗骨料取代, 且高强试件取代率宜控制在 30% 以下, 低、中强试件不宜超过 60%。Zhao 等^[109-110]对长期荷载与氯盐环境耦合作用下的不同再生粗骨料取代率的钢筋混凝土梁进行了长期损伤监测, 结果发现: 1) 相较普通混凝土梁, 再生混凝土梁产生的荷载裂缝更多、更密集, 平均荷载裂缝宽度较小, 荷载裂缝高度开展较慢, 表面荷载裂缝损伤面积较小; 但锈胀裂缝更多、更宽, 表面锈裂损伤面积比值显著增大; 总体上, 再生混凝土梁总损伤面积比值略大于普通混凝土梁, 表明再生梁构件抵抗锈胀开裂的能力较普通梁稍弱; 2) 当环境侵蚀不显著、荷载引起损伤为绝对主导的情况下, 将再生混凝土应用在实际结构中其力学性能是较为可靠的; 而当服役环境恶劣、构件承受长期荷载与环境耦合作用时, 会对结构构件长期服役性能及服役寿命造成不良影响, 因此在进行实际应用时应考虑其影响。



(a) 相对承载力随再生粗骨料取代率的变化



(b) 相对承载力随钢筋锈蚀率的变化

图 10 再生混凝土相对承载力与锈蚀率和取代率的关系
Fig. 10 Relationship between relative bearing capacity of recycled concrete, corrosion ratio, and substitution ratio

刘超等^[111]对再生粗骨料取代率 0%、50%、100% 的梁进行了 1 200 d 长期变形性能试验, 发现梁的挠度随取代率的增加而增大; Choi 等^[112]对再生粗骨料取代率 0%、50%、100% 的梁进行了 380 d

徐变试验,发现规范 ACI 中的挠度增长系数对再生混凝土试件已不再适用,对梁的长期挠度计算公式进行了修正;Ji 等^[113]进行了 3 根 C30 再生混凝土梁的 365 d 持荷测试,发现其挠度满足规范 ACI 最大允许值要求.曹万林等^[114-115]进行了中、高强再生混凝土足尺梁 275 d 徐变性能试验,研究发现,低持荷水平下梁的挠度增大系数比高持荷水平下略大,但均可按普通混凝土梁挠度增大系数的 1.1 倍采用.安新正等^[116]进行了 $0.35P_u$ 、 $0.4P_u$ 、 $0.45P_u$ (P_u 为极限荷载)3 种持荷水平下 9 根 C25 全再生混凝土梁 360 d 徐变性能试验,发现在 $0.45P_u$ 持荷水平下梁跨中 7 d 挠度值占总挠度值的 64%.

相关文献中不同持荷时长的再生混凝土梁跨中挠度与再生粗骨料取代率关系,见图 11.由图 11 可知,再生混凝土梁跨中挠度随再生粗骨料取代率的变化,尚未形成统一结论,尚需进一步研究.

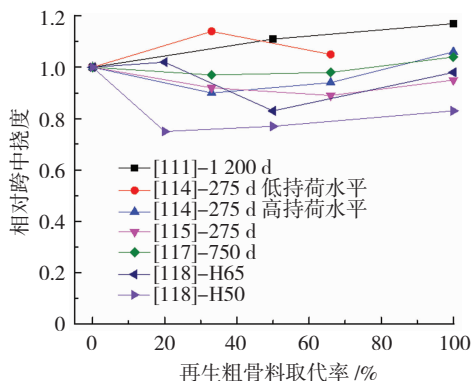


图 11 再生混凝土梁跨中相对挠度与再生骨料取代率关系
Fig. 11 Relationship between relative deflection of recycled concrete beams and recycled aggregate replacement ratio

张鸿儒等^[119]对再生混凝土在框架结构中的应用及长期应变性能进行了研究,结果发现,再生混凝土用于框架结构的梁构件时,其早期抵抗抗缩应变能力较普通混凝土好,但抵抗荷载及温度变形能力较普通混凝土差;总体上,其应变发展与普通混凝土构件略差,但相差较小.因此,再生混凝土可用于框架结构的梁.

7.2 再生混凝土柱

罗素蓉等^[120]以再生粗骨料取代率、持荷大小及钢筋锈蚀率为设计参数,对荷载与氯盐侵蚀环境耦合作用的再生混凝土柱进行了承载力试验.研究发现,随取代率和持荷的增加,构件锈胀裂缝数量增多、纵筋实际锈蚀率增大;构件刚度、承载力及延性均随取代率增大而降低,但随持荷大小的变化规律各有不相同;随锈蚀率的增大,构件锈胀裂缝开展明显增加,刚度及承载力降低;当钢筋锈蚀率大于 3% 时,构件延性随锈蚀率增大而降低;但锈蚀率较低

时,构件延性与未锈蚀构件相当;构件中部混凝土截面应变分布仍满足平截面假定,承载力试验结果与锈蚀钢筋混凝土柱承载力计算模型符合良好.

7.3 小结

综上,再生混凝土构件的长期工作性能主要以再生混凝土梁锈蚀后及长期徐变性能研究为主,而以再生混凝土柱或再生混凝土板等其它构件展开的研究较少.而在再生混凝土梁锈蚀后性能的研究中,抗弯性能研究较多,抗剪性能研究尚无;再生混凝土梁长期徐变性能研究中,再生混凝土梁跨中挠度随再生粗骨料取代率的变化规律尚未形成统一结论.

可见,关于再生混凝土构件长期工作性能的研究,目前尚属薄弱,尚需进一步加强.今后可多开展再生混凝土梁、柱及板相关的长期工作性能研究,以不断扩充再生混凝土构件及结构的长期工作性能,完善理论体系,为再生混凝土在工程实际中的推广应用奠定坚实基础.

8 结论与展望

本文重点阐述了再生混凝土冻融性能、碳化性能、氯离子渗透性能、徐变性能、再生混凝土内钢筋锈蚀及锈裂、锈蚀钢筋与再生混凝土黏结性能以及再生混凝土构件长期受力性能的研究进展.多数研究者认为,再生混凝土材料及构件的长期工作性能均不同程度的劣于普通混凝土,但可通过适当措施进行改善(如添加适量适宜外加剂或掺合料、进行颗粒整形、改善施工工艺或养护条件等),实现与普通混凝土相当甚至更好的性能.

尽管如此,但由于再生骨料来源的复杂、配合比设计及试验方法的差异导致各试验结果之间可比性较差,看似开展了很多同类研究,但都不够深入系统,很难形成一个完整的知识体系,也很难形成统一的规范指南指导工程实践.为了大力推广再生混凝土的广泛应用,仍有大量的研究工作需要进一步的展开,包括但不限于以下几点:

1) 对已有研究结论中尚存疑虑或相互冲突的部分展开深入研究,查找原因,完善理论体系;对同类试验的材料来源、配合比设计、试验方法等进行规范,以增加各试验结果的可比性.

2) 针对目前中、低强再生混凝土性能研究较多,高强再生混凝土研究较少的现状,多开展高强再生混凝土的研究工作,与目前大力推广使用的高强钢筋同步进行,使二者充分发挥其性能,协同工作,避免浪费.

3) 多开展再生混凝土长期工作性能的性能劣化机理研究及性能劣化模型建立工作,从微观结

构深层次探究原因,不能仅停留于宏观规律的认识。

4) 进一步加强再生混凝土性能改善措施的研究工作,从定性的改善措施量化到特定的数值区间,实现真正的可量化预测优化效果。

5) 多进行再生混凝土构件或结构的长期工作性能研究,材料性能的劣化程度并不能准确体现或预测构件或结构的劣化程度。再生混凝土在工程中的推广应用,需要准确了解其构件的相关性能。

6) 实际工程所处的环境,不仅复杂多变,且常受多种因素共同作用,很难是单一环境单一受力。因此,可多开展多因素耦合作用对再生混凝土长期工作性能影响的研究,为特殊需求及特定环境下再生混凝土的应用提供理论支撑和数据支持。

参考文献

- [1] OLLIVIER J P, MASO J C, BOURDETTE B. Interfacial transition zone in concrete[J]. *Advanced Cement Based Materials*, 1995, 2(1): 30
- [2] POWERS T C. Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete[J]. *ACI Journal*, 1954, 50(9): 741
- [3] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing[J]. *Proceedings Highway Research Board*, 1953(32): 285
- [4] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2012
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Principle and analysis of reinforced concrete[D]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012
- [5] NEVILL A M. Properties of concrete [M]. 5th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011
- [6] 曹万林,梁梦彬,董宏英,等. 再生混凝土冻融后基本力学性能试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(3): 184
CAO Wanlin, LIANG Mengbin, DONG Hongying, et al. Experimental study on basic mechanical properties of recycled concrete after freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(3): 184. DOI:10.13577/j.jnd.2012.0326
- [7] 韩古月,聂立武. 再生粗骨料品质与掺量对再生混凝土抗冻融性能影响规律[J]. *混凝土*, 2018(6): 89
HAN Guyue, NIE Liwu. Effect of quality and addition of recycled coarse aggregate on freezing-thawing properties of recycled concrete [J]. *Concrete*, 2018 (6): 89. DOI:10.3969/j. issn. 1002 - 3550. 2018. 06. 022
- [8] 曹剑. 再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土抗冻性能的影响[J]. *青岛理工大学学报*, 2016, 37(4): 17
CAO Jian. Influence of quality and replacement rate of recycled coarse aggregate on frost resistance performance of concrete [J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2016, 37(4): 17
- [9] GOKCE A, NAGATAKI S, SAEKI T, et al. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34 (5) : 799. DOI:10.1016/j. cemconres. 2003. 09. 014
- [10] DILLMANN R. Concrete with recycled concrete aggregate [C]// *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete aggregate*. London, UK: [s. n.], 1998: 239
- [11] SALEM R M, BURDETTE E G, JACKSON N M. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2003, 100(3): 216. DOI: 10.14359/12622
- [12] 安新正,牛薇,张亚飞,等. 砖粒及粉煤灰掺量对再生混凝土抗冻性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(14): 237
AN Xinzhen, NIU Wei, ZHANG Yafei, et al. Influence of brick particle and fly ash on frost resistance of recycled coarse aggregate concrete [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18 (14): 237
- [13] 陈爱玖,王静,马莹. 钢纤维橡胶再生混凝土的抗冻性试验[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(4): 933
CHEN Aijiu, WANG Jing, MA Ying. Test of frost resistance for steel fiber rubber recycled concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32 (4): 933. DOI: 10.13801/j. cnki. fhclxb. 20141022.006
- [14] 覃银辉,邓寿昌,张学兵. 掺外加剂的再生混凝土抗冻性能研究[J]. *湘潭大学自然科学学报*, 2006, 28(3): 117
QIN Yinhui, DENG Shouchang, ZHANG Xuebing. Frost resistance of recycled concrete with antifreeze [J]. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 2006, 28(3): 117. DOI:10.13715/j. cnki. nsjxu. 2006. 03. 026
- [15] 王晨霞,郭磊,曹芙波. 盐碱与冻融耦合作用下再生混凝土耐久性试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(1): 10
WANG Chenxia, GUO Lei, CAO Fubo. Recycled concrete corrosion in saline and freeze-thaw cycle coupling under the action of durability research [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37 (1): 10. DOI:10.16552/j. cnki. Issn 1001 - 1625. 2018. 01. 002
- [16] 魏毅萌,柴军瑞,覃源,等. 冻融循环下再生混凝土孔隙分布变化及其对抗冻性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(3): 825
WEI Yimeng, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Effect of pore distribution of recycled concrete on frost resistance under freeze-thaw cycling [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37 (3): 825. DOI:10.16552/j. cnki. issn1001 - 1625. 2018. 03. 013
- [17] 张雷顺,王娟,黄秋风,等. 再生混凝土抗冻耐久性试验研究[J]. *工业建筑*, 2005, 35(9): 64
ZHANG Leishun, WANG Juan, HUANG Qiufeng, et al. Experimental study on frost-resistant durability of recycled concrete [J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(9): 64. DOI:10.13204/j. gyjz2005. 09. 017
- [18] 关瑞,刘元珍,吕丹丹. 冻融循环对纳米再生混凝土抗压强度影响试验研究[J]. *混凝土*, 2018(2): 98
GUAN Rui, LIU Yuanzhen, Lü Dandan. Experimental study on the compressive strength of nanomaterial recycled concrete under freeze-thaw cycles [J]. *Concrete*, 2018(2): 98. DOI:10.3969/j. issn. 1002 - 3550. 2018. 02. 027
- [19] OLIVEIRA M B, VAZQUEZ E. The influence of restrained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete [J]. *Waste Management*, 1996, 16(1): 113
- [20] 肖开涛. 再生混凝土的性能及改性研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2004
XIAO Kaitao. Study on the properties and the modification of recycled concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004
- [21] ROTTLER G. Dauerhaftigkeit von recycling betonnen bei frost-tausal-beanspruchung [D]. Karlsruhe: Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe, 1985
- [22] 霍俊芳,魏建,李晨霞,等. 等体积砂浆法再生混凝土的抗冻性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(5): 1776

- HUO Junfang, WEI Jian, LI Chenxia, et al. Experimental study on frost resistance of recycled concrete with equivalent volume mortar method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(5): 1776. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.05.048
- [23] 覃银辉, 邓寿昌, 张学兵, 等. 再生混凝土的抗冻性能研究[J]. 混凝土, 2005(12): 49
- QIN Yinhui, DENG Shouchang, ZHANG Xuebing, et al. Frost resistance of recycled concrete[J]. Concrete, 2005(12): 49
- [24] WHITESIDE T M, SWEET H S. Effect of mortar saturation in concrete freezing and thawing testing [C]// Proceedings of Highway Research Board. Washington, D. C.: [s. n.], 1951, 30: 204
- [25] BUCK A D. Recycled concrete as a source of aggregate[J]. ACI Journal, 1977, 74(5): 212
- [26] FORSTER S W, MOORE S P, SIMON M J. Behavior of recycled concrete as aggregate in concrete [C]// Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Nice, France: [s. n.], 1994: 17
- [27] 王武祥, 刘立, 尚礼忠, 等. 再生混凝土集料的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2001(4): 9
- WANG Wuxiang, LIU Li, SHANG Lizhong, et al. Study on recycled concrete aggregate [J]. China Concrete and Cement Products, 2001(4): 9
- [28] HENDRIKS F. The use of concrete and masonry waste as aggregates for concrete production in the Netherlands [C]// Proc. II "Reuse of Concrete and Brick Materials". Amsterdam, Netherlands: [s. n.], 1988: 431
- [29] PADMINI A K, RAMAMURTHY K, MATHEWS M S. Relative moisture movement through recycled aggregate concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2002, 54(5): 377. DOI: 10.1680/mac.2002.54.5.377
- [30] SOUTSOS M N, TANG K, MILLARD S G. Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(7): 3131. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.024
- [31] RAO A, JHA K N, MISRA S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete [J]. Resources Conservation and Recycling, 2007, 50(1): 71. DOI:10.1016/j.resconrec.2006.05.010
- [32] XIAO J Z, LEI B, ZHANG C Z. On carbonation behavior of recycled aggregate concrete [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(9): 2609. DOI: 10.1007/s11431-012-4798-5
- [33] KOU S C, POON C S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 69. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032
- [34] SOARES D, BRITO J, FERREIRA J, et al. Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 263. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.031
- [35] SILVA R V, NEVES R, BRITO J, et al. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 22. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017
- [36] KOU S C, POON C S, CHAN D. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(9): 709. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(709)
- [37] IGNJATOVIĆ I S, MARINKOVIĆ S B, MIŠKOVIĆ Z M, et al. Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading [J]. Materials and structures, 2013, 46(6): 1045. DOI: 10.1617/s11527-012-9952-9
- [38] 陈云钢. 界面改性剂对再生混凝土性能改善效果的初步研究[D]. 上海: 同济大学, 2006
- CHEN Yungang. Preliminary study on the effect of interface modifier on the performance of recycled concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2006
- [39] 孙浩. 粗集料和掺合料对再生混凝土性能的影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2006
- SUN Hao. Study on the influence of coarse aggregate and admixture on the performance of recycled concrete [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [40] RYU J S. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties[J]. Magazine of Concrete Research, 2002, 54(1): 7. DOI: 10.1680/mac.2002.54.1.7
- [41] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Effect of microstructure of ITZ on the compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 461. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005
- [42] VIEIRA A T, ALVES A, BRITO J, et al. Durability-related performance of concrete containing fine RAs from crushed bricks and sanitary ware[J]. Materials and Design, 2016, 90: 767
- [43] MATIAS D, BRITO J, ROSA A, et al. Durability of concrete with recycled coarse aggregates: Influence of superplasticizers [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(7): 6014011. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000961
- [44] KATZ A. Properties of concrete made with RA from partially hydrated old concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33: 703
- [45] 薛建阳, 罗峥, 元成方, 等. 再生混凝土力学性能及耐久性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(10): 91
- XUE Jianyang, LUO Zheng, YUAN Chengfang, et al. Experimental investigation for mechanical performance and durability of recycled aggregate concrete[J]. Industrial Construction, 2013, 43(10): 91
- [46] SHAYAN A, XU A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(5): 371. DOI: 10.14359/12812
- [47] 唐清照. 橡胶颗粒对再生混凝土强度和抗碳化性能影响[J]. 福建建筑, 2016, 220(10): 92
- TANG Qingzhao. Influence of rubber particles on strength and carbonation of Recycled Concrete [J]. Fujian Architecture & Construction, 2016, 220(10): 92
- [48] 雷斌, 饶春华, 扶名福, 等. 再生混凝土梁截面碳化深度分布的计算分析[J]. 南昌大学学报(理科版), 2015, 39(4): 359
- LEI Bin, RAO Chunhua, FU Mingfu, et al. Analysis on the distribution of carbonation depth across the section of recycled aggregate concrete beams [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2015, 39(4): 359
- [49] 李秋义, 李倩倩, 岳公冰, 等. 碳化作用对再生混凝土界面显微结构的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(4): 629
- LI Qiuyi, LI Qianqian, YUE Gongbing, et al. Effect of carbonation on the interfacial microstructure of recycled concrete[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(4): 629
- [50] 秦睿, 王瑞骏, 赖韩, 等. 掺粉煤灰再生混凝土宏观及微观碳化

- 性能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 203
- QIN Rui, WANG Ruijun, LAI Han, et al. Study on macroscopic and micro carbonation properties of fly ash regenerated concrete [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(4): 203
- [51] ZONG L, FEI Z, ZHANG S. Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 70: 175. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.040
- [52] 王忠星, 姚宏, 李秋义, 等. 再生粗骨料强化处理方式对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. 混凝土, 2017(9): 57
- WANG Zhongxing, YAO Hong, LI Qiuyi, et al. Effect of enhanced processing mode properties of recycled coarse aggregate on the carbonation resistance of recycled concrete [J]. Concrete, 2017(9): 57
- [53] 闫春玲, 高丹盈, 胡春生, 等. 钢纤维再生粗骨料混凝土碳化试验[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(2): 64
- YAN Chunling, GAO Danying, HU Chunsheng, et al. Carbonization test of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(2): 64
- [54] OTSUKI N, MIYAZATO S, YODSUDJAI W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride, penetration and carbonation [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(5): 443. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(443)
- [55] 罗伯光, 覃荷瑛. 利用 NEL 法研究再生混凝土抗氯离子渗透性能[J]. 混凝土, 2014(9): 41
- LUO Boguang, QIN Heying. Study on anti-chloride ion permeability of recycled aggregate concrete by NEL method [J]. Concrete, 2014(9): 41.
- [56] KOU S C, POON C S. Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2006, 21(4): 130. DOI: 10.1007/BF02841223
- [57] TAM V W Y, TAM C M. Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(10): 3592. DOI: 10.1007/s10853-006-0379-y
- [58] WANG W, KOU S, XING F. Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 187. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.065
- [59] OLORUNSOGO F T, PADAYACHEE N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2): 179. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00653-6
- [60] XIAO J, MA Z, DING T. Reclamation chain of waste concrete: A case study of Shanghai [J]. Waste Management, 2016, 48: 334. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.018
- [61] 胡波, 柳炳康, 张李黎. 再生混凝土氯离子渗透性能测试与分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009(8): 1240
- HU Bo, LIU Bingkang, ZHANG Lili. Chloride ion permeability test and analysis for recycled concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2009(8): 1240
- [62] VILLAGRÁN-ZACCARDI Y A, ZEGA C J, DI MAIO Á A. Chloride penetration and binding in recycled concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(6): 449. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:6(449)
- [63] ANDREU G, MIREN E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52(2): 227. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054
- [64] VÁZQUEZ E, BARRA M, APONTE D, et al. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment [J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 61. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028
- [65] KOU S C, POON C S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37(2): 12. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011
- [66] 吴相豪, 岳鹏君. 再生混凝土中氯离子渗透性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 381
- WU Xianghao, YUE Pengjun. Experimental study on chloride ion penetration into recycled aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3): 381
- [67] 张景琦, 张健, 杜俊, 等. 高性能再生混凝土氯离子渗透性实验研究[J]. 商品混凝土, 2009(3): 24
- ZHANG Jingqi, ZHANG Jian, DU Jun, et al. Experimental study on chloride ion permeability of high performance recycled concrete [J]. Beton Chinese Edition-Ready-Mixed Concrete, 2009(3): 24
- [68] BERNDT M L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(7): 2606. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011
- [69] KOU S C, POON C S, AGRELA F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(8): 788. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009
- [70] 上官玉明, 毛高峰, 郑玉春, 等. 再生粗骨料混凝土抗氯离子渗透性能的研究[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(4): 154
- SHANG-GUAN Yuming, MAO Gaofeng, ZHENG Yuchun, et al. Research on resistance to penetration of chloride ions into recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(4): 154
- [71] 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
- WANG Junjie, WANG Hailong. Influences of phosphorous slag as cement replacement on the performances of recycled aggregate concrete [J]. Concrete, 2011(6): 90
- [72] 郝建民. 橡胶粉对再生混凝土围护结构氯离子渗透性的影响研究[J]. 混凝土, 2015(5): 26
- HAO Jianmin. Study on the effect of chloride permeability of recycled aggregate concrete mixed with rubber powder [J]. Concrete, 2015(5): 26
- [73] ABBAS A, FATHIFAZL G, ISGOR O B, et al. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(8): 555. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.012
- [74] 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 Jinjian. Recycled concrete's nano-enhancement technology and microstructural analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012
- [75] TAM V W Y, TAM C M, LE K N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches [J]. Resources Conservation and Recycling, 2007, 50(1): 82. DOI:

- 10.1016/j.resconrec.2006.05.012
- [76] 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. DOI: 10.1023/A:1020349011716
- [77] BRAVO M, BRITO J, PONTES J, et al. Durability performance of concrete with RAs from construction and demolition waste plants [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 77: 357
- [78] 罗素蓉, 黄海生, 郑建岚. 再生骨料混凝土徐变性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(增刊2): 115
LUO Surong, HUANG Haisheng, ZHENG Jianlan. Experimental study on creep property of recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(S2): 115
- [79] DOMINGO-CABO A, LÁZARO C, LÓPEZ-GAYARRE F, et al. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7): 2545. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018
- [80] GÓMEZ-SOBERÓN J M V. Relationship between gas adsorption and the shrinkage and creep of recycled aggregate concrete [J]. 2003, 25(2): 42
- [81] MELLMANN G, MEINHOLD U, MAULTZSCH M. Processed concrete rubble for the reuse as aggregate [C]//Proceedings of the International Seminar on Exploiting Waste in Concrete. Dundee, Scotland; [s. n.], 1999: 171.
- [82] 白国良, 祁豪, 刘超. 再生混凝土徐变试验与预测模型研究 [J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(增刊2): 121
BAI Guoliang, QI Hao, LIU Chao. Study on creep test and prediction model of recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(S2): 121
- [83] 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. DOI: 10.1680/mac.1985.37.130.29
- [84] RAVINDRARAJAH R S, LOO Y H, TAM C T. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1987, 39(141): 214. DOI: 10.1680/mac.1987.39.141.214
- [85] DHIR R K, MCCARTHY M J, TITTLE P A J, et al. Role of cement content in specifications for concrete durability: Aggregate type influences [J]. *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, 2006, 159(4): 229
- [86] CARTUXO F, BRITO J, EVANGELISTA L, et al. Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates-Influence of the superplasticizer [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 89: 36. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.119
- [87] 黄海生, 郑建岚. 粉煤灰和矿粉对再生混凝土徐变性能影响的研究 [J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(2): 206
HUANG Haisheng, ZHENG Jianlan. Study on the impact of blast furnace slag and fly ash on creep character of recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(2): 206
- [88] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, ISGOR O B, et al. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(10): 1026. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.08.004
- [89] HIROSHI T, ATSUSHI N, JUNICHI O, et al. High quality recycled aggregate concrete (HiRCA) processed by decompression and rapid release [J]. *ACL Special Publication*, 2001(6): 200
- [90] ZHAO Y, DONG J, DING H, et al. Shape of corrosion-induced cracks in recycled aggregate concrete [J]. *Corrosion Science*, 2015, 98: 310. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.05.028
- [91] ZHAO Y, DING H, JIN W. Development of the corrosion-filled paste and corrosion layer at the steel/concrete interface [J]. *Corrosion Science*, 2014, 87: 199. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.06.032
- [92] ZHAO Y, DONG J, WU Y, et al. Steel corrosion and corrosion-induced cracking in recycled aggregate concrete [J]. *Corrosion Science*, 2014, 85: 241. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.04.028
- [93] CORRAL H R, ARREDONDO R S P, FLORES N, et al. Chloride ion penetrability and corrosion behavior of steel in concrete with sustainability characteristics [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2011, 6(4): 958
- [94] 孙平平, 叶良. 再生骨料混凝土内钢筋锈蚀影响因素试验研究 [J]. *新型建筑材料*, 2013(3): 19
SUN Pingping, YE Liang. Experimental study on influencing factors of reinforcement corrosion in recycled aggregate concrete [J]. *New Building Materials*, 2013(3): 19
- [95] 张椿民, 连金明, 刘锋. 再生粗骨料混凝土钢筋锈蚀试验研究 [J]. *广西科技大学学报*, 2016, 27(3): 76
ZHANG Chunmin, LIAN Jinming, LIU Feng. Experimental study on steel corrosion in recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2016, 27(3): 76. DOI: 10.16375/j.cnki.cn45-1395/t.2016.03.014
- [96] 朱燕, 宋玲, 陈剑锋. 水胶比及粉煤灰掺量对再生混凝土钢筋锈蚀的影响 [J]. *江苏工程职业技术学院学报*, 2017, 17(3): 17
ZHU Yan, SONG Ling, CHEN Jianfeng. Experimental study on the influence of water cement ratio and fly ash content on recycled concrete corrosion [J]. *Journal of Jiangsu College of Engineering and Technology*, 2017, 17(3): 17
- [97] 杨海峰, 李雪良, 曾健, 等. 钢筋锈蚀后与再生混凝土间粘结滑移性能试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(4): 902
YANG Haifeng, LI Xueliang, ZENG Jian, et al. Experimental study on bond-slip properties between corroded rebar and recycled concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(4): 902
- [98] 董宏英, 张益轩, 曹万林, 等. 锈蚀钢筋与再生混凝土的黏结性能试验研究 [J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(5): 10
DONG Hongying, ZHANG Yixuan, CAO Wanlin, et al. Experimental study on bond-slip behavior between rusted steel bars and recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(5): 10
- [99] 叶涛萍, 曹万林, 董宏英, 等. 锈蚀钢筋与高强再生混凝土的黏结性能试验 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(8): 132
YE Taoping, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Bond behavior between corroded steel bars and high-strength recycled concrete [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(8): 132
- [100] FERNANDEZ I, ETXEBERRIA M, MARI A R. Ultimate bond strength assessment of uncorroded and corroded reinforced recycled aggregate concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 543. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.150
- [101] 肖建庄, 雷斌. 锈蚀钢筋与再生混凝土间粘结性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(1): 57
XIAO Jianzhuang, LEI Bin. Experimental study on bond behavior between corroded steel bars and recycled concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(1): 57
- [102] 曹芙蓉, 王宇, 王健, 等. 锈蚀钢筋再生混凝土黏结滑移梁式试

- 验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 297
- CAO Fubo, WANG Yu, WANG Jian, et al. Experimental study on bond-slip behavior of recycled concrete beam reinforced with corroded bars[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 297
- [103] ZHAO Yuxi, LIN Hongwei, WU Kang, et al. Bond behaviour of normal/recycled concrete and corroded steel bars[J]. Construction & Building Materials, 2013, 48(11): 348. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.091
- [104] ZHAO Yuxi, LIN Hongwei, WU Kang, et al. Bond behaviour of normal/recycled aggregate concrete and corroded steel bars[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 348
- [105] 吴亢, 马开宇, 赵羽习. 钢筋与再生及普通混凝土黏结性能退化的对比研究[J]. 混凝土, 2012(5): 12
- WU Kang, MA Kaiyu, ZHAO Yuxi. Comparison on bond degradation of reinforced recycled and normal concrete [J]. Concrete, 2012(5): 12
- [106] 曹芙波, 李骏骁, 王晨霞, 等. 锈蚀钢筋与再生混凝土黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊2): 143
- CAO Fubo, LI Junxiao, WANG Chenxia, et al. Experimental study on bond-slip property between corroded rebar and recycled concrete[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S2): 143
- [107] 曹芙波, 尹润平, 王晨霞, 等. 锈蚀钢筋再生混凝土梁粘结性能及承载力研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(增刊2): 14
- CAO Fubo, YIN Runping, WANG Chenxia, et al. Research on bond performance and bend strength of corroded reinforced recycled concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(S2): 14
- [108] YE Taoping, CAO Wanlin, ZHANG Yixuan, et al. Flexural behavior of corroded reinforced recycled aggregate concrete beams [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018:1. DOI:10.1155/2018/2957036
- [109] ZHAO Yuxi, ZHANG Hongru, CHEN Can, et al. Early-age index choosing for long-term quality evaluation of concrete structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(12): 2047. DOI: 10.1260/1369-4332.18.12.2047
- [110] ZHANG Hongru, ZHAO Yuxi. Performance of recycled concrete beams under sustained loads coupled with chloride ion (Cl^-) ingress[J]. Construction and Building Materials, 2016, 128: 96. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.028
- [111] 刘超, 白国良, 张玉, 等. 长期荷载作用下再生混凝土梁变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(增刊2): 217
- LIU Chao, BAI Guoliang, ZHANG Yu, et al. Experimental study on long-term deformation performance of recycled aggregate concrete beams [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(S2): 217
- [112] CHOI W C, YUN H D. Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate[J]. Materials & Design, 2013, 51: 742. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.044
- [113] JI S K, YUN H D, KIM S W, et al. Long-term deflections of reinforced concrete beams with recycled aggregates from demolished concrete [J]. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 2007, 29: 211.
- [114] 曹万林, 彭世阳, 乔崎云, 等. 钢筋中强再生混凝土足尺梁徐变性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(3): 1
- CAO Wanlin, PENG Shiyang, QIAO Qiyun, et al. Experimental study on creep behavior of recycled reinforced concrete beam[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(3): 1
- [115] 曹万林, 彭世阳, 乔崎云, 等. 钢筋高强再生混凝土足尺梁长期荷载作用下变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 142
- CAO Wanlin, PENG Shiyang, QIAO Qiyun, et al. Experimental study on deformation performance of full-sized high strength recycled reinforced concrete beams under long-term loading[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11): 142
- [116] 安新正, 王小学. 钢筋再生混凝土梁徐变性能试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(5): 635
- AN Xinzheng, WANG Xiaoxue. Experimental investigation creep behavior of reinforced recycled concrete beam [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5): 635
- [117] 曹万林, 冯宇, 乔崎云, 等. 长期荷载作用下再生混凝土梁徐变性能试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 127
- CAO Wanlin, FENG Yu, QIAO Qiyun, et al. Experimental study on long-term deformation performance of full-sized recycled reinforced concrete beams[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 127
- [118] SINDY S P, BELEN G F, FERNANDO M A, et al. Long-term flexural performance of reinforced concrete beams with recycled coarse aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 593. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.069
- [119] 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
- ZHANG Hongru, ZHAO Yuxi, LI Zhihui. 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
- [120] 罗素蓉, 刘湖林. 荷载与氯盐作用下再生混凝土大偏压柱受力性能[J]. 水力发电学报, 2018, 37(5): 35
- LUO Surong, LIU Hulin. Mechanical performance of large eccentric compressive RAC columns under load and chloride[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(5): 35

(编辑 赵丽莹)