

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.025

再生混凝土耐久性研究进展

彭成,肖茁良,叶恒达,陈露辉,李一鸣,蒲华乔

(南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 再生混凝土耐久性研究对于发展和推广再生混凝土技术,建立资源节约型、环境友好型社会具有重大意义。在参阅近几年国内外相关研究文献的基础上,综述了再生混凝土耐久性研究已经取得的进展,并结合其进展总结了改善再生混凝土耐久性的方法。结论为再生混凝土的耐久性在抗碳化、抗冻性、抗氯离子渗透性、抗硫酸盐腐蚀性、抗水渗性等方面较普通混凝土有一定的弱化,可采用减小水灰比、添加粉煤灰及其他掺和料等方式加以改善,并建议加快建立骨料分级和再生混凝土的相关试验标准。

关键词: 再生混凝土;耐久性;再生骨料

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0126-05

Research Progress on Durability of Recycled Concrete

PENG Cheng, XIAO Zhuoliang, YE Hengda, CHEN Luhui, LI Yiming, PU Huaqiao

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The research on durability of recycled concrete is of great importance to development and promotion of recycled concrete and move towards a resources conserving and environmental friendly society. In this paper through reviewing a large number of domestic and international literature, the research progress on durability of recycled concrete was discussed and some improvements were summarized. The conclusion is that recycled concrete needs to be improved by reduction of water-cement ratio and adding powder coal ash. The experiment standards of aggregate grading and recycled concrete should be developed as soon as possible.

Keywords: recycled concrete; durability; recycled aggregate

随着我国城市化进程的加快,城市建筑垃圾的产量也在急剧增长,而目前对建筑垃圾的随意堆放和对天然砂石骨料无节制的开采造成的生态环境问题也日益严峻。再生混凝土,作为建筑垃圾资源化循环利用的方式,能有效缓解建筑垃圾带给环境的压力。发展和应用再生混凝土这种新型建筑材料,对加快建立资源节约型、环境友好型社会具有重要的战略意义^[1-2]。

再生混凝土的耐久性是指在设计使用期内,再生混凝土材料抵抗外界环境和自身内部因素等长期破坏作用,保证结构经久耐用的能力^[3]。近些年来,国内外研究人员通过大量的研究和试验,使得再生混凝土正逐渐被推广应用到工程实践中。与天然骨料相比,再生骨料棱角较多,表面纹理粗糙,使得再生混凝土具有复杂的微观结构和界面特点,其耐久

性问题较普通混凝土更加突出。而对于再生混凝土在腐蚀性环境、严寒环境等恶劣条件下能否保证使用寿命和满足工程使用要求,还需各国学者进一步研究验证。

目前,再生混凝土技术在建筑工程、旧水泥路面的修补改造领域已被广泛运用^[4],由其发展成的钢管-再生混凝土技术满足以大跨、高耸为特征的现代结构的施工技术要求^[5],对于重要结构或环境恶劣的地区均需考虑再生混凝土的耐久性问题,因此,再生混凝土具有良好的发展前景。

至今,许多学者针对再生混凝土的抗碳化性能、抗冻性能、抗氯离子渗透性能、抗硫酸盐腐蚀性能、耐磨性能、抗水渗性能及干燥收缩性能等方面进行了研究,并取得了一定的成果。本文在参阅近些年国内外大量的相关研究文献的基础上,阐述再生混

收稿日期:2016-04-24

修稿日期:2016-06-21

基金项目:南华大学2016-2017年度大学生科研课题

作者简介:彭成(1983—),男(瑶族),湖南宁远人,博士,讲师,主要从事岩土工程专业相关的教学、科研及设计工作。

E-mail: uscEmonk@126.com

凝土耐久性研究已经取得的进展,凝练总结了改善再生混凝土耐久性的方法,为再生混凝土的进一步研究和工程实践提供参考。

1 再生混凝土耐久性研究

1.1 抗碳化性能

混凝土的抗碳化性能是指防止空气中 CO_2 在一定湿度条件下通过混凝土中的毛细孔隙向内部扩散,与水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 CaCO_3 和 H_2O 的能力。众多学者考虑了再生混凝土的骨料取代率、水灰(胶)比、粉煤灰掺量等方面对再生混凝土抗碳化性能的影响,并取得了较为一致的结果。

崔正龙等^[6]研究了再生粗骨料取代率、养护环境等对再生混凝土抗碳化性能的影响,提出在高温蒸压养护条件下再生混凝土的碳化深度较标准养护大。并且,再生混凝土的抗碳化能力会因再生粗骨料取代率增加而下降。Kou S C^[7]等、Evangelista L 等^[8]同样考虑了再生粗骨料取代率的变化对再生混凝土抗碳化能力的影响,得到了混凝土的抗碳化能力随再生粗骨料取代率的增加而下降的相同结论,且造成其抗碳化性能下降的主要原因是再生粗骨料表面附着的水泥砂浆孔隙率大。崔正龙等^[9]利用水灰比条件变化分析了对完全再生混凝土试件的抗碳化能力的影响,提出完全再生混凝土的碳化深度随水灰比的增大而增大,且其碳化深度大致为同水灰比的普通混凝土的3倍。应敬伟等^[10]分析了再生混凝土抗碳化能力的影响因素,得出对再生混凝土抗碳化能力起不利作用的主要是再生粗骨料表面附着的砂浆和再生混凝土极大的孔隙率的结论。肖建庄等^[11]根据国内外再生混凝土耐久性的研究现状,提出密实度也是影响再生混凝土抗碳化性能的因素之一。因此,减小水灰比、掺矿物掺和料和二次搅拌法都能增加再生混凝土的抗碳化性能。薛建阳等^[12]通过试验表明:再生骨料的取代率增加会导致混凝土内部缺失量增加,再生混凝土抗碳化能力下降;当粉煤灰掺量超过10%时,应该考虑其对抗碳化能力的不利影响;而且硅酸钠溶液不能提高再生混凝土的抗碳化能力。叶禾^[13]的试验也得出普通高品质再生骨料混凝土和再生骨料混凝土的抗碳化能力较普通混凝土均有所降低的结论。

综上所述,再生骨料密实等级降低、孔隙率大是造成再生混凝土较普通混凝土抗碳化能力降低的主要因素,但可通过提高再生骨料质量、减少水灰比、适当添加粉煤灰等措施提高抗碳化能力。

1.2 抗冻性能

再生混凝土的抗冻性,即在水饱和条件下,再生混凝土材料经受多次冻融循环而不疲劳破坏,并且强度也不显著降低的性能。

崔正龙等^[9]研究了在不同水灰比条件下再生混凝土试件的抗冻性能的影响,得出再生混凝土的抗冻性能随水灰比的增大而减小,且其抗冻性能都较普通混凝土差。应敬伟等^[10]通过试验提出,再生混凝土的抗冻性能会受到再生骨料的取代率、掺和料、水灰比和再生骨料来源这四个因素的影响。张雷顺等^[14]以骨料处理方式与水灰比为研究对象对再生混凝土的抗冻性能进行了研究,试验表明:增浆法对再生混凝土抗冻性的增强较其他粗骨料的处理方式明显,在其他条件一定时,降低再生混凝土的水灰比可以增加其抗冻性能。肖建庄等^[11]的试验研究表明:再生混凝土的抗冻性随水灰比的降低、引气剂的添加、矿物掺合料的加入、再生骨料粒径的减小和再生骨料的强化而提高。王军强等^[15]综合考虑了引气量、粉煤灰掺量和水灰比变化对再生混凝土抗冻性的影响,随引气剂的添加、粉煤灰的掺入和水灰比的减小再生混凝土的抗冻性能均有所增加。黄秀亮^[16]在研究再生混凝土较普通混凝土的抗冻融耐久性时发现:当粉煤灰掺量取代水泥量为15%时,能有效改善其抗冻融耐久性能,经改性后的再生混凝土的抗冻性与不掺入粉煤灰的普通混凝土较为接近。张军^[17]以花岗岩为母岩的再生骨料缺陷对再生混凝土耐久性的影响为方向进行了研究,得出了以花岗岩为母岩的再生骨料其表面附着砂浆的不利作用远比其内部缺陷对混凝土的抗冻能力影响大的结论。王竞妍^[18]采用以石灰岩为母岩的再生混凝土进行试验,提出再生骨料表面的附着砂浆是导致再生混凝土抗冻性能降低的主要因素,再生骨料内部缺陷是次要因素,且这种主次关系与基体混凝土的水胶比没有关系。苗壮^[19]、霍艳华等^[20]以基体混凝土的强度等级和再生粗骨料的取代率对再生混凝土抗冻性的影响为研究方向,提出再生混凝土的抗冻性能随基体混凝土的强度等级的提高而增大,随再生粗骨料取代率增加而下降。李金泽等^[21]利用再生粗骨料、聚丙烯纤维、粉煤灰、硅灰等不同掺量组合进行正交试验,研究其对混凝土抗冻性能的影响,试验结果表明:再生骨料取代率为60%时,复掺硅灰、聚丙烯纤维能显著改善再生骨料混凝土的抗冻性能。Adam J K^[22]研究了橡胶粉掺量对再生混凝土抗冻性能的影响,由试验结果得出:橡胶掺量为10%时抗冻性能最好,抗冻性能最差的为

30%。Abbas A 等^[23]研究了再生混凝土配合比方法对其抗冻融循环性能的影响,研究发现用等砂浆体积法配置的再生混凝土具有更高的抗冻性能。

综上所述发现,通过减小水灰比,掺加引气剂,以及掺加掺合料细化混凝土内部的孔结构等方法都可提高再生混凝土抗冻性能。但总体来讲,再生混凝土的抗冻性低于普通混凝土,抗冻效果不佳,因此建议在气候条件恶劣的地区不应将其应用于结构中。

1.3 抗氯离子渗透性能

混凝土抗氯离子渗透性能是指防止环境介质中的氯离子因混凝土不密实而渗入混凝土内部,对混凝土的质量产生危害的性能。

黄莹^[2]提出:水灰比和再生骨料掺量是影响再生混凝土抗氯离子渗透性能的两个关键因素,再生混凝土抗氯离子渗透能力是随着水灰比的增加而下降,且作者提出了再生混凝土的双相复合渗透模型,并给出了再生混凝土渗透系数的计算方法。应敬伟等^[10]通过灰色关联分析对再生混凝土的抗冻性能所受影响因素的大小进行了排序,得到再生混凝土的抗氯离子渗透能力会受到混凝土龄期、水灰比和掺和料的影响,影响的结果从大到小依次为:水灰比、掺和料和混凝土龄期的结论。肖建庄等^[11]的研究结果表明:再生骨料取代率增加时,再生混凝土的抗氯离子渗透能力也随之增加。周旋^[24]的研究结果表明:高性能再生混凝土的抗氯离子侵蚀性能会因再生骨料取代率而起抑制作用,但作用并不是很明显,而造成耐久性和力学性能降低主要是取代所使用的再生骨料的吸水率和含泥量略大些。张军^[17]的研究表明:以花岗岩为母岩的再生骨料其表面附着的削弱作用相比其内部缺陷对再生混凝土的抗氯离子的渗透能力影响更大,并且与再生混凝土的水胶比无关。王竞妍^[18]研究了以石灰岩为母岩的再生骨料缺陷对再生混凝土的抗氯离子渗透性能的影响,说明了在低水胶比条件下,再生骨料表面附着的水泥砂浆是再生骨料缺陷影响再生混凝土抗氯离子渗透能力的主要因素,而在高水胶比条件下,其对再生混凝土的抗氯离子渗透性能的影响以再生骨料内部的初始裂纹为主。叶禾^[13]指出再生混凝土的抗氯离子渗透性较普通混凝土有所降低,主要原因也是孔隙率较高;作者通过优化的再生骨料的生产工艺生产的高品质混凝土,其氯离子渗透能力高出普通混凝土 4%~6%,抗氯离子渗透能力略低于普通混凝土。王俊杰^[25]采用不同应力水平作用下再生混凝土氯离子扩散试验的方法,通过对试验结

果分析可知:拉应力产生的损伤对氯离子的侵入有利;而在较低压应力作用下,其氯离子渗透系数略有减小,当压应力水平达到 35% 以上时,随着应力的增大,氯离子的渗透系数会迅速增加。Limbachiya M 等^[26]提出再生骨料最佳掺量宜取 30%,并分析原因得到当再生骨料取代率超过 30% 时,再生混凝土的抗氯离子渗透能力明显降低;而取代率不超过 30% 时抗氯离子能力削弱不明显。Shi-Cong K^[27]研究发现:暴露于室外 10 年后的再生混凝土,其抗氯离子侵蚀能力仍比普通混凝土小,但掺入粉煤灰能有效提高再生混凝土抗氯离子侵蚀能力。

综上所述,再生混凝土的抗氯离子渗透性随着再生骨料取代率的增加而降低,可以通过掺入粉煤灰、矿粉等方法减小因再生骨料本身含有的裂缝和包裹的部分水泥浆对其抗氯离子渗透性能的影响。

1.4 抗硫酸盐腐蚀性能

混凝土的抗硫酸盐腐蚀性能是指防止腐蚀环境中的 SO_4^{2-} 渗入混凝土内部,与混凝土的水化产物发生化学反应,引起混凝土体积膨胀而破坏的能力。

陈冠等^[28]对再生骨料混凝土试件在 28 d 干湿循环条件下的抗硫酸盐侵蚀性能进行了正交试验,试验分析结果表明:试件的抗压强度有所降低,抗硫酸盐腐蚀影响最大的是水灰比,其次是砂率,9.5 mm~16 mm 的粗骨料较小,16 mm~19 mm 的粗骨料最小。闫宏生^[29]采用干湿循环试验方法,研究了对再生混凝土抗硫酸盐腐蚀的影响因素包括水胶比、再生骨料取代率、矿物质掺量等,并且提出降低水灰比、掺加粉煤灰能改善水泥石-骨料界面过渡层微观结构,提高再生混凝土内部结构的密实性,增强其抗硫酸盐侵蚀能力,而随着再生骨料取代率的增加,抗硫酸盐侵蚀能力反而降低。聂宇等^[30]通过试验提出粉煤灰和再生粗骨料的掺量组合也是影响混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的因素之一,进一步分析提出粉煤灰的掺量对再生混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能影响较大,但再生混凝土的抗压强度是随着粉煤灰取代率的增加而降低的,因此建议粉煤灰掺量选用 10%,再生粗骨料掺量选用 25% 的混凝土。王玲玲等^[31]研究纳米 CaCO_3 和纳米 SiO_2 对再生混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响,采用抗压强度损失评价其抗硫酸盐性,试验结果显示:掺 1% 纳米 SiO_2 的再生混凝土抗压强度损失下降 41.5%,而掺 15% 纳米 CaCO_3 的再生混凝土强度损失仅下降 9.7%,相比而言,纳米 SiO_2 的强化效果更突出。

综上所述,再生混凝土的复杂微观结构和界面特点造成其抗硫酸盐腐蚀性能较普通混凝土差,可

通过降低水灰比、掺加粉煤灰及纳米增强材料等方式提高其抗硫酸盐腐蚀性能。

1.5 耐磨性能

混凝土的耐磨性是指混凝土表面抵抗磨损的能力。它包括机械磨耗、冲磨、空蚀3种情况。近年来,对再生混凝土的耐磨性能的研究较少,但得到较为一致的结论。

应敬伟等^[10]通过试验针对再生混凝土耐磨性能的影响因素提出:再生粗骨料取代率的增大会导致再生混凝土的耐磨性减小,并分析主要是由再生粗骨料表面附着的水泥砂浆引起的,而再生细骨料取代率的进一步增加,再生混凝土的耐磨性会呈现增大的发展规律,这主要是因为水泥浆对再生细骨料有着较强粘结力。肖建庄等^[11]、王磊^[32]的研究表明:其面层混凝土的硬度和强度对再生混凝土的耐磨性有很大影响,一般再生混凝土越密实,其耐磨性就越好。

综上所述,再生混凝土的耐磨性较普通混凝土差,其性能与再生骨料取代率、表层强度和硬度有关系,因此增加混凝土的强度、改善再生混凝土面层的质量以及提高再生骨料的质量等方式可提高再生混凝土的耐磨性。

1.6 抗水渗透性能

混凝土抗水渗透性能是指防止水通过混凝土内部存在的渗水孔道进入混凝土内部产生破坏作用的性能。

肖建庄等^[11]、阮雪琴等^[33]通过试验研究表明:再生混凝土的抗水渗透能力与其孔隙率紧密相关,一般较普通混凝土差,且随着再生骨料取代率的增加而增加。张军^[17]利用以花岗岩为母岩的基体混凝土,研究了不同水灰比对再生混凝土的抗水渗透性的影响,得出再生骨料表面的附着砂浆与其内部初始缺陷对再生混凝土的抗水渗透性有不利影响,且在高低水灰比下的影响效果都是以其表面附着砂浆为主的结论。王竞妍^[18]同样考虑了水灰比对以花岗岩为母岩的基体混凝土的再生混凝土抗水渗透性的影响,结果表明:再生混凝土的抗水渗透性能随水灰比的增大而呈增大的变化趋势,且再生混凝土的抗水渗透性能受到影响以表层附着砂浆为主,骨料内部裂纹为辅,与基体混凝土的水胶比无关。国内有的学者^[34]研究了再生混凝土的抗水渗透性,得到了再生混凝土的抗水渗透性较普通混凝土差,且一般因素都是通过影响再生混凝土的孔隙率从而对其抗水渗透性能造成影响的影响的结论。

综合以上专家学者们的试验结果可以发现,尽

管可以通过降低再生骨料的孔隙率来提高抗水渗透性,但总体来讲,在相同条件下再生混凝土的抗渗性较普通混凝土差。

1.7 干燥收缩性能

混凝土的干燥收缩性能是指混凝土在空气中硬化时,首先失去自由水;继续干燥时,使毛细孔中形成负压产生收缩;再继续受干燥则吸附水蒸发,引起胶凝体失水而紧缩的性质。

崔正龙等^[6]通过试验研究表明:标准养护条件下,再生混凝土的干燥收缩长度变化率随干燥龄期的增加而增大;高温蒸压养护下再生混凝土的干燥收缩变化率在蒸压养护期间呈快速增加的趋势,之后将趋于稳定。肖建庄等^[11]的研究结果表明:再生混凝土的干缩变形比普通混凝土大,变化规律呈现出前期增长迅速,后期增长缓慢的特点,当再生骨料取代率增加、水胶比增大、再生骨料表面附着的砂浆增加时,其干缩变形也逐渐增加,但掺入其他的掺合料可以减少其干燥收缩量,其中以膨胀剂的效果最为明显。叶禾^[13]提出:普通再生混凝土较普通混凝土而言,各龄期收缩率增加程度约为40%,作者指出其收缩增大的原因主要是普通再生骨料混凝土的孔隙率较高,吸水率大,失水时的干缩也大,因此限制了再生骨料混凝土在实际工程中的应用;而作者通过设计优化的再生骨料的生产工艺生产出的高品质再生骨料混凝土,收缩率仍比普通混凝土高出10%左右。Fathifazl G等^[35]人通过试验发现,“等体砂浆”方法制成的再生混凝土的干缩率与其对应的普通混凝土相当,甚至还要低于后者。

综上所述可以看出,再生骨料的取代率、水灰比的增加会导致再生混凝土干燥收缩能力的增大,其主要原因还是孔隙率大造成的,可通过掺入其他掺合料降低收缩能力。

2 总结

(1) 再生混凝土的耐久性在抗碳化、抗冻性、抗氯离子渗透性、抗硫酸盐腐蚀性、耐磨性、抗水渗性等方面较普通混凝土均有一定的降低,且得到其主要是由再生骨料较高的孔隙率和吸水率引起的。

(2) 再生混凝土的抗碳化性、抗硫酸盐腐蚀性均可通过减少水灰比、添加粉煤灰等方式加以改善;通过减小水灰比、掺入引气剂等能提高再生混凝土的抗冻性;掺入粉煤灰、矿粉能使再生混凝土的抗氯离子渗透性提高;增加混凝土的强度、强化再生骨料等能使再生混凝土的耐磨性显著改善;掺入其它掺合料可降低因再生骨料孔隙率大对再生混凝土抗水

渗性和干燥收缩性的影响。

(3) 由于国外再生混凝土与国内存在一定的差异,建议加快建立适合国内再生骨料分级和再生混凝土相关试验标准,促进再生混凝土技术在土木工程领域的应用。

参考文献:

- [1] 刘玉莲,曹明莉,张会霞.再生混凝土耐久性研究进展[J].混凝土,2013(4):94-100.
- [2] 黄莹.再生粗骨料对混凝土结构耐久性影响机理研究[D].南宁:广西大学,2012.
- [3] 祝林超,李鹏,寇君淑,等.再生粗骨料混凝土物理力学性能研究进展[J].四川建材,2015,41(3):13-14.
- [4] 郭清伟,陈国民,陈强,等.用于道路路面修补的再生粗骨料混凝土的强度与耐久性研究[J].湖南城市学院学报,2011,20(2):14-17.
- [5] 王甜甜,王健健,左工.浅述再生混凝土技术在建筑工程中的发展与应用[J].四川建材,2015,41(5):12-13.
- [6] 崔正龙,童华彬,吴翔宇.不同养护环境对再生混凝土耐久性的影响[J].硅酸盐通报,2014,33(9):2200-2204.
- [7] Kou S C, Poon C S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2012,35(10):69-76.
- [8] Evangelista L, DE Brito J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2010,30(1):9-14.
- [9] 崔正龙,大芳贺喜喜,北迁政文,等.再生骨料混凝土耐久性能的试验研究[J].硅酸盐通报,2007,26(6):1107-1111.
- [10] 应敬伟,肖建庄.再生骨料取代率对再生混凝土耐久性的影响[J].建筑科学与工程学报,2012,29(1):56-62.
- [11] 肖建庄,雷斌.再生混凝土耐久性能研究[J].混凝土,2008(5):83-89.
- [12] 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):91-96.
- [13] 叶禾.高品质再生骨料混凝土的力学性能与耐久性试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2009.
- [14] 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):64-66.
- [15] 王军强,陈年和,蒲琪.再生混凝土强度和耐久性能试验[J].混凝土,2007(5):53-56.
- [16] 黄秀亮.再生混凝土耐久性试验研究[D].合肥:合肥工业大学,2013.
- [17] 张军.基于花岗岩母岩的再生骨料缺陷对再生混凝土力学性及耐久性的影响[D].北京:北京交通大学,2015.
- [18] 王竞妍.再生骨料缺陷对再生混凝土耐久性的影响[D].北京:北京交通大学,2013.
- [19] 苗壮.再生粗骨料对再生混凝土力学与耐久性能影响的试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [20] 霍艳华,毛添钿,熊进刚.再生粗骨料混凝土耐久性试验研究[J].四川建筑科学研究,2012,38(2):191-194.
- [21] 李金泽,孟云芳,李瑞,等.聚丙烯纤维再生骨料混凝土抗冻性能研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):181-185.
- [22] Adam J Kardos, Stephan A Durham. Strength, durability, and environmental properties of concrete utilizing recycled tire particles for pavement applications[J]. Construction and Building Materials, 2015,98:832.
- [23] Abbas A, Fathifazl G, Isgor O B, et al. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method[J]. Cement & Concrete Composites, 2009,31(8):555-563.
- [24] 周旋.高性能再生混凝土断裂与耐久性能的试验研究[D].泉州:华侨大学,2011.
- [25] 王俊杰.基于界面的再生混凝土力学性能及耐久性能提升机理研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [26] Limbachiya M, Meddah M S, Ouchagour Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012,27(1):439-449.
- [27] Kou Shi-cong, Poon Chi-sun. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash[J]. Cem Concr Compos, 2013,37(2):12.
- [28] 陈冠,冯凯强.再生骨料混凝土耐久性研究[J].山西建筑,2013,39(1):86-88.
- [29] 闫宏生.再生混凝土的硫酸盐腐蚀试验研究[J].混凝土,2013(5):13-15.
- [30] 聂宇,杜文汉,王孟,等.不同掺量粉煤灰及再生粗骨料混凝土在硫酸盐侵蚀下的抗压强度研究[J].江西建材,2014(20):4-5.
- [31] 王玲玲,谷亚新,李育霖,等.纳米强化技术对再生混凝土耐久性影响研究[J].混凝土,2014(7):48-51.
- [32] 王磊.浅析再生混凝土耐久性及其改善措施[J].商品混凝土,2013(7):91-92.
- [33] 阮雪琴,赵全振.再生混凝土耐久性与界面结构性质研究[J].工业建筑,2012,42(S1):577-582.
- [34] 朱映波.再生混凝土的耐久性及其改善措施[J].混凝土,2004(7):31-33.
- [35] 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):1026-1037.