

文章编号:1673-2049(2016)02-0091-07

再生粗骨料多种改性方法对混凝土抗压强度提升效果的试验

王江浩,耿 欧,李富民

(中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘要:为对比粗骨料多种改性方法对混凝土抗压强度的提升效果,分别采用不同质量分数的盐酸溶液和8%质量分数草酸溶液以及25%质量分数防水砂浆浆液和2%质量分数聚乙烯醇浆液对再生粗骨料进行化学浸洗或物理填充,将处理得到的再生粗骨料制成边长为100 mm的立方体混凝土试件进行抗压强度测试。结果表明:粗骨料的的不同处理方式对混凝土抗压强度均有不同程度的提高,其中2%质量分数盐酸溶液(处理效果接近最佳)、8%质量分数草酸溶液、25%质量分数防水砂浆浆液和2%质量分数聚乙烯醇浆液处理骨料分别可使混凝土抗压强度提高11.84%,7%,4.37%,11.31%,并达到同级配天然碎石骨料混凝土抗压强度的96.63%,92.44%,90.18%,96.17%。

关键词:废弃混凝土;再生粗骨料;改性;抗压强度

中图分类号:TU528.041 **文献标志码:**A

Experiment on Effect of Several Measures by Modifying Recycled Coarse Aggregate on Improving Compressive Strength of Concrete

WANG Jiang-hao, GENG Ou, LI Fu-min

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering,
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: In order to compare the effect of several measures by modifying recycled coarse aggregate on improving compressive strength of concrete, the HCl solution with different concentrations, $H_2C_2O_4$ solution with concentration of 8%, waterproofing mortar solution with concentration of 25% and PVA solution with concentration of 2% were used to treat the recycled coarse aggregate samples by chemical immersion or physical filling, respectively. By using the treated recycled coarse aggregate, some cubic concrete samples with the dimension of 100 mm×100 mm×100 mm were fabricated for testing the compressive strength. The results show that different treatments may achieve an increase in the compressive strength of the mixed concrete to some different extents. Comparing with the untreated recycled coarse aggregate, the aggregates treated respectively with the above-mentioned HCl solution with concentration of 2% (closing to the best effect), $H_2C_2O_4$ solution with concentration of 8%, waterproofing mortar solution with concentration of 25%, and PVA solution with concentration of 2% contribute to an increase in the compressive strength of the mixed concrete for 11.84%, 7%, 4.37% and 11.31%,

收稿日期:2015-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51178454);徐州市科技基金项目(XM13B125)

作者简介:王江浩(1991-),男,浙江杭州人,工学硕士研究生,E-mail:wjhow00@163.com。

respectively. The increased compressive strength achieves a good level as high as 96.63%, 92.44%, 90.18% and 96.17% of the concrete mixed with the natural coarse aggregate, which has the same grain composition with the recycled coarse aggregate.

Key words: waste concrete; recycled coarse aggregate; modification; compressive strength

0 引言

由于规划、设计及使用的不规范,中国建筑平均寿命仅为 30 年。目前已经出现了大量被拆除或者即将被拆除的钢筋混凝土建筑。这直接导致每年产生 $21 \times 10^8 \sim 28 \times 10^8$ t 建筑垃圾,其中废弃混凝土占 50%~60%^[1]。目前废弃混凝土的处理仍然以露天堆放及填埋为主,废弃混凝土的弱碱性、难降解、坚硬等特质会对土地资源造成极大破坏。另一方面,中国作为世界上每年新建建筑量最大的国家,每年有约 20×10^8 m² 的新建建筑。骨料作为混凝土主要原料,每生产 1 m³ 混凝土需消耗 1 700~2 000 kg 骨料^[2]。仅 2013 年一年,中国混凝土使用砂石骨料的消耗就超过 100×10^8 t。天然骨料的获得不仅消耗大量不可再生资源,还会对环境造成破坏。将废弃混凝土回收处理制成再生骨料替代天然骨料是目前可行的方法之一,这对节约资源和保护环境具有重要意义,符合国家可持续发展战略需求。

由于再生粗骨料特殊的细观结构,其与天然粗骨料拌制的混凝土在力学等特性上存在明显差异。

文献[3]对再生粗骨料进行了细观结构分析,经破碎所得的再生粗骨料表面分布有 1~100 μ m 不等的细微裂缝,硬化水泥界面呈颗粒状凹凸分布,形成松散的界面过渡区。同时文献[3]还对再生粗骨料的基本性能进行了测试,再生粗骨料具有表观密度小、吸水率与含水率高、压碎指标值较高、针片状含量小的特点。

文献[4]使用再生粗骨料制作低强、中强、高强混凝土试块,并进行抗压强度、弹性模量和干缩性测试,结果表明:水灰比小于 0.45 时,再生骨料取代率高于 40% 的混凝土抗压强度明显降低,但弹性模量无明显差异;干缩性测试中,100% 再生粗骨料混凝土 28 d 龄期干缩率比天然骨料混凝土高出 44%。文献[5]的研究表明,再生粗骨料掺量的增加使混凝土弹性模量有一个明显的降低。此外采用等量砂浆替代再生粗骨料,新拌混凝土工作性出现一个明显的降低。笔者认为以上现象是由于再生粗骨料高吸水率及高杂质率造成的。文献[6]采用不同龄期废弃混凝土制得的再生粗骨料拌制混凝土进行抗压强

度测试,结果表明,不同龄期再生粗骨料均使新制混凝土抗压强度降低,且降低程度随龄期增大而增大,最大可达 15%。文献[7]分析了再生粗骨料取代率及骨料最大粒径对混凝土强度、坍落度、抗压强度和抗折强度等性能的影响。随着混凝土中再生粗骨料掺量的增加,混凝土抗压强度逐渐减小,坍落度提高,抗折强度逐渐提高,且抗折强度随再生粗骨料粒径的增大而降低。文献[8],[9]通过试验研究了再生粗骨料对混凝土抗压强度的影响。骨料级配调整前后,混凝土抗压强度总体随再生粗骨料取代率降低而增大。再生混凝土的长期抗压强度与普通混凝土有所不同,在 28 d 龄期之后,再生混凝土抗压强度仍有较大增长。再生混凝土的抗压强度与其使用的再生粗骨料表观密度基本呈线性关系。

文献[10],[11],[12]将再生混凝土应用在柱、框架及钢管混凝土柱中进行抗震试验,得到相近的试验结果:构件破坏形式、滞回特性、刚度、承载力、骨架曲线、能量耗散等均与普通混凝土构件相近,能够提供良好的抗震性能,但仍劣于普通混凝土构件。其中,文献[10]经试验得到钢管再生混凝土柱刚度退化速率稍快于普通钢管混凝土柱;文献[11]指出再生混凝土柱延性比普通混凝土差,在掺入粉煤灰后延性得到改善但承载力下降;文献[12]制作的再生混凝土框架表现为强柱弱梁形式,最大水平承载力比普通混凝土框架低 2.3%~15.7%。

上述研究表明,未经处理的再生粗骨料基本性质劣于天然骨料,制成的混凝土与天然骨料混凝土相比也存在一定的差距。通过改性处理改善再生粗骨料基本性质,从而提高再生混凝土性能成为一个现实问题。

文献[13]对再生粗骨料进行了盐酸处理、硫酸处理、擦洗处理和加热洗涤处理。试验结果显示硫酸处理及加热洗涤处理得到的骨料吸水率降低,其他性能与天然骨料相近,所制得的再生混凝土强度及特性与天然骨料混凝土基本相同。文献[14]采用酸液处理法、水玻璃处理法、水泥浆液处理法、聚合物乳液处理法、有机硅防水剂处理法对再生粗骨料进行处理,均取得了一定的强化效果。文献[15]采用自制复合浆液用于强化再生粗骨料,并设计 C30

和 C60 强度的混凝土,骨料强化后的混凝土 28 d 抗压强度较未强化的骨料混凝土提高 51.8%(C30)和 31.4%(C60),未强化骨料混凝土抗压强度未达到设计强度,强化骨料混凝土强度达到设计强度。文献[16]对再生粗骨料进行了硅粉填充处理及超声波清洗,所得的再生混凝土抗压强度均有不同程度的增长。

综上所述,再生粗骨料对混凝土力学性能的影响根据骨料级配、骨料取代率、骨料最大粒径以及混凝土种类的不同而不同;另一方面,不同处理方式对再生粗骨料的改性效果也不同,而且差别较大;强化浆液的选取和强化机理仍需进行大量的试验来研究,目前仍未找到比较经济合理的强化方式。

本文选用化学浸洗和物理填充 2 类再生粗骨料处理方法进行对比研究,以期得到再生粗骨料的良好改性方案。

1 试验方案

1.1 试验材料

水泥采用 PO 42.5 级普通硅酸盐水泥。所用砂为天然河砂,细度模数为 2.75,含水率为 2.88%。再生粗骨料取自江苏省徐州市中国矿业大学建筑垃圾堆放场废弃混凝土,经人工和颚式破碎机二级破碎而成。再生粗骨料的基本性能和级配分别如表 1,2 所示。另外,对比用相同级配的天然碎石骨料,基本性能亦见表 1。

表 1 粗骨料基本性能

Tab. 1 Basic Properties of Coarse Aggregate

骨料类型	表观密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	吸水率/ %	压碎指标/ %	针片状 含量/%
再生粗骨料	2.68	1.5	4.90	15.6	4.13
天然粗骨料	2.82	0.1	0.48	11.7	9.23

表 2 再生粗骨料颗粒级配

Tab. 2 Grain Composition of Recycled Coarse Aggregate

筛孔孔径/mm	筛余量/g	分计筛余/%	累计筛余/%
16	0.096	1.88	1.88
9.5	1.798	35.31	37.19
4.75	1.470	28.87	66.06
2.36	0.563	11.06	77.12
筛底	1.165	22.88	100.00

盐酸选用涂阳市东方化学试剂有限公司生产的质量分数为 36%~38% 的浓盐酸,相对密度为 1.18,符合国家标准 GB 622—89。草酸选用北京康普汇维科技有限公司生产的质量分数为 99.50% 的草酸晶体。防水砂浆选用北京东方雨虹防水技术股

份有限公司吉仕涂 120 渗透型防水砂浆。聚乙烯醇由上海美梦佳化工科技有限公司生产。

1.2 再生粗骨料改性处理方法

配置多种不同质量分数强化浆液,见表 3。除盐酸外,其余改性浆液质量分数根据多次反复试验所得结果取效果最佳的质量分数。改性处理方法如下。

表 3 强化浆液质量分数

Tab. 3 Mass Concentration of Treating Fluids

强化浆液	盐酸	草酸	防水砂浆	聚乙烯醇
质量分数/%	1,2,3,4	8	25	2

1.2.1 化学浸洗

水泥砂浆呈碱性,故可采用酸溶液对骨料表面附着的砂浆进行中和以去除,从而降低骨料的吸水率^[14]。另一方面,可通过控制酸溶液质量分数及用量来减轻酸与原骨料的反应。

本文试验中,首先将盐酸溶液或草酸溶液用自来水稀释至所需质量分数(表 3),将再生粗骨料倒入此强化浆液中,液面高于骨料 1~2 cm,然后通过循环搅拌与静置的方法加速反应。具体循环制度尚无参考可循,本文试验通过探索试验,以每次搅拌过程中不再出现明显反应气泡为搅拌停止标志,最终确定的循环制度为:每搅拌 2 min 后静置 30 s,循环搅拌 5 次,如此即可保证本组所有骨料完成充分浸洗。最后将反应过的浆液过滤去除并用清水冲洗,处理后的骨料自然风干。

1.2.2 物理填充

物理填充方法是采用颗粒级数在微米级的填充剂与水混合制成强化浆液对骨料进行浸泡,起到填充再生粗骨料表面微裂缝的作用,以此改善骨料界面特性。

本文试验中,首先将防水砂浆或聚乙烯醇浆液分别用自来水稀释至表 3 所示的质量分数,然后加入再生粗骨料,液面高度高出骨料 1~2 cm,并通过循环搅拌与静置的方法加速填充作用。具体循环制度与上述化学浸洗过程类似,即每搅拌 2 min 后静置 30 s,循环搅拌 5 次,使浆液能够与骨料表面充分接触。之后再每隔 1 h 搅拌 1 次,防止混合料结块,12 h 后骨料表面完成初凝,过滤掉剩余浆液,处理后的骨料自然风干。

再生粗骨料改性处理后的表观特征如图 1 所示。图1(a)为未处理再生粗骨料,骨料表面包裹有较多废弃水泥砂浆,骨料表面砂浆的平均覆盖率随粒径的增大而减小,但减小趋势并不显著,粒形呈饱

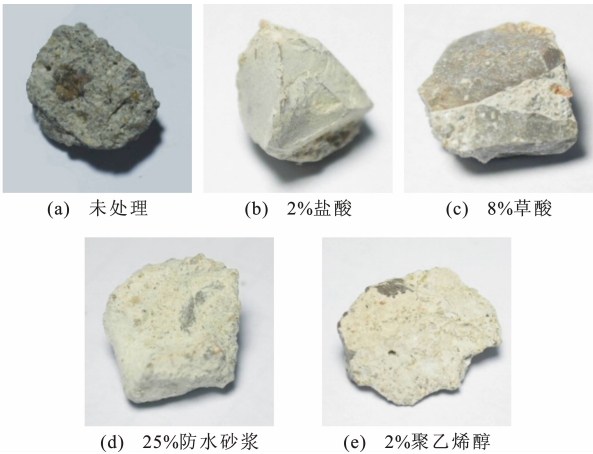


图 1 不同方式处理后骨料外观特征

Fig. 1 Apparent Characteristics of Coarse Aggregate Treated with Different Measures

满颗粒状,并有少量纯砂浆颗粒;经化学浸洗的再生粗骨料[图 1(b),(c)]表面砂浆明显减少,覆盖率趋于一个极低值且无明显差异,不受原始骨料粒径、粒形影响,原始骨料粒形显露,无纯砂浆颗粒残留;经物理填充的再生粗骨料[图 1(d),(e)]表面被强化浆液覆盖,原废弃砂浆部分覆盖均匀、致密,而外露原始骨料表面覆盖相对薄弱,故浆液平均覆盖率随骨料粒径增大而减小。

1.3 混凝土试件设计与制作

参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000),按 C30 普通混凝土配合比配置再生混凝土。每种改性处理方式设置试件 9 个,共 9 组 81 个,试件编号如表 4 所示。试件成型后,在实验室静置 24 h

表 5 不同质量分数稀盐酸处理后的再生骨料混凝土抗压强度

试件编号	RA	HRA1	HRA2	HRA3	HRA4
28 d 抗压强度/MPa	32.02	33.96	35.81	35.17	34.91
与 RA 混凝土的相对值	1.000 0	1.060 6	1.118 4	1.098 4	1.090 3
与 NA 混凝土的相对值	0.864 0	0.916 4	0.966 3	0.949 0	0.942 0

表 6 不同浆液处理后的再生骨料混凝土抗压强度

试件编号	RA	MRA25	ORA8	PRA2	HRA2	NA
28 d 抗压强度/MPa	32.02	33.42	34.26	35.64	35.81	37.06
与 RA 混凝土的相对值	1.000 0	1.043 7	1.070 0	1.113 1	1.118 4	1.157 4
与 NA 混凝土的相对值	0.864 0	0.901 8	0.924 4	0.961 7	0.966 3	1.000 0

总体上讲,盐酸处理再生骨料具有积极作用,而处理效果则与所用盐酸质量分数密切相关。当盐酸质量分数较低($0\% < c < 2\%$)时,混凝土抗压强度与骨料处理用盐酸质量分数呈正相关,这是由于再生粗骨料表面附着的砂浆为碱性的水泥水化产物(主

表 4 试件编号

Tab. 4 Number of Specimens

试件编号	骨料处理方式
HRA1	1% HCl 处理
HRA2	2% HCl 处理
HRA3	3% HCl 处理
HRA4	4% HCl 处理
ORA8	8% 草酸处理
MRA25	25% 防水砂浆处理
PRA2	2% 聚乙烯醇处理
RA	未处理再生粗骨料
NA	天然粗骨料

后拆模,标准养护 28 d,试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,试件抗压强度按《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)进行测试。

2 试验结果及分析

试件在 28 d 标准养护后进行抗压强度试验,所有试件强度等级小于 C60,因此所获得的强度值均应乘以换算系数 0.95。再生粗骨料经不同改性方式处理后混凝土抗压强度分别见表 5、6。

2.1 稀盐酸改性粗骨料的效果

图 2 为再生骨料经盐酸改性后制得的再生混凝土抗压强度值。再生粗骨料经盐酸处理后混凝土抗压强度明显提高。当盐酸质量分数 c 在 $0\% \sim 2\%$ 之间时,质量分数与抗压强度近似呈线性增长关系,且在 2% 左右时抗压强度达到最大。当盐酸质量分数 $c > 2\%$ 时,混凝土抗压强度随质量分数的增长而降低,且降低速率逐渐减小。

要为铝酸三钙、铝酸二钙、铁铝酸钙、氢氧化钙等钙的水化物^[17],能够与盐酸发生化学反应生成可溶性盐。经盐酸处理后的再生粗骨料表面脆性砂浆明显减少,吸水率降低^[14],使得新拌水泥与骨料界面粘结更加牢固,最终使得混凝土抗压强度增大,当处

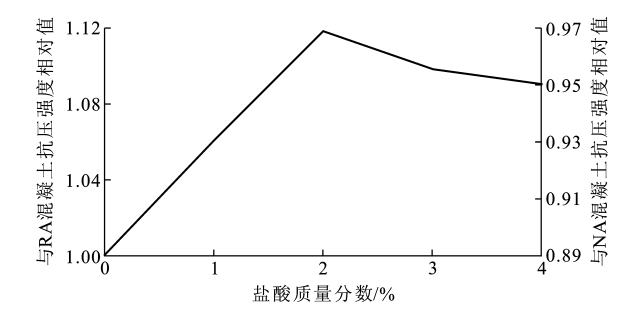


图 2 不同质量分数盐酸强化再生骨料效果
Fig. 2 Treatment Effects of Different Mass Concentration HCl on Recycled Coarse Aggregate

理用盐酸质量分数在 2% 左右时达到峰值,此时再生粗骨料表面砂浆与盐酸反应使松散砂浆被完全去除,致密砂浆占比达到一个平衡值,再生粗骨料孔隙率及吸水率尚不过大,界面粗糙程度达到一个合理水平,形成了界面区的有利梯度分布结构,从而可以大幅缓解界面区因组分分布问题而造成的应力集中现象^[18],最终使得混凝土抗压强度达到最大。峰值过后,残余的致密砂浆继续与较浓的盐酸反应,再生粗骨料界面趋于平整,新拌砂浆与骨料界面咬合力降低,最终使得混凝土抗压强度降低。

2.2 不同方法改性粗骨料的效果

不同改性方式处理的骨料制成的混凝土抗压强度如图 3 所示。未处理骨料混凝土抗压强度仅为天然骨料混凝土的 86.4%,经处理的再生粗骨料混凝土抗压强度较未处理的强度均有所提高,其中 2% 质量分数盐酸处理效果最佳,再生骨料混凝土抗压强度提高 11.84%,达到天然骨料混凝土的 96.63%;2% 质量分数聚乙烯醇浆液处理使再生骨料混凝土抗压强度提高 11.31%,达到天然骨料混凝土的 96.17%;8% 质量分数草酸溶液处理使再生骨料混凝土抗压强度提高 7%,达到天然骨料混凝土的 92.44%;25% 质量分数防水砂浆处理使再生骨料混凝土抗压强度提高 4.37%,达到天然骨料混凝土的 90.18%。即处理后的再生粗骨料试件抗压强度均未达到天然骨料试件抗压强度。

防水砂浆及聚乙烯醇能够渗入水泥基毛细孔内,形成结晶并遇水膨胀形成致密晶体,同时 2 种浆液本身与混凝土之间具有很好的粘结性^[19-20]。强化浆液的填充作用降低了表面砂浆的孔隙率,粘结作用能够加固部分松散脆弱砂浆,从而有效改善再生粗骨料的表观特性,提高混凝土试块的抗压强度。

草酸对水泥砂浆的作用机理同盐酸,故对骨料的改性效果也比较显著,但仍不及 2% 质量分数盐

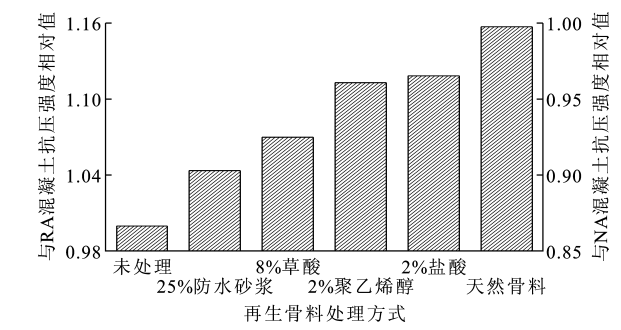


图 3 不同改性方式对再生骨料的强化效果
Fig. 3 Treatment Effects of Different Measures on Recycled Coarse Aggregate

酸。这是因为草酸能与碳酸钙反应产生不溶于水的草酸钙^[21]附着在骨料表面,降低界面粘结性。同时草酸钙呈弱酸性,在拌制混凝土过程中能够与碱性混凝土反应形成多个结晶水的水化铝硫酸钙,使试块内部尤其是骨料周围孔隙率提高,体积膨胀^[22],最终导致试块抗压强度不及盐酸处理骨料混凝土抗压强度。

3 讨论

文献[14]在室温条件下,将再生粗骨料分别用 0.1 mol · L⁻¹ 的盐酸溶液和硫酸溶液浸泡 24 h,之后用清水洗去残余酸液获得改性骨料用于制作混凝土试块,硫酸处理骨料混凝土抗压强度最高,达到天然骨料混凝土抗压强度的 95%。本文试验采用不同质量分数盐酸溶液对再生粗骨料进行改性处理,改性效果与文献[14]的试验结果接近,在 2% 质量分数盐酸下混凝土抗压强度为天然骨料混凝土的 96.63%,高于文献[14]试验结果。由此可知对于同种改性浆液,处理液质量分数会对改性效果产生影响,且存在一个最佳质量分数值使骨料改性效果达到最佳。

文献[16]采用自行配制的复合强化浆液强化再生粗骨料用于制作 C30 和 C60 混凝土试块。强化浆液含固量为 25%,由纳米 SiO₂、纳米 CaCO₃ 浆体、水玻璃和聚羧酸高效减水剂按照一定比例配制而成,骨料强化后制得的混凝土 28 d 抗压强度较未强化骨料混凝土提高 51.8% (C30) 和 31.4% (C60),未强化骨料混凝土抗压强度未达到设计强度,强化骨料混凝土抗压强度达到设计强度。与文献[16]相比,本文试验由于未处理再生粗骨料混凝土抗压强度已经能够达到较高值,故防水砂浆及聚乙烯醇浆液对再生粗骨料改性并未使混凝土抗压强度大幅度提升,但改性效果仍然明显,分别达到天然

骨料混凝土的 90.18% 和 96.17%。由此可知,物理填充作为再生粗骨料的改性方式之一,其可行性是值得肯定的,但其改性效果因所用再生粗骨料自身特性不同而存在较大差异。

4 结 语

(1) 盐酸溶液、草酸溶液通过化学浸洗的方式处理再生粗骨料,可以除去再生粗骨料表面废弃砂浆,从而有效改善再生粗骨料细观界面特性,提高再生混凝土抗压强度。

(2) 不同质量分数盐酸溶液对再生粗骨料改性效果不同。当盐酸质量分数 c 在 0%~2% 时,质量分数与抗压强度近似呈线性关系,且质量分数在 2% 左右时抗压强度最大,较未处理再生骨料混凝土提高 11.84%,达到天然骨料混凝土的 96.63%。当盐酸质量分数 $c > 2\%$ 时,混凝土抗压强度随质量分数的增长而降低,降低速率逐渐减小。

(3) 防水砂浆和聚乙烯醇浆液通过物理填充的方式对再生粗骨料进行处理,可以降低骨料表面水泥基孔隙率,从而提高再生混凝土抗压强度;25% 质量分数防水砂浆和 2% 质量分数聚乙烯醇浆液分别使再生骨料混凝土抗压强度提高 4.37% 和 11.31%,达到天然骨料混凝土的 90.18% 和 96.17%。

参考文献:

References:

- [1] 孙跃东,周德源.我国再生混凝土的研究现状和需要解决的问题[J].混凝土,2006(4):25-28.
SUN Yue-dong,ZHOU De-yuan. The Present Study State and Problems to Be Solved on Recycled Concrete in China[J]. Concrete,2006(4):25-28.
- [2] 邓寿昌,张学兵,罗迎社.废弃混凝土再生利用的现状分析与研究展望[J].混凝土,2006(11):20-24.
DENG Shou-chang,ZHANG Xue-bing,LUO Ying-she. Abandon the Concrete Present Condition of the Reborn Exploitation Analysis and the Research Outlook[J]. Concrete,2006(11):20-24.
- [3] 王江浩,张倩,邱豪侠,等.再生粗骨料的微观特征及基本性能研究[J].江苏建筑,2014(1):90-92.
WANG Jiang-hao,ZHANG Qian, QIU Hao-xia, et al. Research on Microscopic Features and Basic Properties of Recycled Coarse Aggregate[J]. Jiangsu Construction,2014(1):90-92.
- [4] HO N Y,LEE Y P K,LIM W F, et al. Efficient Utilization of Recycled Concrete Aggregate in Structural Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineer-

ing,2013,25(3):318-327.

- [5] KNAACK A M,KURAMA Y C. Rheological and Mechanical Behavior of Concrete Mixtures with Recycled Concrete Aggregates [C]//CARRATO J, BURNS J. Structures Congress 2012. Chicago:Structural Engineering Institute,2012:2257-2267.
- [6] KUMAR P S,DHINAKARAN G. Effect of Admixed Recycled Aggregate Concrete on Properties of Fresh and Hardened Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2011,24(4):494-498.
- [7] 刘书贤,魏晓刚,王伟,等.再生粗骨料对再生混凝土性能的影响[J].建筑结构,2014,44(14):17-20.
LIU Shu-Xian,WEI Xiao-gang,WANG Wei, et al. Influence of Recycled Coarse Aggregate on Recycled Concrete Performance[J]. Building Structure,2014,44(14):17-20.
- [8] 肖建庄,林壮斌,朱军.再生骨料级配混凝土抗压强度的影响[J].四川大学学报:工程科学版,2014,46(4):154-160.
XIAO Jian-zhuang, LIN Zhuang-bin, ZHU Jun. Effects of Recycled Aggregates' Gradation on Compressive Strength of Concrete[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2014,46(4):154-160.
- [9] 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.
- [10] 张向冈,陈宗平,薛建阳,等.钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2014,47(9):45-56.
ZHANG Xiang-gang, CHEN Zong-ping, XUE Jian-yang, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tube Columns[J]. China Civil Engineering Journal,2014,47(9):45-56.
- [11] 胡琼,卢锦.再生混凝土柱抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(2):23-27.
HU Qiong, LU Jin. Experimental Research on Hysteretic Behavior of Recycled Concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2012,44(2):23-27.
- [12] 孙跃东,肖建庄,周德源,等.再生混凝土框架抗震性能的试验研究[J].土木工程学报,2006,39(5):9-15.
SUN Yue-dong, XIAO Jian-zhuang, ZHOU De-yuan, et al. An Experimental Study on the Seismic Behavior

- of Recycled Concrete Frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 9-15.
- [13] PURUSHOTHAMAN R, AMIRTHAVALLI R R, KARAN L. Influence of Treatment Methods on the Strength and Performance Characteristics of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 27(5): 1-7.
- [14] 姜越川. 再生骨料改性处理研究[J]. 混凝土, 2011(7): 85-86, 90.
- JIANG Yue-chuan, Study in the Improving Properties of Recycled Aggregate[J]. Concrete, 2011(7): 85-86, 90.
- [15] 朱勇年, 孟睿覃, 孟涛, 等. 复合浆液强化对 C30 和 C60 再生混凝土性能和微观形貌的影响研究[J]. 施工技术, 2014, 43(18): 38-40, 47.
- ZHU Yong-nian, MENG Rui-tan, MENG Tao, et al. Influence of Intensified Composite Grout on the Properties and Micro-deformation of C30 and C60 Recycled Concrete[J]. Construction Technology, 2014, 43(18): 38-40, 47.
- [16] KATZ A. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6): 597-603.
- [17] 王德武. 盐酸环境中混凝土地面的腐蚀与防护[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(12): 563-564.
- WANG De-wu, Corrosion and Protection of Concrete Floor in Hydrochloric Acid Environment[J]. Corrosion & Protection, 2000, 21(12): 563-564.
- [18] 董延玲. 混凝土界面区组分梯度分布的改善及其对混凝土性能影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2004.
- DONG Yan-ling, Improvement of the Gradient Distribution of the Structure of the Interfacial Zones Between the Aggregates Pretreated Cement Paste and Influence of the Performance of Concrete[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2004.
- [19] 黄月文. 聚合物干粉防水砂浆粘接材料的研究[J]. 化学与粘合, 2007, 29(2): 82-86.
- HUANG Yue-wen, Study on the Polymer Dry Mixed Mortar for Bonding Material[J]. Chemistry and Adhesion, 2007, 29(2): 82-86.
- [20] 卜良桃, 周宁, 鲁晨, 等. PVA-ECC 与混凝土界面钻芯拉拔试验研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(2): 45-51.
- BU Liang-tao, ZHOU Ning, LU Chen, et al. Research on the Bond-performance of Polyvinyl Alcohol-engineered Cementitious Composite to Concrete[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(2): 45-51.
- [21] 岳文瑾. 草酸钙晶体的生长与抑制[D]. 合肥: 安徽大学, 2004.
- YUE Wen-jin, Growth and Inhibit Calcium Oxalate [D]. Hefei: Anhui University, 2004.
- [22] 吴玉波, 王留生, 许铁群, 等. 草酸车间的腐蚀及防护[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2011, 28(1): 26-29.
- WU Yu-bo, WANG Liu-sheng, XU Tie-qun, et al. Study on Corrosion Mechanisms of Oxalic Acid Plant and Design of Protective Plan[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2011, 28(1): 26-29.