

再生粗集料化学强化试验研究

胡旭晗¹, 肖杰^{1*}, 杨和平¹, 吴超凡², 张继森²

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.湖南云中再生科技股份有限公司)

摘要: 建筑垃圾再生集料相比天然集料物理力学性能较差,为提高其性能,该文采用4种化学溶液对再生粗骨料进行物理性能强化,使用不同浓度溶液对集料处理不同时间,测试其吸水率及压碎值的变化。结果表明:4种溶液均可降低再生集料的吸水率和压碎值,但在不同浓度和不同处理时间下效果不同。有机硅树脂对再生粗骨料吸水率的降低效果最明显;水玻璃溶液对提高再生集料强度效果最好;盐酸处理效果次于水玻璃和有机硅树脂,但过高浓度或过长的处理时间反而降低了骨料性能;碱溶液强化效果最弱,不推荐使用。综合考虑强化效果,推荐了3种再生粗骨料强化方法。

关键词: 道路工程; 再生粗集料; 化学强化; 吸水率; 压碎值

伴随着中国建筑业的迅速发展,每年都有大量的旧建筑、老旧路面面临拆除和重建,由此每年都会产生数以亿吨计的建筑垃圾。建筑垃圾随意丢弃不仅占地巨大、污染严重,同时也是对这种资源的巨大浪费。对建筑垃圾的回收利用成为近几年研究的焦点,目前最为广泛的利用方式为:对建筑垃圾进行破碎、筛分等一系列处理之后制作成再生骨料,部分或者全部替代天然骨料用以生产再生混凝土或水稳碎石材料。相较于天然骨料,再生骨料的各项性能有着明显的下降。再生骨料表面包裹着大量的水泥砂浆,同时在其使用及破碎、筛分的过程中,产生了大量的微裂缝,这些原因导致了再生骨料强度低、空隙率高、堆积密度小、吸水率大,其中强度低和吸水率过高严重限制了再生骨料

的应用范围,目前主要应用于低强度水泥混凝土的制备,其耐久性能、渗透性能、抗冻性能等性能也有明显的下降。

为提高再生集料的利用率,改善再生骨料的缺陷,应用于更高质量的混凝土,国内外学者都对再生骨料的性能强化进行了一系列的研究。目前再生骨料强化方法主要有物理强化和化学强化两种。物理强化的原理是利用机械设备对骨料进行处理,使再生骨料相互撞击、磨削以除去表面附着的水泥砂浆,同时磨去棱角,使粒形更好。物理强化方法有立式偏心研磨法、颗粒整形技术和加热研磨法等。然而,因物理强化方法工序复杂、耗能巨大,尚未推广使用。化学强化方法主要是使用溶液、聚合物等对再生骨料进行浸泡、淋洗等

(2) 压实度满足规范要求时,混凝土块及砖混结构细集料的膨胀量均满足路基施工技术要求,CBR值均满足各级公路路基填料的强度要求。

(3) 路基回填材料的压实度越大,CBR值越大,材料抵抗压缩变形的能力越强,稳定性越好,施工中确保压实度达到规范及设计要求是质量控制关键。

(4) 利用混凝土块细集料铺筑的路基试验段检测结果表明,当压实度达到规范及设计要求时,路基回弹模量值也能满足规范及设计要求,进一步说明将建筑

垃圾细集料应用于路基回填料是可行的。

参考文献:

- [1] 赵军,刘秋霞,林立清,等.大城市建筑垃圾产生特征演变及比较[J].中南大学学报:自然科学版,2013(3).
- [2] 魏秀萍,赖茂宇,张仁胜.建筑垃圾的管理与资源化[J].武汉工程大学学报,2013(3).
- [3] 王中明.建筑垃圾再生细集料砂浆砌体受力性能试验研究[D].郑州大学硕士学位论文,2011.
- [4] JTG D30-2004 公路路基设计规范[S].

收稿日期:2018-08-10

基金项目:湖南省科技支撑计划项目(编号:2015SK2063);长沙市科技计划项目(编号:kq1703046)

作者简介:胡旭晗,男,硕士研究生.E-mail:1299330165@qq.com

*通信作者:肖杰,男,博士,副教授.E-mail: xiaojie324@csust.edu.cn

处理,以填充或封闭骨料的微小裂缝,降低其吸水率,提高强度。强化剂类型有酸、碱、PVA 聚合液、水泥浆液和有机硅树脂等,各类强化剂对粗集料的强化效果不同。化学强化方法因操作简便,耗能较小,且不会造成级配变异,对设备要求较低等优点,从而得到大量使用。

目前的再生骨料化学强化研究较为单一,通常只进行某一浓度溶液或处理时间的试验,改性溶液浓度、浸泡时间等因素对强化效果的影响研究较少。故该文选用盐酸、自制碱性溶液、水玻璃溶液和有机硅树脂 4 种化学溶液对再生粗骨料进行处理,测试再生粗骨料吸水率、压碎值等指标在强化前后的变化,研究不同处理方式、不同处理时间和不同浓度对再生粗骨料的强化效果,以期找到最有效效果的强化方式,提高再生集料质量,用于再生混凝土的生产和应用。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

1.1.1 天然及再生粗集料

试验用粗骨料为湖南某公司生产。天然集料为石灰石,再生骨料为砖与混凝土再生集料,由砖混结构建筑拆除、破碎得到。粗集料筛分后根据粒径分为 3 档:4.75~9.5、9.5~19、19~26.5 mm。试验中采用粒径为 9.5~19 mm 的再生粗集料进行性能强化,经人工分称量计算,得到该档粗集料砖含量为 9.1%。

9.5~19 mm 再生粗集料及作为对比的天然粗集料的物理性质见表 1。

表 1 粗骨料性质(9.5~19 mm)

集料类别	吸水率/%	压碎值/%	含水率/%	表观相对密度	含泥量/%
天然集料	0.35	20.1	0.3	2.73	0.9
再生集料	6.56	23.9	3.8	2.59	2.2

由表 1 可知:与天然粗集料相比,再生粗集料吸水率较高,压碎值稍大,集料表观相对密度小,含泥量与含水率都较高。

1.1.2 强化试剂

水玻璃:硅酸钠溶液,模数为 3.0,浓度为 30%。

碱溶液:由固态氯化钠(NaCl)、碳酸钾(K₂CO₃)、亚硝酸钠(NaNO₂)、氢氧化钠(NaOH)分别按 30%、30%、10%、30%的质量比溶解于水制成。

盐酸溶液:浓度为 33%的浓盐酸。

有机硅树脂:型号为 SIRESRMS100,德国生产,主要成分为液体甲基聚硅氧烷,催化剂为钛酸正丁酯。

1.1.3 水

骨料清洗及配置溶液所用水为自来水。

1.2 试验方法

1.2.1 再生粗骨料化学强化试验方法

参考相关学者研究结果,选用粒径为 9.5~19 mm 的再生粗集料进行化学强化试验。为凸显化学溶液的强化效果,避免集料表面松散颗粒及浮尘对化学强化试验的影响,进行试验前,对再生骨料进行清洗。

水玻璃加水稀释至质量浓度分别为 10%、20%、30%,将用自来水清洗晾干后的粗骨料在溶液中分别浸泡 6、12 和 24 h,取出晾干备用。

盐酸和碱溶液与水玻璃强化方案接近,盐酸加水稀释至浓度为 1%、3%、5%,碱溶液浓度分别为 2%、4%、6%。浸泡时间分别为 6、12、24 h 和 4、12、24 h。浸泡相应时间后取出晾干备用。

有机硅树脂采用喷雾法对再生粗骨料进行强化。取适量有机硅树脂加入 2%催化剂,搅拌均匀后,加水稀释至所需浓度。已有研究表明:有机硅树脂质量取强化骨料质量的 4%,即可充分覆盖骨料表面。使用喷雾器将溶液均匀喷洒至再生骨料上。有机硅树脂具有优良的耐高温性能,故对比组采用高温 180 ℃对喷洒溶液后的骨料进行加热烘干,以便加速有机硅树脂的覆盖和浸入缝隙。

采用水玻璃、盐酸及碱溶液对骨料进行浸泡时,需进行多次搅动,使粗骨料与溶液充分接触,使反应彻底;采用有机硅树脂强化粗集料时,喷洒的同时要不停翻动骨料,目的是使骨料各表面充分暴露在空气中,均匀覆盖一层薄膜。

1.2.2 粗骨料物理性能试验方法

对天然粗集料和再生粗集料的含水率、吸水率、表观密度等指标依据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》进行测试,强化后再生集料的吸水率亦按此规程进行试验。

该文强化所用骨料粒径为 9.5~19 mm,与 GB/T 14685—2011《建设用碎石、卵石》中的压碎值试验规程一致,另考虑到性能强化试验主要研究强化前后骨料压碎值的变化,为便于操作和比较,统一采用此规程中的压碎值试验规程,对粒径为 9.5~19 mm 的天然粗集料及强化前后的再生粗集料进行压碎值试验。

2 试验结果与讨论

2.1 再生粗集料强化效果

经各溶液强化处理的再生粗骨料表面形态如图 1 所示。对处理前后骨料进行观察,发现再生粗骨料经碱溶液浸泡后,表面无明显变化,而经盐酸强化后,表面砂

浆脱落,粗糙度增加。水玻璃及有机硅树脂处理后,骨料表面均覆盖一层薄膜,裂缝及部分孔洞被封堵,但有机硅树脂处理的骨料表面薄膜覆盖更为均匀彻底。

2.2 强化结果及分析

2.2.1 化学强化对再生粗集料压碎值的影响

再生粗骨料在不同浓度溶液浸泡不同时间或不同处理温度强化后的压碎值如图 2 所示。

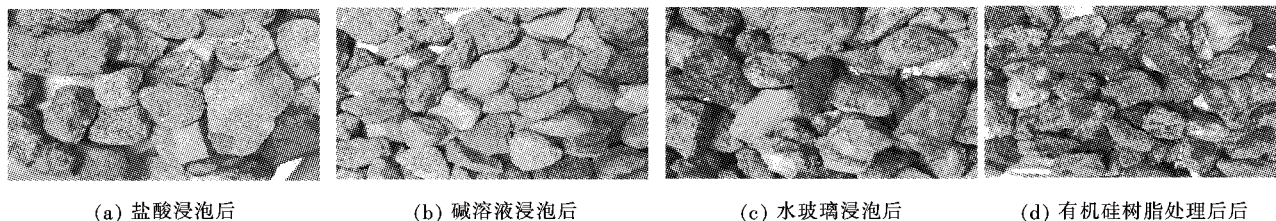


图 1 强化处理后的再生粗集料

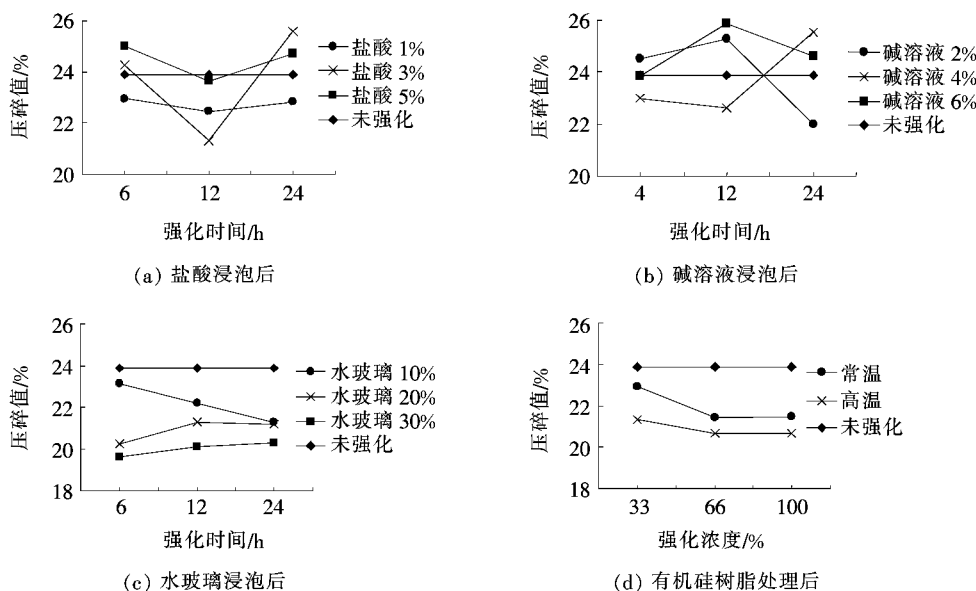


图 2 不同强化条件下的集料压碎值

由图 2 可以看出:盐酸、碱溶液、水玻璃及有机硅树脂都对再生粗集料的强度提高有一定效果,但是提升效果因强化方式(溶液浓度、浸泡时间,处理方式、强化温度等因素)不同而有所差异。

盐酸与包裹在再生粗骨料表面的水泥砂浆中的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等发生酸碱中和反应,表面薄弱的水泥砂浆脱落。盐酸强化后,再生粗骨料压碎值出现下降,在 1%、3% 和 5% 不同浓度下,粗集料压碎值的下降幅度随处理时间先减小再增大,浸泡 12 h 时的压碎值下降幅度最大,强化效果最好。分析原因是:浸泡时间过短时,反应没有进行彻底,无法充分溶解掉再生集料表面的水泥砂浆,使强化效果不佳;而时间过久

时,可能是盐酸与砂浆反应后,还与内部骨料发生反应,导致骨料的强度降低,压碎值反而升高。随着盐酸浓度的增高,压碎值的降低幅度在减小,即浓度越高,压碎值越大,其中浓度为 3% 和 5% 时,部分集料压碎值已出现大于未处理粗骨料压碎值的现象。这可能是盐酸浓度过高,易侵入缝隙与内部再生骨料发生反应,反而降低了再生集料的压碎值。

碱溶液中碱性物质与再生骨料中未完全水化的矿物发生反应,生成物浸入再生粗骨料缝隙,起到填充作用,黏合骨料的微细裂纹,提高了再生骨料的强度。碱性溶液相同浓度时,粗集料压碎值基本呈现随着浸泡时间先升高再降低的规律;而在浸泡时间一定,浓度为

2%或6%时,压碎值比较接近,都出现压碎值升高甚至高于无强化材料压碎值的现象。推测是在浸泡时间过久或浓度过高时,溶液中的碱性物质与骨料中的二氧化硅等物质发生了反应,在骨料表面生成了碱-硅酸凝胶,凝胶在吸水后发生膨胀,导致混凝土再生骨料发生胀裂,强度降低,导致其压碎值反而升高。

水玻璃主要成分为硅酸钠,其硬化时析出硅酸凝胶,可以渗入并堵塞再生粗集料的毛细孔,同时也能封堵表面的细小裂缝,大大改善骨料的空隙结构。同时,水玻璃与原混凝土的水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,生成水硬硅酸胶体,可再次封堵再生集料的空隙,黏合内部裂缝,提高骨料的密实度和强度。随着水玻璃浓度的增加,对再生粗骨料强度的强化效果逐渐增强,即相同浸泡时间,水玻璃浓度越高,骨料压碎值降低幅度越大。这是因水玻璃浓度变大时,反应更为彻底,生成物能更有效地填充缝隙,使粗骨料强度增加。水玻璃浓度较低时(10%),随着浸泡时间增加,压碎值变小,强化效果增强。而浓度较大时,浸泡时间的延长对压碎值的影响十分小,说明高浓度的水玻璃在 6 h 内已能够充分反应,处理时间的延长意义不大。

有机硅树脂具有很强的憎水性和渗透性,固化成膜后能封堵再生集料的孔洞和微裂缝,降低压碎值。由图2(d)可以看出:有机硅树脂浓度一定时,高温环

境有利于试剂的充分作用,对再生料强度的提升效果更好。原因是有机硅树脂为耐高温材料,在高温下可以更好地渗透和包裹骨料,封堵骨料裂缝。而在相同温度下,随着试剂浓度增长,处理后骨料压碎值降低幅度先增大后基本不变,表明 66%浓度的有机硅树脂溶液可对骨料进行充分强化。

横向对比各溶液对再生粗集料的强化效果,由表 2 可以看出:水玻璃及有机硅树脂对再生粗骨料强度的提升效果较好,平均压碎值降低幅度最大,分别达到了 10.9%和 8.8%。盐酸对再生粗集料的压碎值强化效果一般,平均下降幅度仅为 0.8%。碱溶液对再生粗集料压碎值的改善并无明显效果,某些条件下反而导致压碎值升高,降低了骨料的强度。

表 2 不同强化方式下的平均压碎值及强化幅度 %

强化方式	平均压碎值	强化幅度
无强化	23.9	0
水玻璃	21.3	10.9
HCl	23.7	0.8
碱溶液	24.1	-0.8
有机硅树脂	21.8	8.8

2.2.2 化学强化对再生粗集料吸水率的影响

不同强化方式下的吸水率变化如图 3 所示。

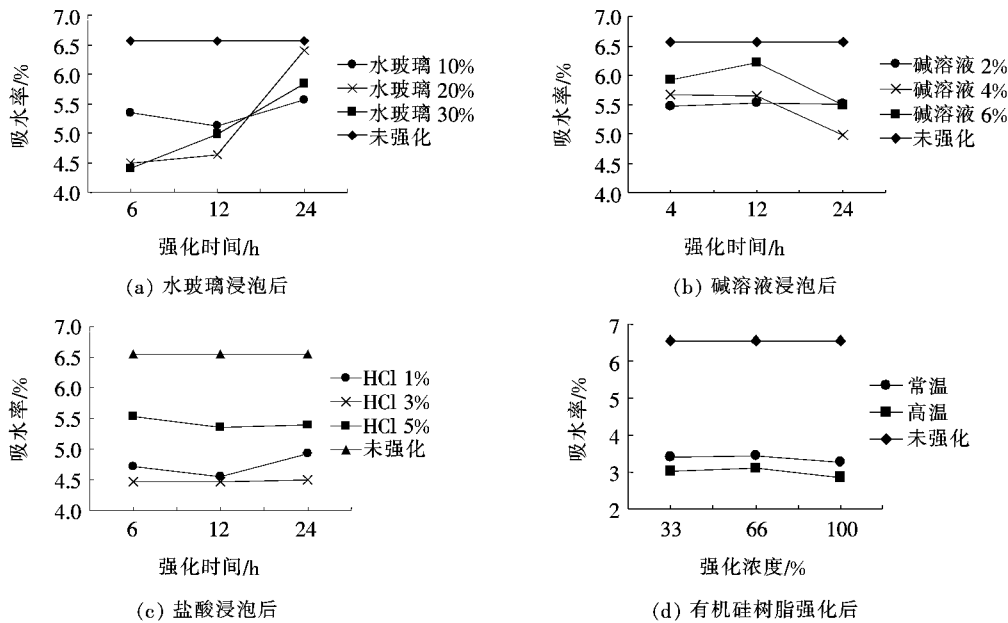


图 3 不同强化条件下再生集料的 24 h 吸水率

水玻璃硬化产生的硅酸凝胶及反应生成的水硬硅酸胶体填充了裂缝,降低了骨料的吸水率。由图 3(a)可知:水玻璃浓度为 20%时,对再生集料吸水率的降

低效果最好,其次为 10%。相同浓度下,吸水率降幅随强化时间先降低后升高,浸泡 12 h 时对吸水率强化效果最好。

碱性物质与再生骨料中矿物发生反应,其生成物填补了骨料的缝隙,降低了吸水率。由图 3(b)可知:相同浸泡时间下,随着碱溶液浓度的升高再生集料的吸水率降低,2%浓度下,吸水率下降幅度最大;相同浓度下,随着浸泡时间增长,吸水率降幅先减小后增大,浸泡 24 h 时强化效果最好。

盐酸去除了再生骨料表面吸水率较大的砂浆,导致了吸水率的降低。由图 3(c)可知:盐酸溶液浓度一定时,随着骨料浸泡时间的增长,骨料吸水率降低幅度逐渐减小,浸泡 24 h 时,盐酸对再生集料吸水率的强化效果已十分微弱,分析原因可能是短时间反应去除了表面的老旧砂浆,降低了吸水率,而反应时间过长,集料包裹砂浆反应结束后,又与内部骨料发生反应,使裂缝或坑洞增多,反而增加了吸水率,与盐酸强化后骨料压碎值的变化规律一致;吸水率随浓度大小变化规律不够明显,但浓度高时,短期反应更为彻底,强化效果更好。

由图 3(d)可知:有机硅树脂对吸水率的降低作用显著,下降幅度较大。高温作用下,有机硅树脂更充分地封闭了内部的缝隙,吸水率降幅增大;相同温度条件下,强化效果随有机硅树脂浓度的增大而增强。其原因是固化成膜的有机硅树脂封堵了骨料缝隙,大大减小了骨料的吸水率。

表 3 为不同强化方式下,24 h 吸水率及强化幅度的平均值。

表 3 不同强化方式下的平均 24 h 吸水率及强化幅度

强化方式	平均吸水率/%	强化幅度/%
无强化	6.56	0
水玻璃	4.88	25.6
HCl	5.20	20.7
碱溶液	5.60	14.6
有机硅树脂	常温	3.12
	高温	2.26

由图 3 及表 3 可以得出:4 种溶液对再生粗集料吸水率的改善均有较为明显的效果,平均吸水率的降低幅度碱溶液最低,为 14.6%。盐酸与水玻璃对吸水率的降低效果好于碱溶液,平均吸水率改善幅度比碱溶液分别增加 6.1% 和 11%。有机硅树脂溶液对粗骨料吸水率的改善效果最为显著,平均降低幅度达到 52.4%。

3 结论

(1) 与天然粗集料相比,再生粗集料密度小、吸水率大、压碎值高。吸水率相差最大:再生集料 24 h 吸水率约为天然集料的 18 倍,吸水率差异大是影响再生集料应用的重要原因。

(2) 4 种化学强化方法对再生粗集料吸水率的降低效果明显,对集料压碎值的降低效果相对较弱。

(3) 各强化措施均可降低再生粗骨料的吸水率,降低幅度由大到小分别为有机硅树脂、水玻璃、盐酸和碱溶液。

(4) 各强化方式对再生粗集料压碎值的变化有不同影响。水玻璃溶液降低压碎值效果最好,其次为有机硅树脂,盐酸对集料强度提升作用较弱,碱性溶液作用最不显著。某些条件下,化学试剂会导致集料压碎值的升高。

(5) 综合考虑吸水率及压碎值,4 种化学试剂强化效果从强到弱依次为:有机硅树脂、水玻璃、盐酸和碱溶液。另综合考虑强化成本、时间等因素,采用 66% 浓度的有机硅树脂对再生粗集料进行喷洒,然后进行高温加热、20% 水玻璃浸泡 6 h 以及 3% 浓度盐酸浸泡 12 h 共 3 种方式对再生粗集料强化效果最好。碱溶液的强化效果相较其他方式都较弱,不建议采用。

参考文献:

- [1] 李秋义,全洪珠,秦原.混凝土再生骨料[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 刘陵庆.水泥稳定再生集料的性能及设计研究[D].长安大学硕士学位论文,2014.
- [3] 彭秋乐.粗集料压碎值影响因素研究[D].重庆大学硕士学位论文,2013.
- [4] 陈德玉,袁伟.再生粗骨料改性的试验研究[J].新型建筑材料,2009(2).
- [5] 周莉桦.碱骨料反应对混凝土耐久性影响研究[J].工业建筑,2011(S1).
- [6] 付明华.拆除混凝土再生细骨料的改性与应用研究[D].东南大学硕士学位论文,2016.
- [7] 程海丽,王彩彦.水玻璃对混凝土再生骨料的强化试验研究[J].新型建筑材料,2004(12).
- [8] 陈美祝,钟进军.再生粗骨料物理性能强化改性研究[J].公路,2011(7).