

砖矸再生矸强度性能及其强化研究<sup>\*</sup>张智斌<sup>1</sup>, 肖杰<sup>2,3</sup>, 吴超凡<sup>3,4</sup>, 胡旭晗<sup>2</sup>

(1.四川仁沐高速公路有限责任公司, 四川 成都 610041; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

3.湖南省建筑固废资源化利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410021; 4.湖南云中再生科技股份有限公司, 湖南 长沙 410021)

**摘要:** 在研究砖矸再生粗集料基本物理性能及化学强化后性能的基础上, 开展砖矸再生矸强度性能及其化学强化试验, 研究水灰比、砖含量及化学试剂处理对砖矸再生矸立方体抗压强度和劈裂抗拉强度的影响。结果表明, 再生矸的强度比普通矸有较大下降, 不满足设计要求; 水灰比增大导致矸强度降低, 水灰比大于 0.48 后强度剧减, 建议以 0.48 为其上限; 再生矸的强度随砖含量增加先增大后减小, 砖含量为 20% 时可获得较高强度; 经盐酸和水玻璃处理的再生矸强度提高较大, 而有机硅树脂使再生矸强度降低。

**关键词:** 公路; 砖矸再生粗集料; 再生矸; 化学强化; 强度性能

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2019)04-0065-05

随着中国基础建设的迅猛发展, 每年建筑施工及拆除都会产生大量建筑垃圾, 建筑垃圾的堆积和污染问题日益严峻。建筑垃圾中旧矸及旧砖块占比较大, 是建筑垃圾回收利用的研究重点, 通常采用再生集料的形式对建筑废弃物进行循环利用。使用再生集料制备再生矸用于道路、建筑等结构, 是建筑垃圾再利用的重要方向之一。肖建庄等对再生矸的配合比、强度性能等进行研究, 得到了再生集料特性、再生集料取代率、配合比等因素对再生矸的影响规律, 证明了建筑垃圾再生集料用于再生矸的可行性。但由于再生集料中含有水泥砂浆, 同时骨料内部存在大量微裂缝, 导致再生集料强度低、孔隙率高、吸水率大, 其制备的再生矸性能明显下降, 对再生矸的强化成为近年的研究重点。索伦等设计 5 种再生粗集料强化方法对再生矸的化学强化进行研究, 结果表明使用浓度为 5% 的盐酸溶液浸泡骨料 24 h, 利用机械搅拌方法去掉再生骨料表面旧砂浆, 再用 1% EVA 乳液浸泡骨料 24 h 并采用二次搅拌方法可得到较理想的矸强度。孙跃东等采用纯水泥浆、水泥浆外掺矿粉、水泥浆外掺硅藻土和水泥浆外掺硅粉 4 种溶液浸泡再生粗骨料, 其中采用水泥外掺硅藻土强化再生粗骨料对提高再生矸的抗压强度和弹性模量效果最佳。砖的存在也会影响再生矸的强度性能。陈萌等研究了不同碎黏土砖取代率 (0、20%、30%、50%) 再生矸的强度特性, 结果表明再生

矸立方体的抗压强度随砖含量的增加而降低。谢玲君通过试验研究影响烧结废砖瓦再生矸强度的主要因素, 结果表明再生矸强度的主要影响因素为粗骨料级配、砂率和水灰比, 再生砖瓦粗骨料取代率提高会导致强度降低, 但取代率为 70% 时强度高于取代率为 50% 时强度。

由于中国砖混类建筑物大量存在及再生技术落后, 废弃黏土砖与废弃矸通常无法分离处理, 生产了大量砖矸再生粗集料, 而对这种集料配制的再生矸性能研究较少。且现有骨料强化试验通常只针对旧矸再生集料, 对含砖的再生粗集料进行强化是否有效、用处理后的砖矸再生集料配制再生矸是否能提高再生矸的性能值得研究。该文在研究砖矸再生粗集料基本物理性能及化学强化后性能的基础上, 开展砖矸再生矸强度性能及其化学强化试验, 研究 100% 砖矸再生矸的强度性能, 分析水灰比、砖含量及化学试剂处理对砖矸再生矸立方体抗压强度和劈裂抗拉强度的影响。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验原材料

试验用粗集料分为两种: 天然集料即石灰石 (Natural Aggregate, NA); 再生集料即砖与矸再生集料 (Recycled Brick-Concrete Aggregate, RBCA), 由砖混结构建筑拆除、破碎得到。粗集料筛分后根

<sup>\*</sup> 基金项目: 湖南省科技支撑计划项目 (2015SK2063); 长沙市科技计划项目经费资助 (kq1703046)

据粒径分为 4.75~9.5、9.5~19、19~26.5 mm 3 档,经人工分拣称量计算,各档粗集料的砖含量见表 1,粗集料的物理性质见表 2。由表 2 可知:与天然粗集料相比,再生粗集料的吸水率较高,压碎值较大,集料表观密度小。

表 1 再生粗集料的砖含量

粒径/mm	砖含量/%
4.75~9.5	18.5
9.5~19	9.1
19~26.5	13.7

表 2 粗集料的性质

材料类型	压碎值/%	各档(mm)集料的表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )			各档(mm)集料的吸水率/%		
		19~26.5	9.5~19	4.75~9.5	19~26.5	9.5~19	4.75~9.5
NA	20.1	2.73	2.72	2.73	0.29	0.35	0.59
RBCA	23.9	2.56	2.59	2.62	8.53	6.65	7.39

试验用细集料采用湘江河砂,细度模数为 3.0。砼配制所用水泥为 PC32.5 复合硅酸盐水泥,其性质符合规范要求。试验用水为长沙市自来水。

### 1.2 化学强化方式

已有再生粗集料化学强化试验结果表明:采用 66%浓度的有机硅树脂对再生粗集料进行喷洒再进行高温加热、采用 20%水玻璃浸泡再生骨料 6 h、采用 3%浓度盐酸溶液浸泡骨料 12 h 均可得到较好的效果,骨料的吸水率和压碎值都可得到较大幅度降低。故采用这 3 种方式对再生砼进行强化试验。

### 1.3 砼配合比

试验所用砼粗集料采用 3 档再生粗骨料(4.75

~9.5、9.5~19、19~26.5 mm)按 1:1:1 的比例混合制成,经筛分试验测定,其级配符合砼用粗集料级配要求。再生砼中粗集料采用 100%砖砼再生粗集料。设计目标砼强度值为 C30,设计坍落度为 30~50 mm。根据现有研究,采用附加水法进行再生砼配合比设计,附加水量按下式计算:

$$\Delta W = M_{RA} \times S_{RA} \quad (1)$$

式中: $\Delta W$  为附加水量(kg); $M_{RA}$  为再生粗集料用量(kg); $S_{RA}$  为再生粗集料吸水率(%)。

经计算、试配及修正,得到砖砼再生砼基准配合比,根据化学强化后骨料吸水率计算各附加水量,得到各类砼配合比(见表 3)。

表 3 砼配合比

砼类别	水泥/(g·cm <sup>-3</sup> )	水/(g·cm <sup>-3</sup> )	砂/(g·cm <sup>-3</sup> )	粗骨料/(g·cm <sup>-3</sup> )	水灰比	砂率	附加水/(g·cm <sup>-3</sup> )
NC	404	194	574	1 102	0.48	0.34	0
RC	404	194	574	1 102	0.48	0.34	94
I	404	194	574	1 102	0.48	0.34	51
II	404	194	574	1 102	0.48	0.34	88
III	404	194	574	1 102	0.48	0.34	21

注:NC 为天然骨料砼;RC 为砖砼再生砼;I 为由水玻璃强化再生粗骨料配制的再生砼;II 为由盐酸强化再生粗骨料配制的再生砼;III 为由有机硅树脂强化的再生砼配制的再生砼。下同。

### 1.4 试验方案设计

依据表 3 所示砼配合比,采用振动成型法制作尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体砼试件,在标准养护室养护至规定时间(分别为 7、28 和 60 d)后,依据 GB 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行立方体抗压强度及劈裂抗拉强度试验。

在 RC 配合比的基础上,保持用水量不变,改变水泥用量,配制水灰比分别为 0.53、0.48、0.43、0.38 的砖砼再生砼,养护至龄期后测试其 7、28 d 立方体

抗压强度与劈裂抗拉强度。

对 4.75~9.5、9.5~19 及 19~26.5 mm 3 档再生粗集料进行手工分拣,挑选出再生砖粒和砼再生集料,称量后掺配,使砖的质量比分别为 0、10%、20%和 30%。经试验得到 3 种砖含量混合料的吸水率,按式(1)计算不同砖含量再生砼的附加水用量,结果见表 4。

按表 4 调整附加水量,其他配比不变,配制再生砼。经标准养生室养生至龄期后,测试 7 及 28 d 立方体抗压强度和劈裂抗拉强度。

表 4 不同砖含量下混合料的吸水率和附加水量

砖含量/%	混合料吸水率/%	附加水量/(kg·m <sup>-3</sup> )
0	6.2	68
10	7.7	85
20	9.0	99
30	11.1	122

2 试验结果与分析

2.1 砖矸再生矸强度

测试 RC 的 7、28 和 60 d 立方体抗压强度与劈裂抗拉强度,并与 NC 对比,结果见表 5。由表 5 可知:采用同配合比配制的矸,由于附加水的加入及骨

表 5 基准配合比矸的强度

矸类别	立方体抗压强度/MPa			劈裂抗拉强度/MPa		
	7 d	28 d	60 d	7 d	28 d	60 d
NC	28.1	36.2	40.2	2.17	2.76	3.39
RC	17.9	27.7	31.5	1.58	1.98	2.44
强度降低率/%	36	23	22	27	28	28

料性能的劣化,砖矸再生矸各龄期抗压强度和劈裂强度均出现较大幅度下降,降幅超过 22%。其中 28 d 立方体抗压强度为 27.7 MPa,比天然骨料矸降低 23%,无法达到设计强度 C30。需对砖矸再生矸进行强化改性,提高其强度。

2.2 水灰比对再生矸强度的影响

再生矸 28 d 立方体抗压强度及劈裂强度与水灰比的关系见图 1。由图 1 可知:砖矸再生矸立方体抗压强度和劈裂抗拉强度随水灰比的变化规律基本一致,随着水灰比的降低均增大,与天然骨料矸变化规律一致。其中水灰比由 0.48 增大为 0.53 时,抗压强度与劈裂强度降幅最大,故砖矸再生矸配合比设计时,水灰比应小于 0.48。

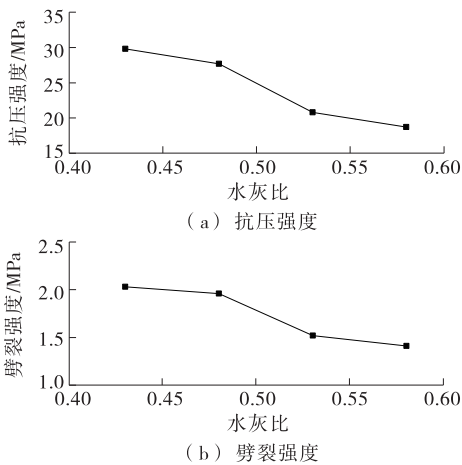


图 1 再生矸立方体抗压强度、劈裂强度与水灰比的关系

2.3 砖含量对再生矸强度的影响

再生矸立方体抗压强度和劈裂抗拉强度与砖含量的关系见图 2。由图 2 可知:1) 不同砖含量的砖矸再生矸早期强度差别很小,含量为 20% 时 7 d 抗

压强度略大,为 19.4 MPa,但总体强度值十分接近;劈裂强度呈现出与抗压强度相似的规律,砖含量对 7 d 劈裂强度影响微弱。推测是由于龄期较短时水泥水化程度较弱,强度未完全形成,再生矸中最薄弱的结构为水泥石,故砖含量影响不大。2) 龄期为 28 d 时,立方体抗压强度随着砖含量的增大先增大后减小,20% 砖含量时达到 28 MPa,相较其他 3 种砖含量有明显升高。劈裂强度随砖含量的增大先增大后减小,同样在 20% 掺量时达到最高值。文献[11]研究发现,废砖掺配天然集料的再生矸强度随着废砖掺量的增大而减小;文献[12]用 100% 再生骨料配制再生矸,得到 25% 废砖粗骨料掺配率(剩余 75% 粗骨料为矸再生粗骨料)再生矸强度高于 0 和 50% 废砖掺比再生矸,与该文试验结果相似。可能是在砖含量小于 20% 时,砖粒与矸再生粗集料颗粒形态互补,形成了良好的矸级配,骨料相互嵌挤,使

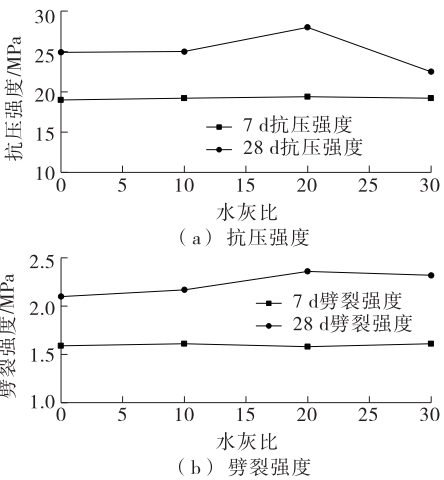


图 2 再生矸立方体抗压强度、劈裂抗拉强度与砖含量的关系

强度升高;而当砖含量超过 20% 时,砼中已存在较多强度低的砖骨料,故其强度下降较大。具体原因有待进一步研究。建议将砖砼再生砼中废弃砖含量控制在 20% 以下。

#### 2.4 化学强化再生砼强度与龄期的关系

各类砼立方体抗压强度与龄期的关系见图 3。由图 3 可知:1) 随着龄期的增长,天然骨料砼、无强化砖砼再生砼及三类强化骨料再生砼的立方体抗压强度均逐渐增大。说明随着水化程度的提高,砼强度逐步提高,粗集料的化学改性对砼的强度增长规律没有太大影响。2) 观察各龄期间隔的折线斜率可看出各龄期内强度增长规律。各类砼均表现为 0~7 d 强度折线斜率最高、7~28 d 斜率降低、28~60 d 斜率进一步降低。说明砖砼再生砼、3 种强化粗骨料再生砼与天然骨料砼的立方体抗压强度增长规律基本一致,早期强度快速增长,随着龄期的增长,强度增长幅度逐步减缓。盐酸强化粗骨料再生砼 7~28 和 28~60 d 强度折线斜率均高于其他 4 种砼,说明盐酸强化后再生骨料砼的后期强度仍保持不错的增长。

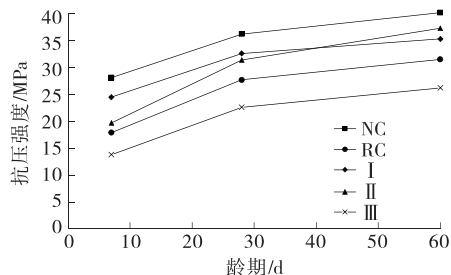


图 3 砼立方体抗压强度与龄期的关系

各类砼劈裂抗拉强度与龄期的关系见图 4。由图 4 可知:砼劈裂抗拉强度随龄期的变化基本与立方体抗压强度相似,随着龄期的增长,劈裂强度逐渐增大,前期增长速率较快,后期速度变缓。

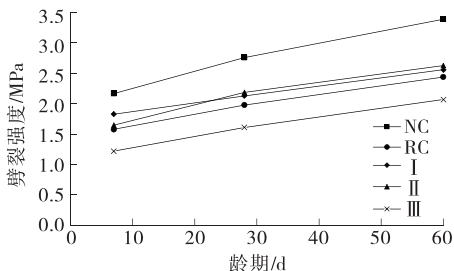


图 4 砼劈裂抗拉强度与龄期的关系

#### 2.5 化学强化对再生砼强度的影响

图 5、图 6 分别为各龄期不同类型砼的抗压强

度和劈裂抗拉强度对比。由图 5、图 6 可知:再生粗集料经盐酸和水玻璃处理后再配制再生砼,其 7、28 和 60 d 抗压强度和劈裂强度均高于未经强化的砖砼再生砼,但低于对应龄期的天然骨料砼强度;用有机硅树脂处理过的再生粗骨料配制砼,其 7、28 和 60 d 立方体抗压强度及劈裂抗拉强度均下降,其原因是有机硅树脂在再生粗集料的表面覆盖一层薄膜,该薄膜无法溶解,且与水泥浆体粘结性较差,导致骨料与水泥砂浆的结合更差,最终使再生骨料砼强度明显下降。

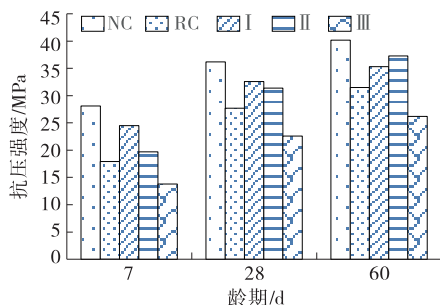


图 5 各类砼不同龄期抗压强度对比

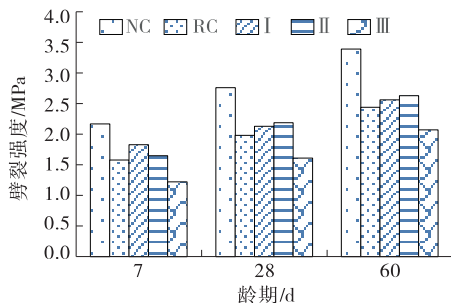


图 6 各类砼不同龄期劈裂抗拉强度对比

以未强化砖砼再生砼各龄期强度为基准,计算 3 种化学强化粗骨料再生砼的强度增长率,结果见表 6。由表 6 可知:1) 采用水玻璃和盐酸强化砖砼再生粗骨料均可显著提升再生砼的强度,平均强度增长率分别为 22% 和 14%,水玻璃强化效果高于盐酸。2) 分析 I、II 各龄期的强度增长率,水玻璃强化骨料可增加砼前期强度,盐酸则对砼后期强度有较好的强化作用。3) 使用有机硅树脂强化处理可提高骨料性质,但会导致再生砼强度降低,其 28 d 强度下降幅度达 19%。

### 3 结论

(1) 采用附加水法进行砖砼再生砼配合比设计,配制出的 100% 砖砼再生砼的抗压强度无法达到设计要求,劈裂抗拉强度也较低,与同配合比的天

表 6 各处理方式下矽的强度增长率

矽类别	抗压强度增长率/%				劈裂抗拉强度增长率/%			
	7 d	28 d	60 d	平均	7 d	28 d	60 d	平均
I	37	18	12	22	16	8	5	10
II	10	13	18	14	4	11	7	7
III	-23	-18	-17	-19	-23	-19	-15	-19

然骨料矽相比,其强度降低 20%以上。

(2) 水灰比对砖矽再生矽的强度有很大影响,水灰比越低,矽强度越高,水灰比低于 0.48 时强度下降较大。

(3) 再生粗骨料中砖含量对矽强度有影响,砖含量为 20%时抗压强度和劈裂强度都获得最大值,大于 20%时强度降低。建议将砖含量控制在 20%以内。

(4) 采用水玻璃和盐酸强化后,矽强度显著提高,抗压强度分别提升 22%、14%。水玻璃可较好地提升矽前期强度,盐酸则对后期强度增长有明显作用。采用有机硅树脂强化再生粗集料,虽会提高骨料的性能,但会导致再生矽强度降低,平均降低幅度达 19%。

#### 参考文献:

- [1] 李浩,翟宝辉.中国建筑垃圾资源化产业发展研究[J].城市发展研究,2015,22(3).
- [2] 肖建庄,李佳彬,兰阳.再生混凝土技术研究最新进展与评述[J].混凝土,2003(10).
- [3] 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).

- [4] 李佳彬,肖建庄,孙振平.再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2004,7(4).
- [5] 索伦,彭鹏,赵燕茹.再生粗集料强化试验研究[J].材料导报,2015,29(增刊 1).
- [6] 孙跃东,王涛.再生骨料强化对再生混凝土基本力学性能的影响[J].四川建筑科学研究,2010,36(4).
- [7] 陈萌,马智永,苗丽.碎粘土砖粗骨料再生混凝土强度试验研究[J].混凝土与水泥制品,2015(5).
- [8] 谢玲君.废弃烧结砖瓦再生骨料混凝土配制技术与性能研究[D].泰安:山东农业大学,2012.
- [9] 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).
- [10] 张学兵.再生混凝土改性及配合比设计研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [11] 王显利,李奇超,常广利.复掺废砖再生混凝土的抗压强度[J].北华大学学报:自然科学版,2017,18(4).
- [12] 徐原威.建筑垃圾再生混凝土的力学性能试验及在公路面层中的应用研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [13] 肖开涛.再生混凝土的性能及其改性研究[D].武汉:武汉理工大学,2004.
- [14] 张伟.再生混凝土性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2008.

收稿日期:2019-01-06

(上接第 64 页)

- [1] 学技术,2017(增刊).
- [2] 舒彪.花岗岩残积土路堤边坡水毁病害成因分析及处治措施[J].城市道桥与防洪,2017(5).
- [3] 邱路阳,刘毓毓,李大勇.高填方残积土路堤降雨滑塌机理与治理对策[J].岩土力学,2007,28(10).
- [4] 黄汉芳.福建泉州沿海地区花岗岩残积土特性及边坡稳定性分析[J].中国西部科技,2008,7(33).
- [5] 阙云,姚晓琴,陈祖鑫,等.福建非饱和和花岗岩残积土强度特性的试验研究[J].公路,2012(6).
- [6] 吴迪,简文彬,徐超.残积土抗剪强度的环剪试验研究[J].岩土力学,2011,32(7).
- [7] 龙志东,王中文,史斌,等.花岗岩残积土抗剪强度及其影响因素试验[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2016,13(3).

- [8] 陈晓平,周秋娟,蔡晓英.高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性[J].岩土工程学报,2011,33(6).
- [9] 赵建军,王思敬,尚彦军,等.全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析[J].岩土力学,2005,26(4).
- [10] 文宝萍,胡艳青.颗粒级配非饱和粘性土基质吸力的影响规律[J].水文地质工程地质,2008,35(6).
- [11] 丁少林,左昌群,刘代国,等.非饱和残积土土一水特性研究及基质吸力估算[J].长江科学院院报,2016,33(3).
- [12] 邓喜,何忠明,付宏渊,等.降雨入渗对花岗岩残积土高路堤边坡稳定性的影响[J].矿冶工程,2016,36(4).
- [13] 王成皿,兰天,刘龙武.深层水毁防治技术在花岗岩残积土路基边坡中的应用研究[J].公路与汽运,2017(2).

收稿日期:2018-07-24