

水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能研究

郑甲佳^{1,2}, 张来君^{1,2}, 王曦辉^{1,2}, 解建伟^{3*}, 陈智勇⁴

(1.中国路桥工程有限责任公司,北京市 100011;2.中交集团东非区域研发中心,肯尼亚 内罗毕 999070;3.长沙理工大学
交通运输工程学院,湖南长沙 410114;4.深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司,广东深圳 518003)

摘要:为给不同粒径再生集料的精细化利用提供参考,该文研究了再生集料粒径、掺量对水泥稳定再生集料混合料抗冻性能的影响。对不同粒径再生集料的基本性能指标进行测试,并通过击实试验确定最佳含水率和最大干密度,以4%的水泥掺量制备试件,通过测试混合料经冻融循环后的无侧限抗压强度损失来评价混合料的抗冻性能。试验结果表明:随着再生集料粒径和掺量增大,混合料的最佳含水率增大,最大干密度减小;掺加4.75~9.5 mm再生集料时,经过5次冻融循环,混合料冻融循环后强度随着掺量增加先升高后降低,经过10次冻融循环,混合料冻融循环后强度随着掺量增加逐渐降低;掺加9.5~19 mm与19~26.5 mm的再生集料时,随着再生集料掺量、粒径以及冻融循环次数的增加,混合料的冻融循环后强度逐渐降低。再生集料水泥稳定混合料抗冻性能变化规律随再生集料掺量、粒径的变化而各有不同,综合来看,随着再生集料掺量、粒径以及冻融循环次数的增加,其混合料抗冻性能变差。

关键词:建筑固废;再生集料粒径;再生集料掺量;冻融循环次数;抗冻性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Anti-Freezing Performance of Cement-Stabilized Mixture for Recycled Aggregate from Solid Construction Waste

ZHENG Jiajia^{1,2}, ZHANG Laijun^{1,2}, WANG Xihui^{1,2}, XIE Jianwei^{3*}, CHEN Zhiyong⁴

(1.China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China; 2.East Africa R&D Center, China Communications Construction Company Ltd, Nairobi 999070, Kenya; 3. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 4.Shenzhen General Integrated Transportation and Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518003, China)

Abstract: This paper investigated the effects of particle size and content of recycled aggregate on the anti-freezing performance of cement-stabilized recycled aggregate mixture, so as to provide a reference for the fine utilization of recycled aggregate with different particle sizes. The basic performance indexes of recycled aggregates with different particle sizes were tested, and the optimum moisture content and maximum dry density were determined by compaction test. The specimens were prepared with 4% cement content, and the anti-freezing performance of the mixture was evaluated by testing the unconfined compressive strength loss of the mixture after the freeze-thaw cycle. The results show that the optimum moisture content increases, and the maximum dry density of the mixture decreases with the increasing particle size and content of recycled aggregate. When recycled aggregate of 4.75–9.5 mm is added, after five freeze-thaw cycles, the strength of the mixture first increases and then decreases with the increasing content of recycled aggregate. After ten freeze-thaw cycles, the strength of the mixture decreases with the increase in the content of recycled aggregate. When the recycled aggregate of 9.5–19 mm and 19–26.5 mm is added, with the increasing content and particle size of recycled aggregate, as well as the number of freeze-thaw cycles, the strength of the mixture deteriorates. The variation law

收稿日期:2023-03-28(修改稿)

基金项目:中国路桥工程有限责任公司科研项目(编号:P2200001)

作者简介:郑甲佳,男,博士,高级工程师.E-mail:zhengjj@crbc.com

*通信作者:解建伟,男,硕士研究生.E-mail:2480453386@qq.com

of the anti-freezing performance of cement-stabilized recycled aggregate mixture is different with the change in content and particle size of recycled aggregate. In general, with the increasing content and particle size of recycled aggregate, as well as the number of freeze-thaw cycles, the anti-freezing performance of the mixture is worse.

Keywords: solid construction waste; particle size of recycled aggregate; content of recycled aggregate; number of freeze-thaw cycles; anti-freezing performance

0 引言

随着中国城市化的快速发展,大量市政基础设施建设和改造工程导致建筑固废产量急剧增加。据统计,目前中国的建筑固废存储量已达200多亿吨,且仍以年均20亿~30亿吨的速度产生新的建筑固废^[1-2]。并且中国关于建筑固废处理缺乏权威性的指导文件,这些建筑固废绝大部分只经简单处理就填埋或露天堆放,造成了严重的环境污染和资源浪费问题^[3-6]。国家发改委发布的《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》中也提出要提高固废资源利用效率^[7]。公路建设中需要消耗大量的天然矿石资源,但目前国家出台的相关政策限制了开山采石,使得公路建设中存在集料短缺的情况^[8]。若能将建筑固废代替部分天然集料用于公路建设,不仅能缓解建筑固废带来的一系列环境问题,还能大量节约天然集料资源,降低公路建设的工程成本,是实现可持续发展的有力举措。

目前,再生集料的利用问题已经引发了国内外学者的广泛关注。将再生集料利用于水泥稳定基层中可以缓解目前天然集料短缺的状况,也有望处理大量的废弃建筑垃圾^[9-11]。国内外大量学者展开了再生集料水稳基层的相关研究^[12-15]。建筑固废再生集料水泥稳定混合料性能劣于天然集料混合料,主要是由于再生料中含有性质较差的碎砖块和砂浆等材料,这类材料会降低混合料的整体性能^[16-18]。Zedda等^[19]调查并测试了在道路垃圾填埋场处理的再生料的来源和质量,研究发现再生材料虽具有不同物理特性,但其力学性能与天然骨料相同,证实了建筑废弃物经处理后,可以替代天然骨料;胡力群等^[20]的研究结果表明废砖块对水稳混合料的力学性能有不同程度的不利影响;Xuan等^[21]的研究也表明在建筑固废再生集料中砖比例是影响再生集料混合料强度的关键因素之一。因此剔除建筑固废再生集料中的不利组分后再应用是一大研究热点。但目前

对于建筑固废各组分的分离技术并不成熟,因此对建筑固废进行分组利用难度较大,导致建筑固废整体利用率和利用等级都较低。建筑固废再生集料与天然集料按比例掺配利用是另一大研究热点。Arulrajah等^[22]从建筑固废中分拣出碎玻璃和旧混凝土,通过一定处理生成再生骨料,将两种材料按不同的比例掺配替代天然骨料,结果表明当建筑固废再生集料掺量合适时,混合料也能满足规范要求;曾梦澜等^[23]对建筑固废再生集料的基本性质进行了研究,并通过不同掺量再生集料替换天然集料,研究掺量变化对水泥稳定再生集料基层混合料的性能影响,综合各项性能提出再生集料的最佳掺量。再生集料与天然集料按比例掺配利用是目前对再生集料的主要利用方式,如何在保证混合料性能的前提下尽可能增加再生集料的掺量是提升再生集料利用率的关键。

国内外学者们对建筑固废再生集料分组分、按比例掺配利用开展了大量研究,为建筑固废再生集料的应用提供了重要参考,但并未完全解决建筑固废再生集料分粒径利用问题,再生集料的利用率仍有待进一步提高。基于此,本文旨在研究再生集料粒径、掺量对混合料抗冻性能的影响,以期对再生集料分粒径利用提供参考,从而进一步提高再生集料综合利用率。

本研究针对再生集料分粒径利用问题,首先对各粒径再生集料进行基本性能测试,并且与天然集料进行对比分析,指出再生集料的根本缺陷;再制备水泥稳定混合料试件测试各方案经不同冻融循环次数下的抗冻性能;最后,根据试验结果分析讨论再生集料粒径和掺量对水泥稳定再生集料混合料抗冻性能的影响规律。

1 材料与试验

1.1 原材料性能

(1) 水泥。海螺牌P·C42.5硅酸盐水泥,满足相关技术规范要求^[24-26]。

(2) 集料。试验采用的建筑固废再生集料来源于新旧建筑修建与拆迁。对再生集料进行分拣,发现主要成分为混凝土块和碎砖块,砖比例为10%左右。

选用等质量的4.75~9.5 mm、9.5~19 mm、19~26.5 mm 3档再生粗集料,同时选用对应3档粒径的天然集料作为试验对照组进行粗集料基本性能研究。

按相关技术规范中的试验方法和要求,对天然粗集料和再生粗集料的各项指标进行试验检测,结果见表1^[24,27]。

表1 粗集料性能检测结果

Table 1 Test results of coarse aggregate performance

集料类型	集料粒径/mm	表观密度/(g·cm ⁻³)	吸水率/%	压碎值/%	针片状含量/%
天然粗集料	4.75~9.5	2.77	0.75	20.1	9.4
	9.5~19	2.76	0.53	21.3	8.5
	19~26.5	2.79	0.44	21.6	6.6
再生粗集料	4.75~9.5	2.45	9.38	24.7	6.7
	9.5~19	2.46	8.67	26.7	7.4
	19~26.5	2.47	8.28	28.5	9.5

由表1可知:再生粗集料表观密度比天然粗集料降低了11%左右,吸水率为天然粗集料的12~19倍,同种集料类型下,集料粒径越小,其吸水率越大;再生粗集料压碎值比天然粗集料增大了22%~32%,相同集料类型下,集料的粒径越大其压碎值越大;针片状颗粒含量方面,再生粗集料和天然粗集料相差不多。造成上述性能差距的主要原因是再生粗集料中含有疏松多孔、吸水率高、强度低的水泥砂浆和砖。

参照相关技术规范中的标准试验方法,对天然细集料和再生细集料的各项指标进行试验检测,结果见表2^[24,27]。

表2 细集料性能检测结果

Table 2 Test results of fine aggregate performance

集料类型	表观密度/(g·cm ⁻³)	吸水率/%	含泥量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
天然细集料	2.65	4.78	0.8	20.4	15.2	5.2
再生细集料	2.30	13.27	15.4	32.4	25.5	6.9

由表2可知:再生细集料的表观密度相比天然细集料的表观密度降低了约13%;再生细集料的吸水率约为天然细集料吸水率的3倍;再生细集料与天然细集料的液塑限也有明显差异,再生细集料的塑性

指数明显大于天然细集料的;此外,再生细集料的含泥量远远高于天然细集料的。再生细集料中含有较多的渣土、水泥砂浆和砖渣等材料,这可能是导致再生细集料性能与天然细集料性能差异的原因。

1.2 试验设计

本试验采用《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)推荐的骨架密实型级配范围中值,如表3所示。并通过该规范中标准振动击实试验确定水泥稳定再生集料混合料的最佳含水率和最大干密度,分析在不同掺量下不同粒径再生集料对水泥稳定再生集料混合料的最佳含水率和最大干密度的影响^[28]。试验所得的最佳含水率和最大干密度作为后续抗冻试验成型试件的依据。试验方案设计如表4所示。

表3 骨架密实型级配

Table 3 Grading of compact skeleton type

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
上限	100.0	86.0	58.0	32.0	28.0	15.0	3.0
下限	100.0	68.0	38.0	22.0	16.0	8.0	0.0
中值	100.0	77.0	48.0	27.0	22.0	11.5	1.5

表4 试验方案设计

Table 4 Test scheme design

方案编号	各粒径再生料(mm)掺量/%		
	4.75~9.5	9.5~19	19~26.5
RA1	0	0	0
RA2	30	0	0
RA3	60	0	0
RA4	100	0	0
RB1	0	30	0
RB2	0	60	0
RB3	0	100	0
RC1	0	0	30
RC2	0	0	60
RC3	0	0	100

1.3 试件制备与养护

本文试验采用振动压实试验方法确定最佳含水率和最大干密度,试件制备参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中振动压实方法成型圆柱体试件,试件尺寸为150 mm×150 mm^[28]。采用规范中标准养护条件进行养护,养护温度(20±2)℃,相对湿度95%以上^[28]。

1.4 试验方法

参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)中的无机结合料稳定材料冻融试验方法,将成型完后的试件放置在标准养生室养护28 d,在到达养护龄期的前1天,将试件放置水箱浸泡24 h,水箱水面须高出试件50.0 mm,浸泡完毕后用干毛巾将试件表面水分擦干,使用游标卡尺测量试件高度,精确至0.1 mm。将试件放入高低温交变式温度箱中,将低温设置成 -18°C ,冻结时间设置为16 h,高温设置成 20°C ,时间设置为8 h。当完成1次冻融循环,将试件从温度箱中取出并测量试件的高度和质量,随后放入温度箱中进行第2次冻融循环,以此类推直至完成所有次数冻融循环,而后进行无侧限抗压强度测试。冻融循环试件及强度试验见图1、2。



图1 冻融循环中的试件

Figure 1 Specimen in freeze-thaw cycle



图2 冻融循环后强度试验

Figure 2 Strength test after freeze-thaw cycle

试验数据的相关计算按式(1)~(4)进行:

$$R_{DC} = \frac{P_1}{A} \quad (1)$$

$$R_C = \frac{P_2}{A} \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (3)$$

$$R_{BDR} = \frac{R_C - R_{DC}}{R_C} \times 100 \quad (4)$$

式中: R_{DC} 为经过冻融循环后试件的无侧限抗压强度(MPa); P_1 为经过冻融循环后的试件破坏时的最大压力(N); R_C 为未进行冻融循环试件的无侧限抗压强度(MPa); P_2 为未进行冻融循环试件破坏时的最大压力(N); A 为试件的截面面积(mm^2); D 为试件的直径(mm); R_{BDR} 为经过冻融循环后试件的抗压强度损失率(%)。

2 试验结果与讨论

2.1 击实特性

表5和图3、4为振动压实试验结果。

表5 振动压实试验结果

Table 5 Vibration compaction test results

集料粒径/ mm	试验 编号	集料掺配比/%		最佳含 水率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
		再生集料	天然集料		
无再生集料	RA1	0	100	5.09	2.365
4.75~9.5	RA2	30	70	5.36	2.311
4.75~9.5	RA3	60	40	6.82	2.235
4.75~9.5	RA4	100	0	7.66	2.177
9.5~19	RB1	30	70	5.54	2.289
9.5~19	RB2	60	40	7.22	2.219
9.5~19	RB3	100	0	8.16	2.117
19~26.5	RC1	30	70	5.58	2.287
19~26.5	RC2	60	40	7.87	2.188
19~26.5	RC3	100	0	8.58	2.076

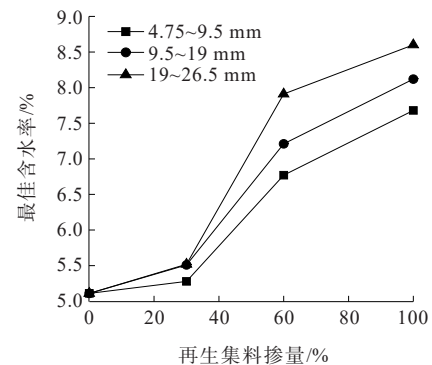


图3 最佳含水率变化趋势

Figure 3 Variation trend of optimum moisture content

由表5及图3、4可知:

(1) 随着再生集料掺量的增加,混合料的最佳含水率逐渐增加,最大干密度逐。以掺加4.75~9.5 mm再生集料为例,再生集料掺量从0增加至100%,最佳含水率依次增加5.3%、27.2%、12.3%,

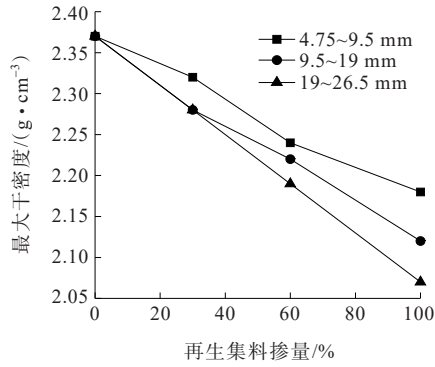


图4 最大干密度变化趋势

Figure 4 Variation trend of maximum dry density

最大干密度依次减小2.3%、3.3%、2.6%，再生集料增加至100%时，最佳含水率相比天然集料增加了50.5%，最大干密度减小了7.9%。这可能是因为再生集料中碎砖、旧砂浆等孔隙裂缝较多，压碎值较高，吸水率较高，当再生集料掺量增加时，这类物质增加，导致混合料的最佳含水率逐渐增加，最大干密度逐渐减小^[29]。

(2) 固定再生集料掺量，随着再生集料粒径的增大，混合料的最佳含水率逐渐增加，最大干密度逐渐减小。以100%掺量再生集料为例，当分别掺加3档粒径再生集料时，按粒径从小到大，最佳含水率分别为7.66%、8.16%、8.58%，最大干密度分别为2.177 g/cm³、2.117 g/cm³、2.076 g/cm³。分析原因可能是再生集料粒径越大，其成型破碎率越高，混合料内部孔隙数量越多，其最佳含水率越高，最大干密度越低^[30]。

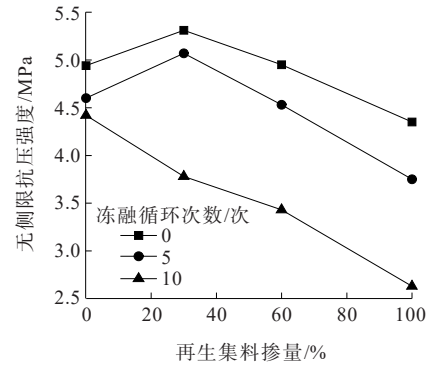
2.2 抗冻性能

表6和图5、6为抗冻试验结果。

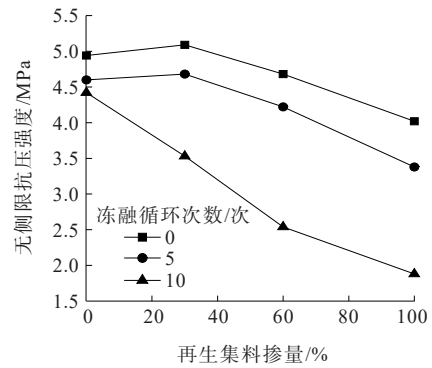
表6 抗冻试验结果

Table 6 Anti-freezing test results

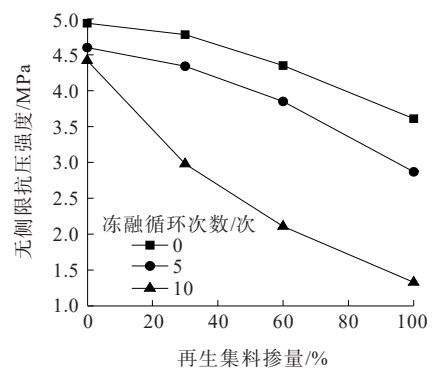
集料粒径/mm	试验序号	集料掺配比/%		冻融循环后强度/MPa			R _{BDR} /%	
		再生集料	天然集料	0次	5次	10次	5次	10次
无再生集料	RA1	0	100	4.94	4.60	4.42	6.9	10.5
4.75~9.5	RA2	30	70	5.31	5.07	3.78	4.5	28.8
4.75~9.5	RA3	60	40	4.95	4.53	3.43	8.5	30.7
4.75~9.5	RA4	100	0	4.35	3.75	2.63	13.8	39.5
9.5~19	RB1	30	70	5.09	4.68	3.53	8.1	30.6
9.5~19	RB2	60	40	4.68	4.22	2.54	9.8	45.7
9.5~19	RB3	100	0	4.02	3.38	1.88	15.9	53.2
19~26.5	RC1	30	70	4.78	4.34	2.98	9.2	37.7
19~26.5	RC2	60	40	4.35	3.85	2.11	11.5	51.5
19~26.5	RC3	100	0	3.61	2.87	1.33	20.5	63.2



(a) 4.75~9.5 mm 再生集料



(b) 9.5~19 mm 再生集料



(c) 19~26.5 mm 再生集料

图5 无侧限抗压强度试验结果

Figure 5 Test results of unconfined compressive strength

由表6及图5、6可知：

(1) 当分别掺加4.75~9.5 mm和9.5~19 mm档粒径的再生集料时，水泥稳定再生集料混合料经过0次、5次冻融循环后，无侧限抗压强度随掺量增加先提高后降低，当冻融循环次数增加至10次时，无侧限抗压强度随掺量一直降低；掺加19~26.5 mm粒径再生集料时，经过0次、5次、10次冻融循环，无侧限抗压强度均一直降低。这可能是粒径较小的再生集料中未水化的水泥颗粒等活性成分相对较多，掺量较

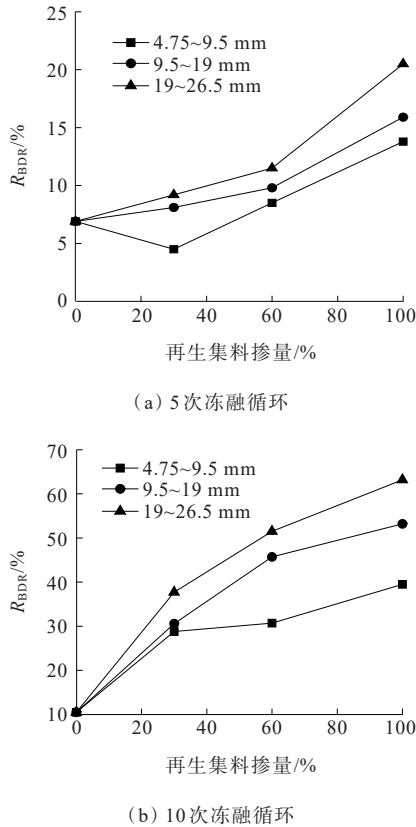


图6 抗压强度损失率试验结果

Figure 6 Test results of compressive strength loss rate

低时,这种活性成分与水泥凝结效果更好,抗冻性能有所提高,掺量继续增加,再生集料本身的缺陷占据主导作用,抗冻性能开始下降。粒径较大的再生集料中活性成分较少,从一开始,其本身的质量缺陷占据主导作用,抗冻性能随掺量增加而降低。

(2) 以掺加30%的4.75~9.5 mm档粒径再生集料为例,冻融次数从0次增加至10次,无侧限抗压强度依次下降了4.5%、28.8%,随着冻融循环次数增加,强度急剧下降。这可能使冻融循环次数增加对混合料内部损伤破坏加剧,使无侧限抗压强度降低趋势加剧。

(3) 经过5次冻融循环,掺加4.75~9.5 mm档粒径时,强度损失随掺量先减小后增大,在30%掺量附近强度损伤最小,说明5次冻融循环后,相比冻融前,30%掺量以下的4.75~9.5 mm粒径再生集料混合料强度有所增长。这可能是短期冻融对小粒径再生集料中未水化的水泥颗粒等活性成分有一定活化作用,提高了其活化性能。

(4) 以9.5~19 mm再生集料5次冻融循环为例,

再生集料掺量从0到100%,强度损失依次为6.9%、8.1%、9.8%、15.9%,除5次冻融循环后的4.75~9.5 mm再生集料,随着再生集料掺量增加,混合料强度损失逐渐增大,抗冻性变差。这可能是随着再生集料掺量增加,再生集料中孔隙率和吸水率较大的中砂浆、碎砖等增多,在冻融循环后,混合料内部冻胀作用加剧对其内部造成损伤,降低了其性能,抗冻性变差。

(5) 以100%掺量再生集料10次冻融循环为例,分别掺加3档粒径再生集料时,按集料粒径从小到大的强度损失依次为39.5%、53.2%、63.2%,说明在同一掺量和同一冻融循环次数下,再生集料粒径越大,其混合料抗冻性越差。这可能是再生集料粒径越大,其在成型中破碎率越高,混合料内部孔隙数量大大增加,冻融循环作用下,冻胀作用越明显,对混合料内部损伤破坏作用越大,混合料抗冻性越差。

(6) 分别掺加3档粒径再生集料时,5次冻融循环和10次冻融循环强度损失相差明显,以100%掺量4.75~9.5 mm档粒径再生集料为例,5次和10次冻融循环强度损失依次为13.8%和39.5%。这可能是冻融次数增加,加剧了混合料内部孔隙的冻胀作用,破坏了其内部结构,使其抗冻性能降低。

3 结论与展望

3.1 结论

本文通过击实试验得到再生集料粒径和掺量对混合料的最佳含水率和最大干密度的影响规律,并研究了水泥稳定再生集料混合料的抗冻性能,对水泥稳定碎石基层冻融损伤机理以及影响因素进行了分析。通过设计室内冻融循环试验,研究再生集料掺量、粒径、冻融循环次数等因素对水泥稳定基层抗冻性能的影响,得出以下结论:

(1) 集料基本性能测试结果表明,再生集料相比于天然集料的根本缺陷在于:再生集料的表观密度远低于天然集料的;再生集料的吸水率和压碎值远大于天然集料的;再生细集料的含泥量远高于天然集料的;再生细集料的塑性指数明显大于天然细集料的。

(2) 击实试验结果表明,随着再生集料掺量的增加,水泥稳定再生集料混合料的最佳含水率逐渐增

加,最大干密度逐渐减小;随着再生集料粒径的增加,水泥稳定再生集料混合料的最佳含水率逐渐增加,最大干密度逐渐减小。

(3) 冻融循环后水泥稳定再生集料混合料抗压强度整体上有明显下降,说明冻融循环作用会破坏混合料内部孔隙结构,降低其性能。掺加 4.75~9.5 mm 再生集料时,经过 5 次冻融循环,强度损失随着掺量增加呈先减小后增大的趋势,经过 10 次冻融循环,混合料抗冻性能随着掺量增加而一直降低;掺加 9.5~19 mm 与 19~26.5 mm 的再生集料时,随着再生集料掺量、粒径以及冻融循环次数的增加,混合料的抗冻性能逐渐降低。

(4) 造成水泥稳定再生集料混合料抗冻性能变化的原因如下:再生集料粒径越大,比表面积越小,与水泥凝结越差;并且粒径越大在成型时破碎率越高,混合料内部孔隙数量增加,冻胀破坏作用越明显,抗冻性能越差。随着再生集料掺量增加,再生集料中孔隙率和吸水率较大的中砂浆、碎砖等增多,在冻融循环后,混合料内部冻胀作用加剧,对其内部造成损伤,导致抗冻性能变差。

3.2 展望

本文通过一系列室内试验,研究了建筑固废再生集料在水泥稳定碎石基层中的应用,也研究了再生集料掺量、粒径对水泥稳定再生集料混合料抗冻性能的影响,得出了一定的结论与成果,但限于研究条件和研究时限,还有一些内容须进行更深入的研究:

(1) 本文涉及的试验均为宏观试验,对于再生集料不同粒径对混合料性能的影响,可以从微观角度进行研究,揭示不同粒径再生集料微观形貌、砂浆和碎砖分布等集料内在规律,利用微观手段分析不同粒径再生集料与水泥之间的黏结情况,进一步揭示不同粒径下的混合料性能变化机理。

(2) 本文对水泥稳定再生集料混合料基层的抗冻性能进行了研究,水泥稳定再生集料混合料的抗冲刷性能、疲劳性能以及收缩性能等路用性能对再生集料在基层中的应用影响重大。水泥稳定再生集料混合料的抗冲刷性能、疲劳性能以及收缩性能等路用性能受再生集料粒径和掺量的影响还有待进一步研究。

(3) 再生集料混合料在成型过程中的颗粒破碎情况以及对级配的破坏情况会影响混合料的各种抗冻性能。关于不同粒径再生集料在成型过程中的颗粒破碎情况和对级配的破坏情况,以及对抗冻性能的影响还有待具体研究和分析。

参考文献:

References:

- [1] ZHANG J H, GU F, ZHANG Y Q. Use of building-related construction and demolition wastes in highway embankment: Laboratory and field evaluations[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 1051-1060.
- [2] ZHANG J H, ZHANG A S, HUANG C, et al. Characterising the resilient behaviour of pavement subgrade with construction and demolition waste under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 300: 126702.
- [3] 张军辉, 丁乐, 张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 135-154.
ZHANG Junhui, DING Le, ZHANG Anshun. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste in subgrade engineering: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 135-154.
- [4] 曾晖. 建筑垃圾处理方式对生态影响的定量评价[J]. 建筑经济, 2014, 35(7): 90-93.
ZENG Hui. Quantitative assessment of ecological impacts of processing methods for construction waste[J]. Construction Economy, 2014, 35(7): 90-93.
- [5] 肖杰, 吴超凡, 湛哲宏, 等. 水泥稳定砖与混凝土再生集料基层的性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 25-32.
XIAO Jie, WU Chaofan, ZHAN Zhehong, et al. Research on performances of cement stabilized brick and concrete recycled aggregate base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 25-32.
- [6] 杜西江, 徐良, 胡靖. 抗车辙剂对含再生粗集料沥青混合料性能影响研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 274-279.
DU Xijiang, XU Liang, HU Jing. Study on influence of anti-rutting additive on road performance of asphalt mixture containing recycled aggregate[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3): 274-279.
- [7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(2): 286.

- National Development and Reform Commission. Guiding opinions on comprehensive utilization of bulk solid wastes in "the 14th five-year" plan[J]. *Gold Science and Technology*, 2021, 29(2): 286.
- [8] 自然资源部办公厅. 生态环境部办公厅关于加快推进露天矿山综合整治工作实施意见的函[EB/OL]. (2019-05-29) [2023-01-05]. http://gi.mnr.gov.cn/2019061t20190606_2440195.html.
General Office of the Ministry of Natural Resources. The implementation opinion letter of accelerating and promoting comprehensive renovation work of the open-pit mine-ministry of ecological environment and ministry of natural resources[EB/OL]. (2019-05-29) [2023-01-05]. http://gi.mnr.gov.cn/2019061t20190606_2440195.html.
- [9] 陈福东. 城市道路路基填筑中建筑垃圾的处理[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2008, 25(9): 44-46.
CHEN Fudong. Treatment of construction waste for filling subgrade of urban road[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2008, 25(9): 44-46.
- [10] 张大宁, 张铁志, 俞清荣. 建筑垃圾在道路基层中的应用研究[J]. *路基工程*, 2010(4): 55-57.
ZHANG Daning, ZHANG Tiezhi, YU Qingrong. Study on application of building rubble in road base[J]. *Subgrade Engineering*, 2010(4): 55-57.
- [11] 盛三湘, 李城. 再生集料用于水泥稳定碎石基层中的抗疲劳性能研究[J]. *中外公路*, 2021, 41(4): 350-356.
SHENG Sanxiang, LI Cheng. Study on fatigue performance of recycled aggregate in cement stabilized macadam bases[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021, 41(4): 350-356.
- [12] BEHIRY Ahmed, EBRAHIM ABU El-Maaty. Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2013, 4(4): 661-673.
- [13] PÉREZ P, AGRELA F, HERRADOR R, et al. Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 44: 593-599.
- [14] 杨俊, 黎新春, 陈峻松, 等. 废旧混凝土用作水泥稳定基层的实验研究[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(5): 2097-2103.
YANG Jun, LI Xinchun, CHEN Junsong, et al. Experimental study on waste concrete used as cement stabilized base[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(5): 2097-2103.
- [15] 黎小华, 肖杰, 吴超凡, 等. 建筑固体废物再生粒料基层混合料的永久变形特性研究[J]. *中外公路*, 2022, 42(1): 221-225.
LI Xiaohua, XIAO Jie, WU Chaofan, et al. Study on permanent deformation characteristics of construction and demolition waste recycled aggregate base mixture[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42(1): 221-225.
- [16] DING L, ZHANG J H, FENG B W, et al. Performance evaluation of recycled asphalt mixtures containing construction and demolition waste applied as pavement base[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8875402.
- [17] LI Z, LIU L L, YAN S H, et al. Properties of microscopic particle morphology and particle contact of renewable construction waste mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 207: 190-205.
- [18] MELBOUCI B. Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(8): 2723-2730.
- [19] ZEDDA V, TROIS C, EVERITT P. Management of construction and demolition waste and its use for road construction in a South African municipality[J]. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 2014, 40(4): 375-388.
- [20] 胡力群, 沙爱民. 水泥稳定废粘土砖再生集料基层材料性能试验[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(3): 73-79, 86.
HU Liqun, SHA Aimin. Performance test of cement stabilized crushed clay brick for road base material[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(3): 73-79, 86.
- [21] XUAN D X, MOLENAAR A A A, HOUBEN L J M. Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 100: 77-83.
- [22] ARULRAJAH A, DISFANI M M, HAGHIGHI H, et al. Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 84: 146-155.
- [23] 曾梦澜, 田振, 肖杰, 等. 含建筑垃圾水稳碎石路面基层材料的使用性能[J]. *武汉理工大学学报*, 2016, 38(1): 34-38.
ZENG Menglan, TIAN Zhen, XIAO Jie, et al. Performance of cement stabilized crushed stone pavement base materials containing construction waste[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, 38(1): 34-38.
- [24] 交通运输部公路科学研究院. 公路路面基层施工技术细

- 则:JTG/TF 20—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/TF 20—2015[S]. Beijing: China communication press, 2015.
- [25] 中国建筑材料科学研究总院.通用硅酸盐水泥:GB175—2023[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2007.
China Building Materials Academy. Common portland cement: GB175—2023[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China,2023.
- [26] 交通运输部公路科学研究院.公路工程水泥及水泥混凝土试验规程:JTG 3420—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Testing methods of cement and concrete for highway engineering: JTG 3420—2020[S]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd.,2020.
- [27] 交通运输部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of aggregate for highway engineering:JTG E42—2005[S].Beijing:China Communication Press,2005.
- [28] 交通运输部公路科学研究所.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S].北京:人民交通出版社,1994.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009[S]. Beijing: China Communication Press,2009.
- [29] 侯月琴,纪小平,刘陵庆.水泥稳定再生集料的力学特性及影响因素研究[J].公路交通科技,2016,33(12):56-61.
HOU Yueqin,JI Xiaoping,LIU Lingqing.Study on mechanical property and influencing factors of cement stabilized recycled aggregate[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2016,33(12):56-61.
- [30] 栗威,韦慧,王兆仑,等.城市建筑废弃物再生水泥稳定混合料路用性能[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(4):52-61.
LI Wei, WEI Hui, WANG Zhaolun, et al. Pavement performance of a regenerated cement stabilized mixture on construction waste[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2019,39(4):52-61.
-
- (上接第94页)
- [68] SOUST-VERDAGUER B, LLATAS C, GARCÍA-MARTÍNEZ A. Critical review of bim-based LCA method to buildings[J]. Energy and Buildings, 2017, 136: 110-120.
- [69] SANTOS R, AGUIAR COSTA A, SILVESTRE J D, et al. Development of a BIM-based environmental and economic life cycle assessment tool[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 265: 121705.
- [70] JALILZAD E, VADIEE A, JOHANSSON P. Achieving a trade-off construction solution using BIM, an optimization algorithm, and a multi-criteria decision-making method[J]. Buildings, 2019, 9(4): 81.
- [71] LU K, JIANG X Y, YU J Y, et al. Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 285: 125438.
- [72] WASTIELS L, DECUYPERE R. Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 323(1): 012101.
- [73] SAFARI K, AZARIJAFARI H. Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 67: 102728.
- [74] SANDBERG M, MUKKAVAARA J, SHADRAM F, et al. Multidisciplinary optimization of life-cycle energy and cost using a BIM-based master model[J]. Sustainability, 2019, 11(1): 286.
- [75] SANTOS R, COSTA A A, SILVESTRE J D, et al. BIM-based life cycle assessment and life cycle costing of an office building in Western Europe[J]. Building and Environment, 2020, 169: 106568.
- [76] SOBHKHIZ S, TAGHADDOS H, REZVANI M, et al. Utilization of semantic web technologies to improve BIM-LCA applications[J]. Automation in Construction, 2021, 130: 103842.
- [77] XU J Y, TENG Y, PAN W, et al. BIM-integrated LCA to automate embodied carbon assessment of prefabricated buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 374: 133894.