

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220817002

文章编号: 1672-9331(2023)05-0094-11

引用格式: 解建伟, 陈智勇, 张军辉. 水泥稳定建筑固废再生集料力学性能研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 94-104.

Citation: XIE Jianwei, CHEN Zhiyong, ZHANG Junhui. Study on the mechanical properties of cement-stabilized mixture for recycled aggregate from construction and demolition waste [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 94-104.

水泥稳定建筑固废再生集料力学性能研究

解建伟¹, 陈智勇², 张军辉¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 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:【目的】研究建筑固废再生集料粒径、掺量对水泥稳定再生集料力学性能的影响, 为不同粒径再生集料的精细化利用提供参考。【方法】将再生集料按粒径划分为三档: [4.75, 9.5) mm、[9.5, 19) mm、[19, 26.5) mm, 以不同掺量掺加到混合料中, 制备水泥稳定再生集料试件, 并测试试件的击实特性、无侧限抗压强度、劈裂强度以及抗压回弹模量。【结果】随着再生集料粒径和掺量的增大, 水泥稳定再生集料的最佳含水率增大, 最大干密度减小; 掺加[4.75, 9.5) mm粒径的再生集料时, 混合料各力学性能指标均随其掺量增加先增后减; 掺加[9.5, 19) mm粒径的再生集料时, 混合料的无侧限抗压强度和抗压回弹模量随其掺量增加先增后减, 而劈裂强度随其掺量增加持续减小; 掺加[19, 26.5) mm粒径的再生集料时, 混合料各力学性能指标均随其掺量增加而减小。【结论】水泥稳定再生集料各力学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, 再生集料的掺量和粒径越大, 其混合料力学性能越差。

关键词: 建筑固废; 水泥稳定再生集料; 再生集料粒径; 再生集料掺量; 力学性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

0 引言

我国城镇化和基础建设的快速发展给环境带来了许多负面影响。据统计, 我国每年产生的建筑固废高达18亿t之多^[1], 并且还在不断增长。这些建筑固废占城市垃圾总量的比例高达30%~40%^[2-3]。另外, 由于我国在建筑固废的处理方面还缺乏权威的指导性文件, 相关政策及法律法规还不完善, 这些建筑固废绝大部分只是经简单处理后或就地填埋或露天堆放, 长此以往, 造成的环境危害逐渐凸显^[4-6]。公路建设需要消耗大量的天然矿石资源, 若能将建筑固废经过一定处理后代替部分天然矿石用在公路建设中, 不仅能解决建筑固废带来的一系列环境问题, 还能大量节约天然矿石资源, 降低工程成本^[7]。

目前, 建筑固废再生集料的利用问题已经引

发了国内外学者的广泛关注。水泥稳定类材料具有较高的强度、抗疲劳性能和承载能力^[8-10]。将建筑固废再生集料用于水泥稳定基层中可以缓解目前天然集料短缺的状况, 也有望处理好大量的废弃建筑垃圾^[11-12]。国内外大量学者对建筑固废再生集料水泥稳定类材料应用于道路基层或底基层展开了研究^[13-15]。用建筑垃圾再生集料制备的水泥稳定混合料性能劣于用天然集料制备的混合料性能, 这主要是由于该再生料中含有碎砖和砂浆等材料, 此类材料的自身性能较差, 导致混合料的整体性能降低。胡力群等^[16]开展了废砖块对水泥稳定碎石性能的影响研究, 研究结果显示, 废砖块对水泥稳定混合料的各力学性能指标均有不同程度的不利影响。XUAN等^[17]的研究也表明砖含量是影响混合料强度的关键因素。因此, 剔除建筑垃圾中的不利组分后对建筑垃圾进行应用是一个思路。但目前对于建筑固废再生集料各组分的分

收稿日期: 2022-08-17; 修回日期: 2022-08-27; 接受日期: 2022-08-27

基金项目: 长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJ CX202116); 国家杰出青年科学基金资助项目(52025085)

通信作者: 张军辉(1978—)(ORCID: 0000-0002-0745-1213), 男, 教授, 主要从事路基方面的研究。

E-mail: zjhseu@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

离技术并不成熟,因此对再生集料进行分组利用的难度较大,导致再生集料整体利用率和利用等级都较低。对再生集料利用的另一个思路是与天然集料按一定比例掺配利用,使混合料达到基层材料的性能要求^[6,18-20]。这是目前对再生集料主流的利用手段。另外,再生集料常面临某一档粒径的再生集料过多而某一档粒径缺乏的问题,这一问题也限制了再生集料的利用效率。

以往学者对再生集料的组分、再生集料掺配比例等因素展开了许多富有成效的研究,为再生集料在道路基层中的应用提供了一定的参考,但是并未完全解决再生集料分粒径利用的问题。基于此,本文旨在研究再生集料不同粒径及不同掺量对混合料各项性能的影响,探讨建筑固废再生集料分粒径应用的可能性,以期对再生集料的分粒径精细化利用提供参考,进一步提高再生集料的综合利用率。

针对建筑固废再生集料分粒径精细化利用问题,本研究首先对各档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,掌握再生集料的根本缺陷所在;而后进行击实试验探究水泥稳定再生集料的击实特性,并以此为依据制备混合料试件并对其进行各力学性能指标测试;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各力学性能的影响规律。

1 材料与试验

1.1 原材料性能

试验所用水泥为海螺牌PC42.5硅酸盐水泥,

按《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)与《通用硅酸盐水泥》(GB175—2020)中的标准控制道路用水泥质量,并结合《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)中的试验方法,对水泥的各项指标进行检测,检测结果见表1。

表1 水泥质量指标检测结果

Table 1 Test results of cement quality indicators

检测指标		检测值	标准值
凝结时间/ min	初凝时间	203	≥180
	终凝时间	493	≥360
安定性/mm		1.4	≤5
不同养护龄期 抗折强度/MPa	3 d	3.2	≥2.5
	28 d	6.5	≥5.5
不同养护龄期 抗压强度/MPa	3 d	13.5	≥10.0
	28 d	36.4	≥32.5

试验用天然集料采用石灰岩;再生集料来源于湖南省某再生料厂,主要为新建筑修建与旧建筑拆迁产生的建筑固废。进行原材料试验前,通过人工分拣对再生集料的主要组分进行分类,发现此再生集料主要成分为混凝土块和碎砖块,砖含量在10%左右。分拣后进行洗料和晒料工作,以进一步提高再生集料的纯净度。

为研究粗集料的性能,选用[4.75, 9.5) mm、[9.5, 19) mm、[19, 26.5) mm三档粒径的再生粗集料,同时选用等质量的对应三档粒径的天然石灰岩集料作为试验对照组。按《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)对道路用粗集料的技术要求,并结合《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中的试验方法,对天然粗集料和再生粗集料的各项指标进行试验检测,检测结果见表2。

表2 粗集料性能检测结果

Table 2 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/%	针片状颗粒质量分数/%
天然粗集料	[4.75, 9.5)	2.76	0.76	20.2	9.5
	[9.5, 19)	2.74	0.55	21.2	8.4
	[19, 26.5)	2.77	0.46	21.5	6.5
再生粗集料	[4.75, 9.5)	2.46	9.40	24.6	6.5
	[9.5, 19)	2.48	8.60	26.5	7.2
	[19, 26.5)	2.49	8.20	28.2	9.6

由表2可知,再生粗集料和天然粗集料在表观密度、吸水率、压碎值和针片状颗粒含量等基本物理力学性能指标方面有明显差异^[21]。具体分析如下:再生粗集料的表观密度明显比天然粗集料的

小;再生粗集料的吸水率远远比天然粗集料的大,约为天然粗集料的10倍以上;再生粗集料的压碎值比天然粗集料的增大了约22%~31%;再生粗集料的针片状颗粒含量和天然粗集料的相差不

多,造成上述性能差异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《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)对道路用细集料的技术要求,并结合《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)中的相关标准试验方法,对天然细集料和再生细集料的各项指标进行试验检测,检测结果见表3。

表3 细集料性能检测结果

Table 3 Test results of fine aggregate performance

集料类型	表观密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	吸水 率/%	含泥 量/%	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数
天然细集料	2.63	4.8	0.7	20.5	15.4	5.1
再生细集料	2.31	13.2	15.2	32.2	25.6	6.6

由表3可知,再生细集料的各项性能指标与天然细集料的差距较大。具体分析如下:再生细集料的表观密度比天然细集料的小了约12%;再生细集料的吸水率约是天然细集料的3倍;再生细集料的液塑限与天然细集料的也存在明显差异,再生细集料的塑性指数明显比天然细集料的大;再生细集料的含泥量高达15.2%,远远比天然细集料的高。再生细集料中含有相当多的渣土、木屑、塑料等杂质,也有相当数量的水泥砂浆和砖渣,这些成分的存在,可能是导致上述再生细集料与天然细集料性能相差较大的原因^[22]。

1.2 试验设计

大量相关研究表明,与天然集料相比,再生集料的原始强度是影响混合料各力学性能的主要因素,级配力学性能影响较小^[23-25],因此混合料的级配采用规范推荐级配即可。本试验采用《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中推荐的骨架密实型级配范围的中值(C-B-3)。

在将某一档粒径的集料替换为再生集料时,其余档粒径的集料全部采用天然集料。试验中试件分为三种方案:方案一仅替换[4.75, 9.5) mm粒径的集料为再生集料;方案二仅替换[9.5, 19) mm粒径的集料为再生集料;方案三仅替换[19, 26.5) mm粒径的集料为再生集料。研究分别掺加[4.75, 9.5) mm、[9.5, 19) mm、[19, 26.5) mm粒径再生集料的水泥稳定混合料在再生集料掺量分别为30%、60%、100%条件下混合料的性能变化规律。试件中水泥剂量为4%。

1.3 试件制备与测试

考虑到再生集料的强度比天然集料的低,采

用重型击实法对试验结果的影响会较大,故本试验采用振动压实试验方法来确定混合料的最佳含水率和最大干密度,后续制备的试件均采用振动压实成型。具体操作参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中的振动压实方法,试件为圆柱体,尺寸为150 mm(直径)×150 mm(高)。按照该规范中的要求,在养护温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为95%以上的条件下对试件进行养护。

2 试验结果与讨论

本文参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中的相关标准试验方法,对水泥稳定再生集料试件进行击实特性、无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量等测试。以下将对各个测试结果分别进行分析讨论。

2.1 击实特性

振动压实试验结果如图1~2所示。图1展示了再生集料粒径和掺量对水泥稳定混合料最佳含水率的影响;图2展示了再生集料粒径和掺量对水泥稳定混合料和最大干密度的影响。分析图1和图2可以得到以下结论:

1) 随着再生集料掺量的增加,混合料最佳含水率增大,最大干密度减小,这与我们目前对再生集料的认知是一致的^[26-28]。原因可能是由于再生集料中碎砖、旧砂浆等的孔隙裂缝较多、密度小、吸水率较高导致的。

2) 当再生集料掺量不变时,再生集料粒径的增大会使混合料的最佳含水率增大,最大干密度减小。原因可能是再生集料粒径越大,其在混合

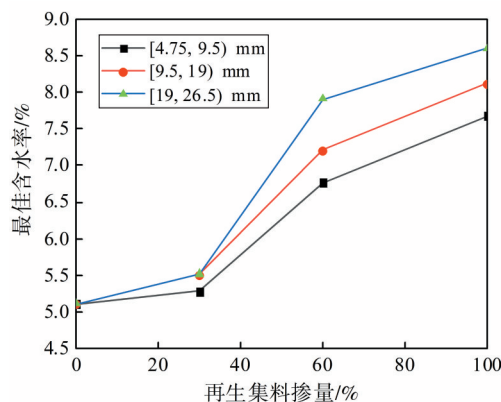


图1 最佳含水率变化趋势

Fig. 1 Variation trend of optimum moisture content

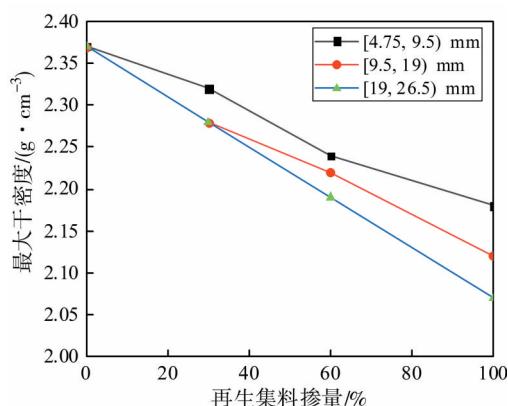


图2 最大干密度变化趋势

Fig. 2 Variation trend of maximum dry density

料成型过程中的破碎率越高,混合料内部孔隙数量越多,从而导致混合料的最佳含水率越大,最大干密度越小。

击实试验揭示了混合料随着再生集料粒径及掺量的增大,其最佳含水率增大,最大干密度减小。试验结果为后续试件的制备及性能测试提供了一定的数据支撑。

2.2 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度试验结果如图3~5所示,图3、图4、图5分别展示了再生集料掺量和粒径对混合料7、28、90 d无侧限抗压强度的影响。分析图3~5可以得到以下结论:

1) 无侧限抗压强度随着再生集料掺量的增加而减小,已有研究也得到了相同的结果^[28]。混合料无侧限抗压强度在各粒径再生集料掺量达到100%时达到最低值,此时,分别掺入粒径为[4.75, 9.5) mm、[9.5, 19) mm、[19, 26.5) mm的再生集料的混合料的7 d无侧限抗压强度比天然集料混合料的降低了9.0%、14.8%、21.1%。这表明加入再生集料的粒径越大,混合料无侧限抗压强度的下降幅度随再生集料掺量的增加越大。

2) 在相同掺量和相同养护龄期下,替换的再生集料粒径越小,混合料的无侧限抗压强度越高。主要原因如下:混合料强度主要由较大粒径的集料提供,当较大粒径的集料被替换成强度较低的再生集料时,混合料的强度下降幅度越大;另外,再生集料粒径越大,其在混合料成型过程中发生破碎的几率越高,导致混合料强度越低;再生集料的粒径越小,比表面积越大,与水泥凝结效果越好,故混合料强度越高。

3) 对于分别掺加[4.75, 9.5) mm和[9.5, 19)

mm粒径再生集料的混合料,在再生集料为低掺量时,混合料无侧限抗压强度有上升趋势。这可能是因为再生集料掺量较低时,未水化的水泥颗粒发生水化提高了混合料强度,但随着其掺量的增加,水泥水化对强度的促进作用小于集料本身的缺陷,故混合料强度随之开始下降。

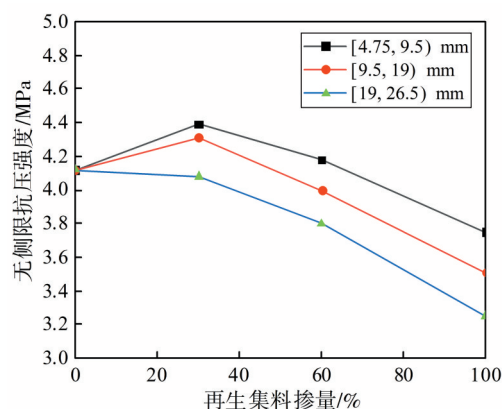


图3 7 d无侧限抗压强度

Fig. 3 7 d unconfined compressive strength

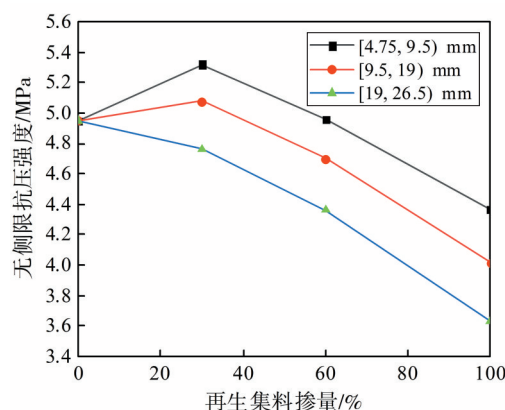


图4 28 d无侧限抗压强度

Fig. 4 28 d unconfined compressive strength

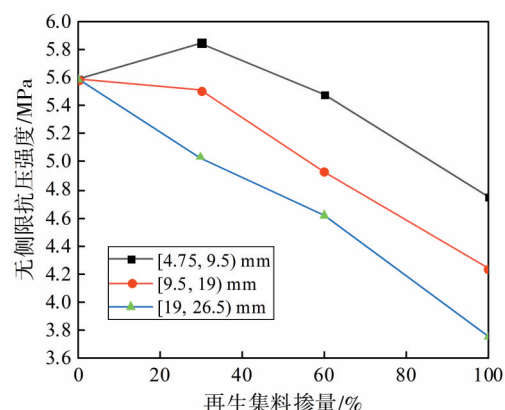


图5 90 d无侧限抗压强度

Fig. 5 90 d unconfined compressive strength

图6、图7、图8、图9分别展示了在再生集料掺量为0%、30%、60%、100%条件下,混合料无侧限抗压强度与养护龄期和再生集料粒径的关系。分析图6~9得到以下结论:

1) 掺入不同粒径和不同掺量的再生集料的水泥稳定混合料,其7 d到28 d的无侧限抗压强度发展较快,28 d后无侧限抗压强度发展速度趋于平缓。这主要是因为早期水泥含量较多,强度发展较快,随着水泥水化反应的进行水泥含量降低,强度发展趋于缓慢。

2) 以掺加30%再生集料的混合料为例,随着再生集料粒径的增大,混合料无侧限抗压强度发展趋势逐渐变缓。分别掺入[4.75, 9.5) mm、[9.5, 19) mm、[19, 26.5) mm粒径再生集料的混合料的90 d无侧限抗压强度比7 d的分别提高34.2%、27.6%、24.6%,这可能是因为再生集料粒径越大,其破碎率越大,导致混合料强度发展速度变慢。

3) 以掺加[9.5, 19) mm粒径再生集料的混合料为例,在再生集料掺量分别为0%、30%、60%、100%条件下,混合料28 d无侧限抗压强度比7 d的分别增长了20.1%、18.8%、16.7%、14.5%。由此可见,随着再生集料的增加,混合料无侧限抗压强度的增长速度减小,原因可能是由于混合料中的砂浆和砖块成分的增加在一定程度上降低了混合料的强度,也降低了其强度的发展速度。

本节探究了再生集料粒径、掺量以及养护龄期对水泥稳定再生集料无侧限抗压强度的影响规律。在再生集料低掺量小粒径的情况下,混合料无侧限抗压强度有上升趋势,但随着再生集料粒径和掺量的增大,混合料无侧限抗压强度整体呈下降趋势。

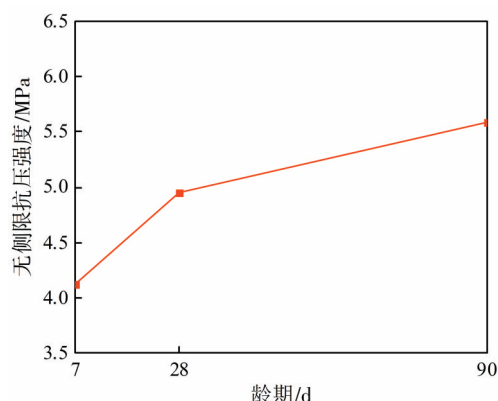


图6 0%再生集料

Fig. 6 0% recycled aggregate

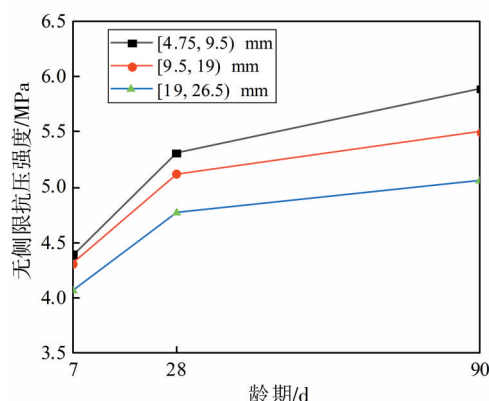


图7 30%再生集料

Fig. 7 30% recycled aggregate

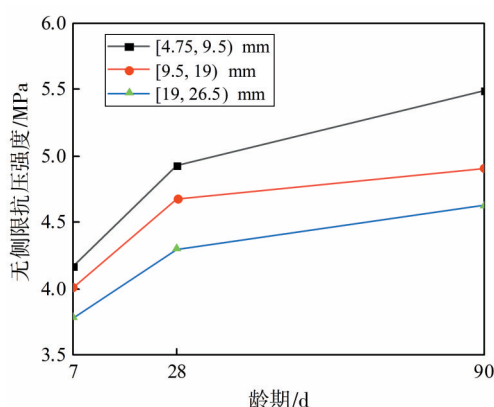


图8 60%再生集料

Fig. 8 60% recycled aggregate

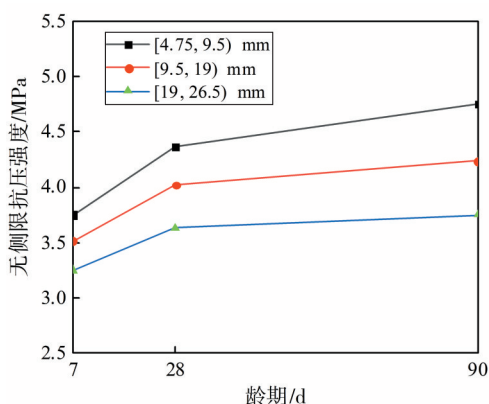


图9 100%再生集料

Fig. 9 100% recycled aggregate

2.3 劈裂强度

劈裂强度试验结果如图10~12所示。图10、图11、图12分别展示了再生集料不同掺量和粒径对水泥稳定再生集料7、28、90 d劈裂强度的影响。分析图10~12可以得出以下结论:

1) 替换[4.75, 9.5) mm粒径的集料为再生集

料时,混合料的劈裂强度随再生集料掺量的增加呈先增后减的趋势^[26]。这可能也是因为再生集料为低掺量时未水化的水泥颗粒发生水化提高了混合料强度,随着其掺量的增加,再生集料本身的缺陷效应大于水泥水化的促进效应,故混合料劈裂强度开始降低。当分别替换[9.5, 19) mm和[19, 26.5) mm粒径的集料为再生集料时,混合料的劈裂强度从一开始就呈现出随再生集料掺量增加而下降的趋势,其原因可能是较大粒径的再生集料的质量缺陷从一开始便占据主要作用,混合料劈裂强度随再生集料掺量的增加一直下降。

2) 在再生集料掺量和养护龄期相同的条件下,掺加的再生集料粒径越大,混合料的劈裂强度越低。其原因可能是粒径较小的再生集料其比表面积较大,和水泥的凝结效果较好,水化反应更彻底;同时,再生集料粒径越小,在混合料成型过程中再生集料的破碎率越低,混合料劈裂强度越大。

3) 以混合料7 d劈裂强度为例,掺加的再生集料粒径越大,混合料劈裂强度随再生集料掺量增

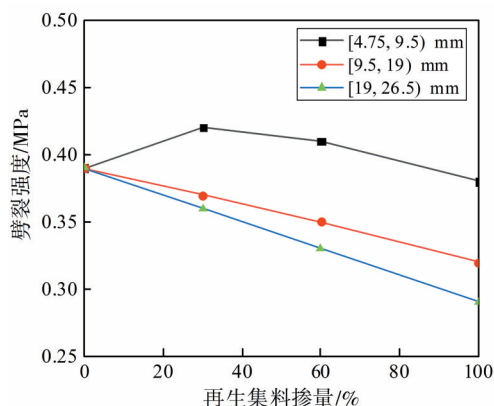


图10 7 d 劈裂强度

Fig. 10 7 d splitting strength

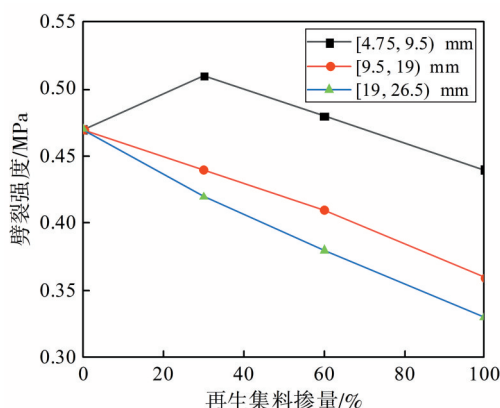


图11 28 d 劈裂强度

Fig. 11 28 d splitting strength

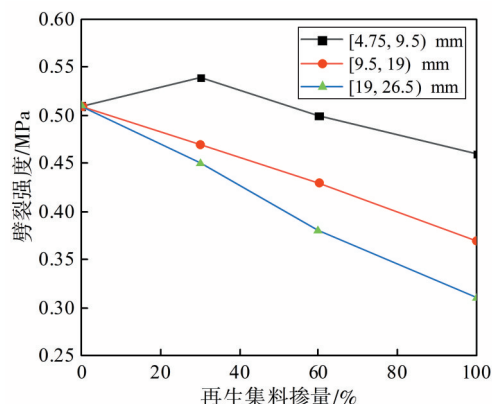


图12 90 d 劈裂强度

Fig. 12 90 d splitting strength

加而下降的趋势越明显。当再生集料掺量为100%时,分别掺入[4.75, 9.5) mm、[9.5, 19) mm、[19, 26.5) mm粒径再生集料的混合料的7 d无侧限抗压强度比天然集料混合料的降低了2.6%、17.9%、25.6%。

图13、图14、图15、图16分别展示了在再生集料掺量为0%、30%、60%、100%条件下,混合料劈裂强度与养护龄期和再生集料粒径的关系。分析图13~16得到以下结论:

1) 劈裂强度随养护龄期的增加而增加,其中7 d到28 d的劈裂强度发展较快,28 d到90 d的劈裂强度发展逐渐趋于平缓,这也是由于在早期水泥含量较高造成的。当再生集料掺量为30%时,分别掺加[4.75, 9.5) mm、[9.5, 19) mm、[19, 26.5) mm粒径再生集料的混合料28 d劈裂强度比7 d的分别增长了21.4%、18.9%、16.7%,这说明掺加的再生集料粒径越大,混合料劈裂强度的增长幅度随养护龄期的增长越小。

2) 以掺加[9.5, 19) mm粒径再生集料的混合料为例,在再生集料掺量分别为0%、30%、60%、90%的条件下,混合料28 d劈裂强度比7 d的分别增长了20.5%、18.9%、17.1%、12.5%。这说明随着再生集料掺量的增高,混合料劈裂强度的发展速度会变慢,原因可能是随着再生集料掺量的增加,再生集料中的砖渣和砂浆在一定程度上抑制了混合料劈裂强度的增长。

本节探究了再生集料粒径、掺量以及养护龄期对水泥稳定再生集料劈裂强度的影响规律。在再生集料为低掺量小粒径的情况下,混合料劈裂强度有所提升,但随着再生集料粒径和掺量增大,混合料的劈裂强度整体呈下降趋势。

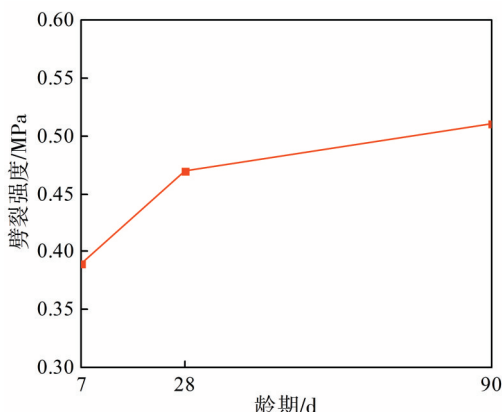


图13 0%再生集料

Fig. 13 0% recycled aggregate

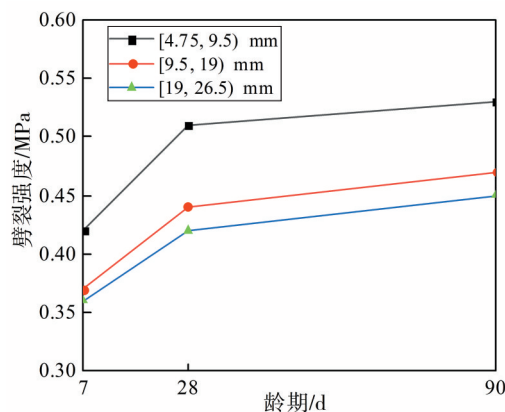


图14 30%再生集料

Fig. 14 30% recycled aggregate

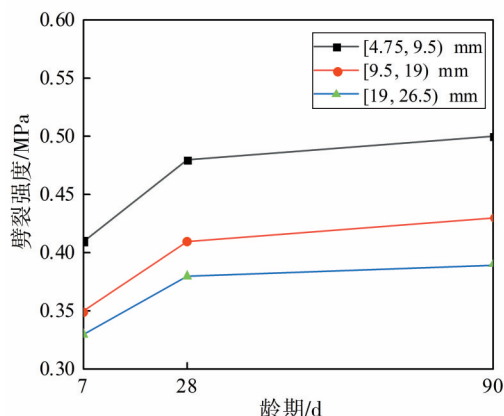


图15 60%再生集料

Fig. 15 60% recycled aggregate

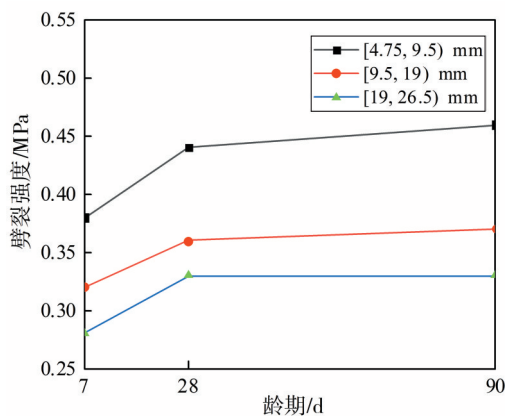


图16 100%再生集料

Fig. 16 100% recycled aggregate

2.4 抗压回弹模量

抗压回弹模量试验结果如图17~19所示。图17、图18、图19分别展示了再生集料掺量和粒径对混合料7、28、90 d抗压回弹模量的影响。分析图17~19可以得到以下结论:

1) 分别掺加[4.75, 9.5) mm和[9.5, 19) mm粒径再生集料的混合料,其抗压回弹模量先增加后减小;掺加[19, 26.5) mm粒径再生集料时,混合料的抗压回弹模量随再生集料掺量的增加一直下降。其原因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,在低掺量时使抗压回弹模量增加,当掺量提高后,再生集料本身的缺陷占据主导作用,混合料的抗压回弹模量开始下降;同时,粒径较大的再生集料中活性成分较少,从一开始,其本身的质量缺陷就占据主导作用,故混合料的抗压回弹模量从一开始就下降。

2) 在再生集料掺量和混合料养护龄期相同的条件下,加入的再生集料粒径越小,混合料的抗压

回弹模量就越大。其原因是再生集料粒径越小,比表面积就越大,与水泥黏结效果越好,同时,粒径越小,在混合料成型过程中再生集料破碎率越小,水泥稳定再生集料的抗压回弹模量越大。

图20、图21、图22分别展示了在再生集料掺量为30%、60%、100%条件下,混合料抗压回弹模量与养护龄期和再生集料粒径的关系。分析图20~22得到以下结论:

1) 与无侧限抗压强度和劈裂强度随龄期变化规律类似,在再生集料掺量和粒径相同时,其混合料的抗压回弹模量从7 d到28 d的增长速度远大于从28 d到90 d的增长速度。

2) 以掺加100%再生集料的混合料为例,当分别掺加[4.75, 9.5) mm、[9.5, 19) mm、[19, 26.5) mm粒径再生集料时,混合料90 d抗压回弹模量比7 d的分别增长了18.8%、13.8%、9.6%,这说明掺加的再生集料粒径越大,混合料抗压回弹模量的增长幅度随养护龄期的增长越小,原因可能是再生

集料粒径越大,在混合料成型时再生集料的破碎率较高,从而影响了混合料的抗压回弹模量随养护龄期的发展。

本节探究了再生集料粒径、掺量以及养护龄期对水泥稳定再生集料抗压回弹模量的影响规律。在再生集料为低掺量小粒径的情况下,混合料的抗压回弹模量有所提高,但随着再生集料粒径和掺量的增大,混合料抗压回弹模量整体呈下降趋势。

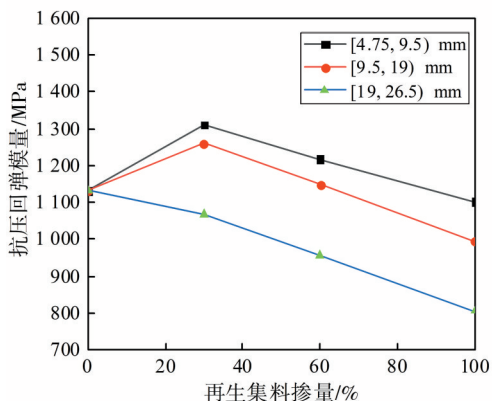


图 17 7 d 抗压回弹模量

Fig. 17 7 d compressive resilient modulus

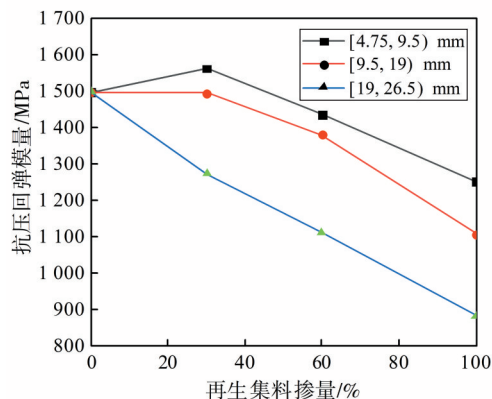


图 18 28 d 抗压回弹模量

Fig. 18 28 d compressive resilient modulus

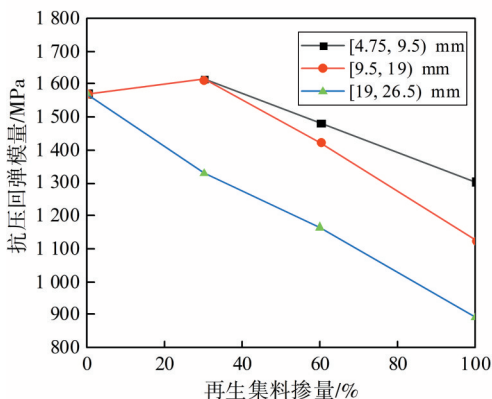


图 19 90 d 抗压回弹模量

Fig. 19 90 d compressive resilient modulus

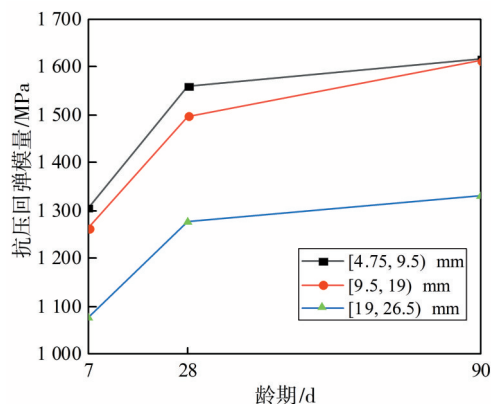


图 20 30% 再生集料

Fig. 20 30% recycled aggregate

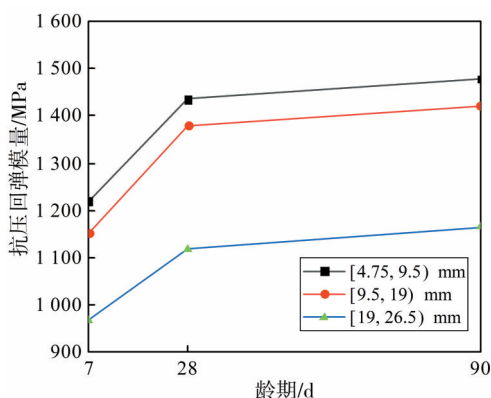


图 21 60% 再生集料

Fig. 21 60% recycled aggregate

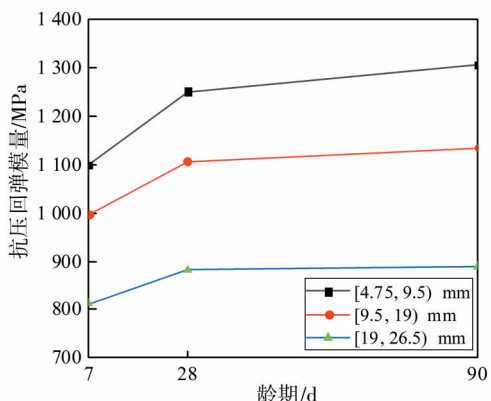


图 22 100% 再生集料

Fig. 22 100% recycled aggregate

3 结论

本文通过对国内外建筑固废在道路工程领域应用的研究,开展了一系列室内原材料试验、力学性能试验,研究了建筑固废再生集料的基本物理力学性质,并基于此进行了水泥稳定再生集料的

力学性能试验,研究再生集料粒径、掺量,以及混合料养护龄期对水泥稳定再生集料力学性能的影响,主要结论如下:

1) 再生集料的吸水率和压碎值明显比天然集料的大,其密度比天然集料的小。压碎值和吸水率这两个主要指标决定了再生集料的性能明显劣于天然集料的。

2) 水泥稳定再生集料的击实试验结果表明,再生集料掺量越大,混合料的最佳含水率越大,最大干密度越小;再生集料粒径越大,混合料的最佳含水率越大,最大干密度越小。

3) 掺加小粒径低掺量的再生集料时,水泥稳定再生集料的力学性能会由于再生集料中存在水泥等活性成分而有所提升,但随着再生集料粒径和掺量的增加,再生集料自身的缺陷影响超越了活性成分的积极作用,混合料总体力学性能逐渐下降。因此在制备水泥稳定再生集料时应当控制再生集料的掺量和粒径。

4) 水泥稳定再生集料早期强度增长速度明显比后期的快,这与天然集料混合料的强度发展规律一致。随着再生集料掺量和粒径的增加,再生集料自身的缺陷会减缓混合料强度发展的进程,混合料的力学性能发展速率逐渐下降。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2001 (总第20期): [中英文本][M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook —2001 (NO. 20): [Chinese and English version][M]. Beijing: China Statistics Press, 2001.
- [2] 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, 44(3): 1297-1304.
ZHAO Jun, LIU Qiuxia, LIN Liqing, et al. Evolution and comparison of construction waste of large cities in China[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1297-1304.
- [3] 李贤贵. 关于建筑垃圾的危害及资源化利用建议[J]. 环境与发展, 2017, 29(5): 255-256. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2017.05.162.
LI Xiangui. Suggestions on the harm of construction waste and resource utilization [J]. Environment and Development, 2017, 29 (5): 255-256. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2017.05.162.
- [4] 刘俊华, 张霞, 刘凤利. 建筑垃圾再生混合砂砂浆性能试验研究[J]. 混凝土, 2014(3): 131-134, 140. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2014.03.036.
- LIU Junhua, ZHANG Xia, LIU Fengli. Experimental study on performance of recycled construction waste mixed sand mortar[J]. Concrete, 2014(3): 131-134, 140. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2014.03.036.
- [5] 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. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.2014.07.001.
ZENG Hui. Quantitative assessment of ecological impacts of processing methods for construction waste [J]. Construction Economy, 2014, 35 (7): 90-93. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.2014.07.001.
- [6] 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.02.004.
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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.02.004.
- [7] 黄弛坚. 建筑废弃物的循环及再利用研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.
HUANG Chijian. Study on recycling of construction waste[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- [8] 沙爱民, 贾侃, 李小刚. 半刚性基层材料的疲劳特性[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 29-33. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2009.03.005.
SHA Aimin, JIA Kan, LI Xiaogang. Fatigue performances of semi-rigid base course materials [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9 (3): 29-33. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2009.03.005.
- [9] 沙爱民, 胡力群. 半刚性基层材料的结构特征[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 1-5, 42. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.04.001.
SHA Aimin, HU Liquan. Structural characteristics of semi-rigid base course material [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 1-5, 42. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.04.001.
- [10] 周卫峰, 赵可, 王德群, 等. 水泥稳定碎石混合料配合比的优化[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(1): 24-28. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2006.01.006.
ZHOU Weifeng, ZHAO Ke, WANG Dequn, et al. Mix ratio optimization design of cement stabilized macadam based on static pressure method and vibration method [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2006, 26 (1): 24-28. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2006.01.006.
- [11] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2008.09.030.
CHEN Fudong. Treatment of construction waste for

- filling subgrade of urban road [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25 (9): 44-46. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2008.09.030.
- [12] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8825.2010.04.021. ZHANG Daning, ZHANG Tiezhi, YU Qingrong. Study on application of building rubble in roadbase [J]. Subgrade Engineering, 2010 (4): 55-57. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8825.2010.04.021.
- [13] BEHIRY A E A E M. Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2013, 4 (4): 661-673. DOI: 10.1016/j.asej.2013.02.005.
- [14] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.034.
- [15] 杨俊, 黎新春, 陈峻松, 等. 废旧混凝土用作水泥稳定基层的试验研究[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.
- [16] 胡力群, 沙爱民. 水泥稳定废黏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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2012.03.006. 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. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2012.03.006.
- [17] 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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.033.
- [18] 郭鹏, 韦万峰, 唐伯明, 等. 再生粗集料棱角性对混合料高温性能评价[J]. 公路, 2017, 62(9): 220-225. GUO Peng, WEI Wanfeng, TANG Boming, et al. Evaluation of high-temperature performance of asphalt mixture based on angularity of recycled coarse aggregate [J]. Highway, 2017, 62(9): 220-225.
- [19] 韩瑞民, 祁峰, 张名成. 建筑垃圾再生混合料配合比设计及性能试验研究[J]. 建设科技, 2014(1): 25-28. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2014.01.023. HAN Ruimin, QI Feng, ZHANG Mingcheng. Mix proportion design and performance test of recycled mixture of construction waste [J]. Construction Science and Technology, 2014 (1): 25-28. DOI: 10.16116/j. cnki.jskj.2014.01.023.
- [20] 张荣华. 废弃混凝土在水泥稳定碎石基层中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2020. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2020.000367. ZHANG Ronghua. Research on application of waste concrete in cement stabilized crushed stone base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2020.000367.
- [21] 张立群, 杨欢欢, 林起飞, 等. 再生粗骨料在道路基层中的试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2020, 38 (1): 1-4. DOI: 10.3969/j. issn. 1008-4185.2020.01.001. ZHANG Liqun, YANG Huanhuan, LIN Qifei, et al. Experimental study on reclaimed aggregate in road base course [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2020, 38 (1): 1-4. DOI: 10.3969/j. issn.1008-4185.2020.01.001.
- [22] 蔡秀兰. 再生细集料混合砂浆配合比及物理性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010. CAI Xiulan. Experimental study on mix design and fundamental properties for mixed mortars using recycled fine aggregates [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [23] 高启聚, 丛林, 郭忠印. 废弃水泥混凝土路面基层在路面基层中的再生利用[J]. 公路交通科技, 2008, 25 (2): 20-23. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2008.02.005. GAO Qiju, CONG Lin, GUO Zhongyin. Recycling of waste cement concrete pavement slab in pavement base course [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (2): 20-23. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2008.02.005.
- [24] WANG B, YAN L, FU Q, et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 171: 105565. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [25] 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.04.007. 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.04.007.
- [26] 吴军, 申建芳, 李孟泉, 等. 不铺设和铺设玻纤格栅的路基建筑垃圾填料力学特性研究[J]. 路基工程, 2020 (5): 54-58. DOI: 10.13379/j. issn. 1003-8825.202003012. WU Jun, SHEN Jianfang, LI Mengquan, et al. Study on mechanical characteristics of roadbed filler of construction waste used in unlaied and laied glass fiber grid [J]. Subgrade Engineering, 2020 (5): 54-58.

- DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202003012.
- [27] 朱霞. 水泥稳定再生骨料基层混合料路用性能及其环境评价体系研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. ZHU Xia. The research of cement stabilized regeneration aggregate grassroots mixture with properties of road and environmental evaluation system [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [28] 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. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2016.12.009.
- 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. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268.2016.12.009.

Study on the mechanical properties of cement-stabilized mixture for recycled aggregate from construction and demolition waste

XIE Jianwei¹, CHEN Zhiyong², ZHANG Junhui¹

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Shenzhen General Integrated Transportation and Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518003, China)

Abstract: [Purposes] This paper investigated the effects of the particle size and the content and curing age of recycled aggregate on the mechanical properties of cement-stabilized recycled aggregate mixture. This study also aimed to provide a guidance for the fine utilization of recycled aggregate with different particle sizes. [Methods] The recycled aggregate was divided into three grades according to particle size, that is, [4.75, 9.5) mm, [9.5, 19) mm, [19, 26.5) mm. The cement-stabilized recycled aggregate mixture specimens were prepared with 4% cement content and different percentages of recycled aggregate. The dry density, unconfined compressive strength, splitting strength and compressive resilient modulus of the cement stabilized recycled aggregate mixture were tested. [Findings] The optimum moisture content increased and the maximum dry density decreased with the increase of the particle size and recycled aggregate content. When [4.75, 9.5) mm recycled aggregate was added, the mechanical properties of the cement stabilized recycled aggregate mixture first increased and then decreased with the increase of the recycled aggregate content. When [9.5, 19) mm recycled aggregate was added, the unconfined compressive strength and compressive resilient modulus of the cement stabilized recycled aggregate mixture first increased and then decreased with the increase of the content, while the splitting strength decreased with the increase of the content. When [19, 26.5) mm recycled aggregate was added, the mechanical properties of the cement stabilized recycled aggregate mixture decreased with the increase of the content of recycled aggregate. [Conclusions] The variation law of mechanical properties of cement stabilized recycled aggregate mixture is different with the change of recycled aggregate content and particle size. In general, the larger the amount of recycled aggregate and the particle size, the worse the mechanical properties of the cement stabilized recycled aggregate mixture are.

Key words: construction and demolition waste; cement-stabilized recycled aggregate mixture; recycled aggregate size; recycled aggregate content; mechanical property

Manuscript received: 2022-08-17; **revised:** 2022-08-27; **accepted:** 2022-08-27

Foundation item: Project (SJCX202116) supported by Changsha University of Science & Technology Postgraduate Practical Innovation and Entrepreneurship Enhancement Program; Project (52025085) supported by the National Science Foundation for Outstanding Young People

Corresponding author: ZHANG Junhui (1978—) (ORCID: 0000-0002-0745-1213), male, professor, research interest: subgrade engineering. E-mail: zjhseu@csust.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:赵冰;英文编辑:栗淼)