

含砖粉碎料水泥稳定再生集料的力学性能

周芬[†], 张力, 杜运兴

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 砖粉碎料的含量影响水泥稳定再生集料的力学性能。本文采用试验研究了水泥含量、砖粉碎料掺量和养护龄期对水泥稳定再生集料力学性能的影响,建立了这 3 种因素与无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量和抗冻性能的关系。试验结果表明,随着砖粉碎料掺量的减少,水泥稳定再生集料的最大干密度增大,其最佳含水量减小;随着水泥含量的减少,水泥稳定再生集料的最大干密度减小,其最佳含水量基本不变;不同龄期水泥稳定再生集料的无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量和抗冻性能都随着砖粉碎料掺量的增加而降低,随着水泥含量的增加而增加;以水泥含量和砖粉碎料掺量为变量建立了含砖粉碎料水泥稳定再生集料的无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量计算公式。

关键词: 建筑垃圾; 砖粉碎料; 再生集料; 水泥稳定基层; 力学性能

中图分类号: U416.26

文献标志码: A

Mechanical Properties of Cement Stabilized Recycled Aggregates with Crushed Brick

ZHOU Fen[†], ZHANG Li, DU Yunxing

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The content of crushed brick affects the mechanical properties of cement stabilized recycled aggregates. The effects of cement content, crushed brick content and curing time on the mechanical properties of cement stabilized recycled aggregates were studied through tests in this paper. The relationships between the three variables and unconfined compressive strength, splitting strength, compressive resilient modulus and the frost resistance were established. The results show that, with the decreasing content of crushed brick, the maximum dry density of cement stabilized recycled aggregates increases, but the optimal moisture content decreases; the decrease of the cement content reduces the maximum dry density of cement stabilized recycled aggregates, but the optimal moisture content remains the same in general. The unconfined compressive strength, splitting strength, compressive resilient modulus and frost resistance of cement stabilized recycled aggregates decrease with the increase of crushed brick content, and go up with the increase of cement content for various curing time. Taking the contents of cement and crushed brick as variables, the calculation formulas of the unconfined compressive strength, splitting strength and compressive resilient modulus of cement stabilized recycled aggregate with crushed brick were established.

Key words: construction and demolition waste; crushed brick; recycled aggregates; cement stabilized base; mechanical properties

* 收稿日期: 2019-03-28

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2050), Natural Science Foundation of Hunan Province(2018JJ2050); 长沙市科技计划重大专项资助项目(kq1703002, kq1804002), Major Project of Sci-Tech Plan of Changsha City(kq1703002, kq1804002); 长沙市科技计划资助项目(kq1907101), Project of Sci-Tech Plan of Changsha City(kq1907101)

作者简介: 周芬(1973—), 女, 湖北武汉人, 湖南大学副教授

[†] 通讯联系人, E-mail: zhoufen@hnu.edu.cn

城市改造的过程中会产生大量的建筑垃圾,这些建筑垃圾随意堆放不仅会占用大量的土地,还会对环境造成污染^[1]. 解决建筑垃圾危害的根本途径是对建筑垃圾进行处理使其资源化. 由于建筑垃圾成分复杂,各类成分资源化的用途也不相同,实现建筑垃圾资源化的前提是对各成分进行分离. 建筑垃圾中的金属、木材、管线较容易实现分离,而建筑垃圾中含量最多的混凝土和砌体较难分离. 目前虽有技术可实现砌体和混凝土的分离^[2],但效率低、成本高,这样的技术难以推广. 因此,高效利用混凝土和砌体混合料对于实现建筑垃圾资源化有重要的意义. 目前,许多学者对于这种材料粉碎料的应用进行了卓有成效的研究. 其中,将混凝土、砌体混合粉碎料用于道路中的水泥稳定碎石是一种可行、合理资源化的途径.

水泥稳定碎石是一种半刚性基层,它可以有效地承担和传递上部路面荷载,该基层在道路结构中被广泛应用^[3]. Xuan 等^[4]将建筑垃圾作为集料应用于水泥稳定碎石,并研究了各混合变量对水泥稳定碎石的影响,认为建筑垃圾作为水泥稳定碎石基层可以获得良好的力学性能. Hou 等^[5]将砖粉碎料与天然集料混合用于水泥稳定碎石并进行了研究,结果表明砖粉碎料可以用于水泥稳定碎石中. Bassani 等^[6]比较了水泥窑灰稳定再生集料和普通水泥稳定再生集料的性能,结果表明,水泥窑灰稳定再生集料的强度和刚度得到了提高,可完全用于水泥稳定基层. 孙家瑛等^[7]将再生混凝土集料应用于水泥稳定基层,试验结果表明水泥稳定再生混凝土集料的各项性能均可达到规范要求. 曾梦澜^[8]和肖杰等^[9]用砖混混合再生集料代替天然集料,胡立群等^[10]用废弃砖块分别代替天然的粗、细集料,测试了再生集料用作水泥稳定基层的路用性能,研究结果表明再生集料用于道路基层是可行的. 由于再生集料中含有砖粉碎料,砖粉碎料的强度一般低于混凝土粉碎料,这样的再生集料应用于水泥稳定碎石基层无疑影响其力学性

能,而目前国内外也缺乏砖粉碎料的掺量对水泥稳定再生集料性能影响的研究.

本文通过试验研究砖粉碎料掺量、水泥含量和养护龄期对水泥稳定再生集料力学性能的影响,为含砖粉碎料的再生集料应用于道路基层提供数据支撑.

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验采用的再生集料分别是砖粉碎料和混凝土粉碎料. 水泥为 P. O42.5 普通硅酸盐水泥. 采用《公路工程集料试验规程》^[11](JTG E42—2005)所示方法测试了两种再生集料的物理性能,如表 1 所示. 两种再生集料均满足《道路用建筑垃圾再生骨料无机混合料》^[12](JC/T 2281—2014)中 II 类集料性能指标要求. 从表 1 可以看出,砖粉碎料粗集料(4.75 mm~31.5 mm)和细集料(0~4.75 mm)的表观密度均小于混凝土粉碎料,砖粉碎料的吸水率是混凝土粉碎料的 2.17 倍,主要是由于砖粉碎料的表面具有比混凝土粉碎料更多的孔隙. 砖粉碎料的压碎值和磨耗值均大于混凝土粉碎料表明砖粉碎料的强度低于混凝土粉碎料,但是两种集料的物理性能均符合规范要求. 因此,两种再生集料可以作为水泥稳定碎石的材料.

1.2 混合料设计

本次试验研究了 3 个变量对含砖粉碎料水泥稳定再生集料力学性能的影响规律,3 个变量分别为:水泥含量、砖粉碎料掺量和养护龄期. 砖粉碎料掺量是指砖粉碎料质量占再生集料总质量的百分比,试验工况中砖粉碎料掺量分别为 0%、25%、50%、75%和 100%. 水泥含量是指水泥质量占再生集料总质量的百分比. 水泥稳定碎石基层中,水泥含量一般不超过 6%. 试验工况中水泥含量分别为 4%、5%和 6%. 在标准养护条件下,试件分别养护 7 d、28 d 和 90 d.

表 1 再生集料物理性能

Tab.1 Physical properties of recycled aggregates

	粗集料表观 密度 ^① /(g·cm ⁻³)	细集料表观 密度 ^② /(g·cm ⁻³)	吸水率 ^③ /%	压碎值 ^④ /%	洛杉矶 磨耗值 ^⑤ /%	针片状指数 ^⑥ /%	含泥量 ^⑦ /%
混凝土粉碎料	2.617	2.614	6.4	34.1	37.2	5.2	0.6
砖粉碎料	2.139	2.135	13.9	39.3	44.6	6.8	0.9
JC/T 2281—2014 规范要求	—	—	—	<45	—	<20	<1

注:①~⑦项对应指标测试方法分别为 T0304—2005、T0328—0225、T0304—2005、T0316—2005、T0317—0225、T0312—2005、T0310—2005.

1.3 试件制备

按照《道路用建筑垃圾再生骨料无机混合料》(JC/T 2281—2014)推荐的级配中值配制再生集料的级配,见表2所示.采用《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[13]的T 0843—2009方法制作试件,根据试件的最大干密度和最佳含水量计算各工况的集料质量.根据计算结果将两种再

生集料按照预定比例配制成混合集料,加入预定水量焖料4h,使混合集料充分吸收水分.焖料完成后加入预定水泥,拌和至均匀状态,分三层放入直径为150mm的试筒中,每层均匀插捣,采用静压成型方法将试件制作成直径为150mm,高为150mm的圆柱形试件,试件成型后养护6h脱模,放入标准养护箱中,养护至指定龄期后测试其力学性能.

表2 再生集料对应筛孔尺寸通过率

Tab.2 Passing rate of recycled aggregates corresponding to different sieve sizes

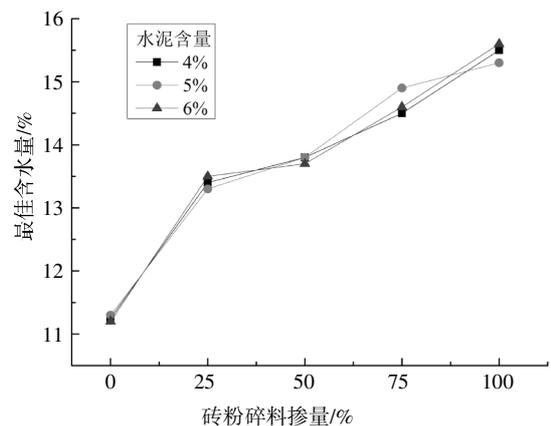
%

级配	筛孔尺寸通过率							
	31.5 mm	26.5 mm	19 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	0.6 mm	0.075 mm
级配上限	100	100	89	67	49	35	22	7
级配下限	100	90	72	47	29	17	8	0
级配中值	100	95	81	57	39	26	15	3

2 试验结果与讨论

2.1 击实特性

图1为水泥稳定再生集料的最大干密度和最佳含水量与砖粉碎料掺量的关系,每组击实试验的试件数量为2个.由图1(a)可知,水泥稳定再生集料的最大干密度随着砖粉碎料掺量的增加而减小,随着水泥含量的增加而增大.对于各水泥含量工况,100%砖粉碎料掺量的水泥稳定再生集料对应的最大干密度比0%砖粉碎料掺量对应的最大干密度下降了9.6%~10.7%.砖粉碎料的孔隙较多,其表观密度比混凝土粉碎料小是导致水泥稳定再生集料的最大干密度随着砖粉碎料掺量的增加而减小的主要原因.水泥含量的增加产生了更多的水化产物,增强了集料界面之间的黏结,减小了集料之间的孔隙,从而增大了其最大干密度.



(b)最佳含水量与砖粉碎料掺量关系图

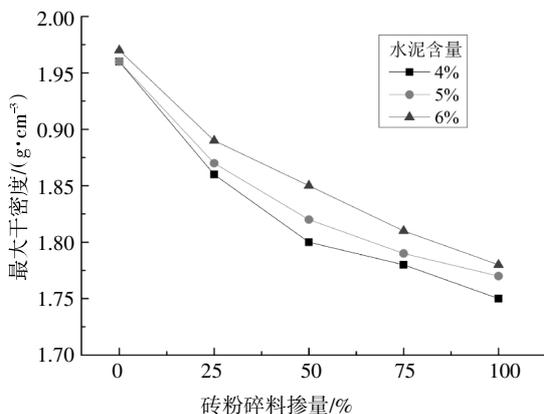
图1 击实试验结果

Fig.1 Result of compaction tests

由图1(b)可知,对于各水泥含量工况,100%砖粉碎料掺量的水泥稳定再生集料对应的最佳含水量是0%砖粉碎料掺量对应的1.35~1.39倍,主要原因是砖粉碎料的吸水率大于混凝土粉碎料.随着水泥含量的增加,水泥稳定再生集料的最佳含水量基本不变.主要是由于在击实过程中,由于再生集料强度低而发生了破碎,再生集料孔隙中的自由水会参与水泥水化作用.

2.2 无侧限抗压强度

图2(a)为水泥稳定再生集料7d、28d、90d的无侧限抗压强度试验结果,每组无侧限抗压强度试验的试件数量为13个.水泥稳定再生集料的无侧限抗压强度随着砖粉碎料掺量的增加而减小,随着水泥含量的增加而增大.从两种再生集料的压碎值和



(a)最大干密度与砖粉碎料掺量关系图

磨耗值可以看出, 砖粉碎料的强度低于混凝土粉碎料, 在水泥稳定再生集料受压时, 砖粉碎料比混凝土粉碎料更容易发生破坏, 因此随着砖粉碎料掺量的增加, 水泥稳定再生集料的无侧限抗压强度会随之降低。水泥含量的增加增强了水泥水化物的强度, 在受压时能够更好地承担和分散集料之间的作用力, 因此随着水泥含量的增加, 无侧限抗压强度随之增加。

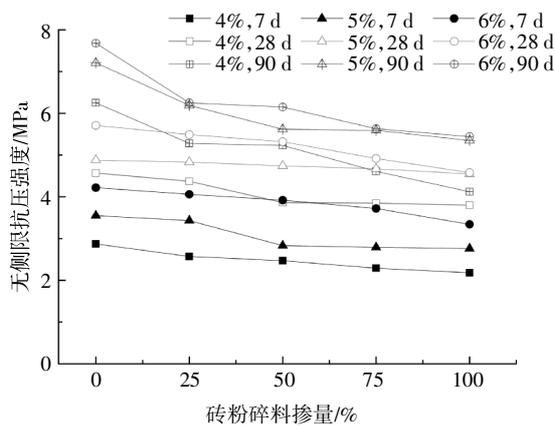
在不同龄期下考虑水泥含量和砖粉碎料掺量对水泥稳定再生集料无侧限抗压强度的影响, 对其进行回归拟合, 得出如下计算公式:

$$R_{c7}=68.8C-0.797B+0.092(R^2=0.971) \quad (1)$$

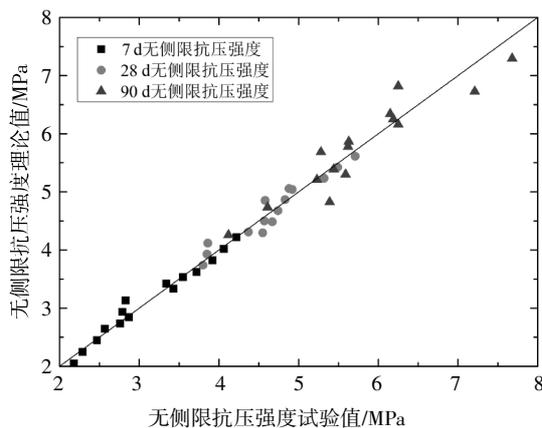
$$R_{c28}=55.7C-0.761B+2.272(R^2=0.972) \quad (2)$$

$$R_{c90}=56.6C-1.903B+3.897(R^2=0.874) \quad (3)$$

式中: R_{c7} 、 R_{c28} 、 R_{c90} 表示 7 d、28 d、90 d 无侧限抗压强度, MPa; C 表示水泥含量; B 表示砖粉碎料掺量。图 2 (b) 为无侧限抗压强度试验值与理论值之间的比较图。



(a) 无侧限抗压强度与砖粉碎料掺量关系



(b) 无侧限抗压强度试验值与理论值比较

图 2 无侧限抗压强度试验结果

Fig.2 Result of unconfined compressive strength

对比 7 d、28 d 强度计算公式中水泥含量和砖粉碎料掺量对应的系数可知, 水泥含量的系数变化大于砖粉碎料掺量系数变化, 表明此时水泥水化所产

生的强度是水泥稳定再生集料前期强度增加的主要因素; 对比 28 d 和 90 d 强度计算公式中水泥含量和砖粉碎料掺量对应的系数可知, 砖粉碎料掺量的系数变化大于水泥含量系数变化, 表明养护后期水泥稳定再生集料抗压强度主要受砖粉碎料掺量的影响。

根据《公路沥青路面设计规范》^[14](JTG D50—2017) 规定, 水泥稳定再生集料的最低强度满足二级公路中等、轻交通基层对应的 7 d 无侧限抗压强度要求。

2.3 劈裂强度

劈裂强度方法采用《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009) 的 T 0806—1994 方法, 劈裂试件为直径 150 mm、高 150 mm 的圆柱形试件, 每组劈裂强度试验的试件数量为 13 个。图 3(a) 为水泥稳定再生集料 7 d、28 d、90 d 的劈裂强度试验结果。结果表明, 100% 砖粉碎料掺量对应的水泥稳定再生集料 90 d 劈裂强度比 0% 砖粉碎料掺量对应的水泥稳定再生集料 90 d 劈裂强度减小了 15.2%~17.5%; 水泥含量为 6% 时的水泥稳定再生集料 90 d 劈裂强度比水泥含量为 4% 时增加了 21.3%~28.3%。

对于不同龄期, 分析水泥含量和砖粉碎料掺量对水泥稳定再生集料劈裂强度的影响, 针对这些因素进行回归拟合, 得出如下计算公式:

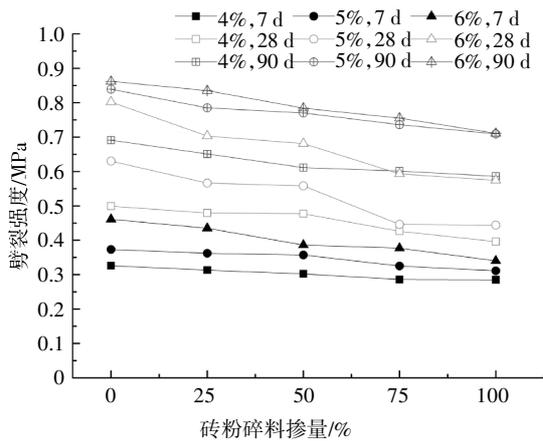
$$R_{i7}=4.87C-0.076B+0.144(R^2=0.931) \quad (4)$$

$$R_{i28}=10.76C-0.176B+0.101(R^2=0.927) \quad (5)$$

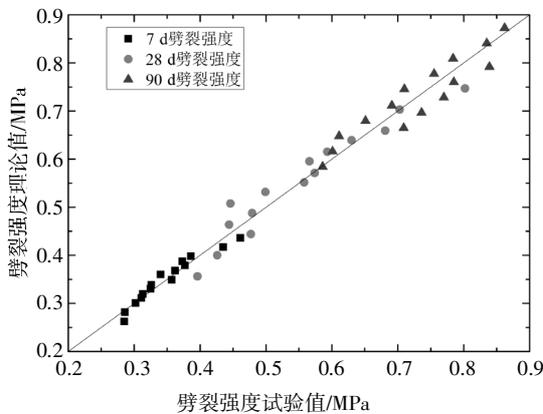
$$R_{i90}=8.06C-0.127B+0.389(R^2=0.877) \quad (6)$$

式中: R_{i7} 、 R_{i28} 、 R_{i90} 分别表示 7 d、28 d、90 d 劈裂强度, MPa。图 3(b) 为劈裂强度试验值与理论值之间的比较图。

对比 7 d 和 28 d 劈裂强度计算公式中水泥含量和砖粉碎料掺量对应的系数, 可以得到: 养护前期, 水泥稳定再生集料的劈裂强度主要受水泥水化后产生的强度和集料强度两者共同影响; 对比 28 d 和 90 d 劈裂强度可以得到: 在养护后期, 水泥含量和砖粉碎料掺量对水泥稳定再生集料的劈裂影响都会减弱。劈裂破坏反映的是拉伸破坏, 在劈裂试验期间, 裂缝发展于集料界面之间, 由于再生细集料具有一定活性, 在一定程度上提升了界面之间的黏结能力。而且, 再生粗集料含有的孔隙率多, 在拌和过程中, 水泥浆能够更容易进入到再生粗集料的孔隙中。因此, 此时除了集料自身强度性能外, 集料与集料之间的强度也是影响其劈裂强度的主要因素。



(a) 劈裂强度与砖粉掺量关系



(b) 劈裂强度试验值与理论值比较

图3 劈裂强度试验结果

Fig.3 Result of splitting strength tests

图4为不同砖粉掺量对应的劈裂试验破坏模式.当砖粉掺量为0%时,裂缝发展大部分发生在集料界面与界面之间,而随着砖粉掺量的增加,由于砖粉强度较低,砖粉为水泥稳定再生集料的薄弱环节,裂缝发展于砖粉内部.可以看出,随着砖粉掺量的增加,水泥稳定再生集料更多的沿着砖粉内部破坏.

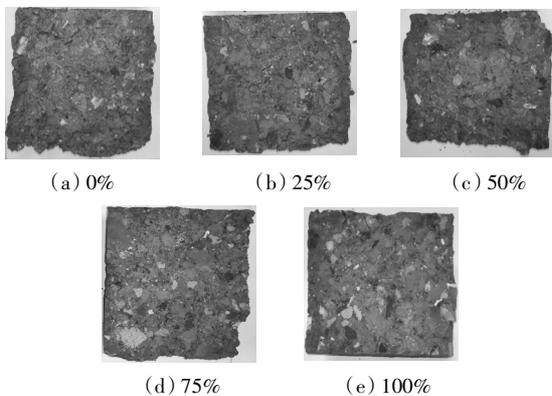


图4 不同砖粉掺量劈裂试验破坏模式

Fig.4 Failure behaviour of splitting strength tests for different brick content

2.4 抗压回弹模量

图5(a)所示为水泥稳定再生集料7d、28d和90d的抗压回弹模量试验结果,每组抗压回弹模量试验的试件数量为15个.结果表明,100%砖粉掺量对应的水泥稳定再生集料90d抗压回弹模量比0%砖粉掺量对应的水泥稳定再生集料90d抗压回弹模量减小了35.8%~46.1%,6%水泥含量对应的水泥稳定再生集料90d抗压回弹模量比4%水泥含量对应的水泥稳定再生集料90d抗压回弹模量增大了9.8%~34.6%.由于砖粉的孔隙大于混凝土粉料,在水泥稳定再生集料承受的力相同时,砖粉产生的变形量大于混凝土粉料,因此水泥稳定再生集料的抗压回弹模量会随着砖粉掺量的增加而减小.

针对不同龄期研究水泥含量和砖粉掺量对水泥稳定再生集料抗压回弹模量的影响,对这两个因素回归拟合,得出如下计算公式:

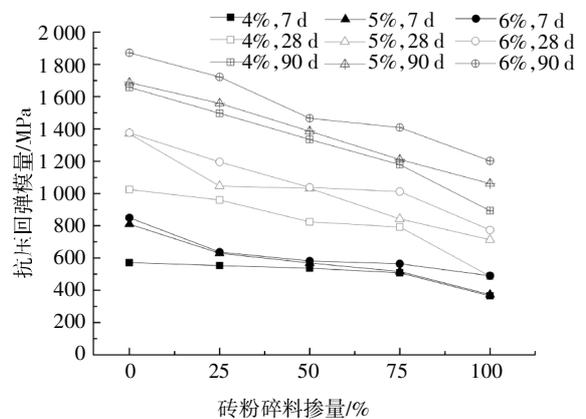
$$E_{c7} = 5880C - 298B + 425.2 (R^2 = 0.841) \quad (7)$$

$$E_{c28} = 10900C - 461.3B + 490.6 (R^2 = 0.929) \quad (8)$$

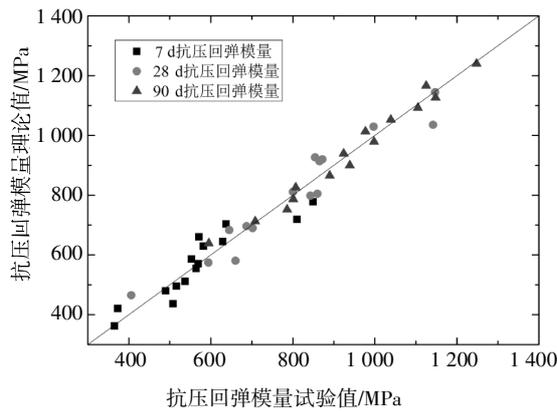
$$E_{c90} = 7390C - 453.5B + 796.6 (R^2 = 0.977) \quad (9)$$

式中: E_{c7} 、 E_{c28} 、 E_{c90} 分别表示7d、28d、90d抗压回弹模量,MPa.图5(b)为抗压回弹模量试验值与理论值之间的比较图.

对比计算公式中7d和28d抗压回弹模量水泥含量和砖粉掺量对应的系数,可以得到:在养护前期,与劈裂强度趋势相同,水泥含量和砖粉掺量都是水泥稳定再生集料抗压回弹模量变化的主要影响因素;对比28d和90d抗压回弹模量可以得到:在养护后期,水泥含量的影响降低,是由于水泥水化基本完成,回弹模量主要由集料决定.



(a) 抗压回弹模量与砖粉掺量关系



(b) 抗压回弹模量试验值与理论值比较

图 5 抗压回弹模量试验结果

Fig.5 Result of compressive resilient modulus

2.5 抗冻性能

水泥稳定碎石的抗冻性能采用抗冻指数进行评价. 抗冻性指标是指经 n 次冻融循环后试件的抗压强度与对比试件的抗压强度的比值. 根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,将水泥稳定再生集料在标准条件下养护 28 d, 在养护的最后 1 d 浸水 24 h 后放入高低温交变湿热箱中,在 -18°C 的条件下放置 16 h, 然后放入 20°C 的水中 8 h, 如此循环 5 次, 每组冻融试验的试件数量为 18 个. 冻融全部结束后测试同批次试件冻融前抗压强度, 得到水泥稳定再生集料的抗冻指数. 根据测试结果, 本文研究的水泥稳定再生集料抗冻指数与砖粉碎料掺量的关系如图 6 所示.

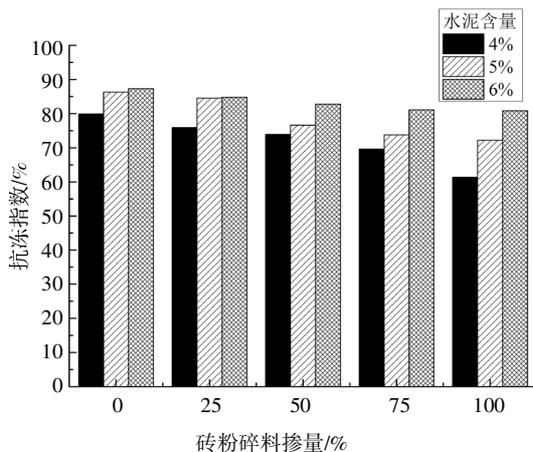


图 6 抗冻融试验结果

Fig.6 Result of anti-freeze-thaw tests

由图 6 可知, 水泥稳定再生集料的抗冻性能随着砖粉碎料掺量的增加而降低, 随着水泥含量的增

加而增强. 当水泥含量增加时, 水泥稳定再生集料的抗冻指数的下降幅度逐渐减少, 说明砖粉碎料掺量对水泥稳定再生集料抗冻性能的影响随着水泥含量的增加而减小.

当再生集料吸水后, 在低温条件下孔隙中的自由水会由于冻胀而对集料产生附加内应力. 冻融条件下, 所产生的附加内应力会对集料产生反复的挤压, 最终使集料发生破坏而降低了集料强度, 从而使水泥稳定再生集料的强度发生下降.

砖粉碎料的吸水率大, 孔隙较多. 随着砖粉碎料掺量的增加, 其内部由于水冻胀产生的附加内应力对低强度的砖粉碎料产生更大的破坏. 破坏后的砖粉碎料一部分会随着融化之后的水流失, 造成孔隙进一步增加, 从而导致了水泥稳定再生集料抗冻性能的下降, 所以其抗冻指数也会随之下降. 而随着水泥含量的增加, 水泥水化增加了界面之间的强度, 减少了试件界面之间的空隙, 因此抗冻指数会随之增大.

3 结 论

本文以砖粉碎料和混凝土粉碎料为原料, 研究了水泥含量、砖粉碎料掺量和养护龄期对含砖粉碎料的水泥稳定再生集料的影响, 主要结论如下:

1) 砖粉碎料掺量的增加和水泥含量的减少均导致了水泥稳定再生集料最大干密度的减小. 当水泥含量相同时, 随着砖粉碎料掺量从 0% 增加至 100%, 水泥稳定再生集料的最大干密度下降了 9.6%~10.72%.

2) 砖粉碎料掺量的增加导致了水泥稳定再生集料最佳含水量的增大. 在水泥含量相同时, 砖粉碎料掺量为 100% 时的水泥稳定再生集料最佳含水量是砖粉碎料掺量为 0% 时的 1.35~1.39 倍; 而随着水泥含量的增加其最佳含水量基本不变.

3) 各龄期水泥稳定再生集料的无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量都随着砖粉碎料掺量的增加而降低, 随着水泥含量的增加而增加.

4) 水泥含量增加时, 砖粉碎料对水泥稳定再生集料抗冻性能的影响减小.

5) 在考虑水泥含量和砖粉碎料掺量的条件下, 建立了 7 d、28 d 和 90 d 水泥稳定再生集料无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量的计算公式.

参考文献

- [1] 徐平, 张敏霞. 我国建筑垃圾再生资源化分析 [J]. 能源环境保护, 2009, 23(1): 24—26.
XU P, ZHANG M X. Analysis on the regeneration of building garbage in China [J]. Energy Environmental Protection, 2009, 23(1): 24—26. (In Chinese)
- [2] SAMPAIO C H, CAZACLIU B G, MILTZAREK G L, *et al.* Stratification in air jigs of concrete/brick/gypsum particles [J]. Construction and Building Materials, 2016, 109: 63—72.
- [3] 曾梦澜, 罗迪, 吴超凡, 等. 不同级配类型水泥稳定碎石路面基层材料的抗裂性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(10): 1—7.
ZENG M L, LUO D, WU C F, *et al.* Anti-cracking properties of cement stabilized crushed stone pavement base materials of different aggregate structures [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(10): 1—7.
- [4] 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.
- [5] HOU Y, JI X, ZOU L, *et al.* Performance of cement-stabilised crushed brick aggregates in asphalt pavement base and subbase applications [J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(1): 120—135.
- [6] BASSANI M, RIVIERA P P, TEFA L. Short-term and long-term effects of cement kiln dust stabilization of construction and demolition waste [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 29(5): 04016286.
- [7] 孙家瑛, 眭少峰, 蒋华钦. 再生混凝土集料用于水泥稳定碎石研究及应用[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 580—584.
SUN J Y, SUI S F, JIANG H Q. Research and application of recycled concrete aggregate for cement stabilized gravel [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5): 580—584. (In Chinese)
- [8] 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 M L, TIAN Z, XIAO J, *et al.* Performance of cement stabilized crushed crushed stone pavement base materials containing construction waste [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(1): 34—38. (In Chinese)
- [9] 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 J, WU C F, ZHAN Z H, *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. (In Chinese)
- [10] 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.
HU L Q, SHA A M. Performance test of cement stabilized crushed clay brick for road base material [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 73—79. (In Chinese)
- [11] JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 7—49.
JTG E42—2005 Test methods of aggregate for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2005: 7—49. (In Chinese)
- [12] JC/T 2281—2014 道路用建筑垃圾再生骨料无机混合料[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2014: 2—3.
JC/T 2281—2014 Construction waste recycled aggregate mixture for road [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2014: 2—3. (In Chinese)
- [13] JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 67—146.
JTG E51—2009 Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2009: 67—146. (In Chinese)
- [14] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017: 14—15.
JTG D50—2017 Specifications for design of highway asphalt pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2017: 14—15. (In Chinese)