

# 再生集料用于水泥稳定碎石基层中的抗疲劳性能研究

盛三湘<sup>1</sup>, 李城<sup>2</sup>

(1. 中交基础设施养护集团有限公司, 北京市 100011; 2. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室)

**摘要:**该文以建筑废弃物再生集料为主要研究对象,开展基本性能试验,在不同水泥剂量(4%、5%)下,探究不同再生集料掺量(0%、25%、50%、75%)以及砖混凝土比例(1:9、2:8、3:7)下水稳再生混合料的无侧限抗压强度、抗弯拉疲劳性能。研究表明:随着水泥剂量、再生集料的掺量以及砖混凝土比例的增加,水稳再生混合料的最大干密度减小,最佳含水率增大。在最不利情况下,4%水泥剂量满足在重交通荷载下,二级及二级以下公路底基层的要求。5%水泥剂量满足中等、轻交通下的高速公路、一级公路基层的要求。随着再生集料掺量与砖混凝土比例的增加,其疲劳寿命差异逐渐加大,再生集料掺量与砖混凝土比例对于水稳再生混合料疲劳寿命的影响曲线呈现良好的线性关系。

**关键词:**建筑废弃物;再生集料;力学性能;疲劳性能

随着中国城市化建设如火如荼进行,大量的建筑固体废弃物产生和堆积,侵占了有限的土地资源,同时威胁居民健康。据不完全统计,中国建筑垃圾每年的产量高达18亿t,约占城市垃圾总量的40%。在最近10年中,道路工程所需的天然骨料需求远远超出了中国的可供应能力。到2030年底,中国将建成47000km的高速公路和100000km的国道。将建筑固体废弃物经过再利用可得到用于水稳基层的再生集料,这一举措将有效缓解环境污染与资源浪费问题。

目前,再生集料在道路工程中的应用主要包括在路面面层、路面基层及底基层和路基填筑等方面。在美国,再生集料应用统计中,修筑路面基层占主要部分,比重高达68%。与天然集料相比,再生集料具有粒形较差、裂纹较多、空隙率较高、堆积密度小等特点。Etxeberria等以再生集料作为主要研究对象,分析了其对水稳再生混合料劈裂抗拉强度的影响。在同样的水泥剂量下,再生混凝土的抗压强度会降低12%~25%;杨可桢通过研究表明:随着再生集料替代率的增加,水泥稳定再生混合料的无侧限抗压强度、间接拉伸强度和抗压回弹模量降低。干缩性能也随着再生骨料含量的增加而下降,而渗透性能随着再生骨料含量的增加而增加。但在一定合适掺量的再生集料下,仍能满足高速公路及一级公路的路面基层要求。

以往大部分研究往往将再生集料看作是一个整

体,而再生集料主要由再生混凝土集料以及再生砖集料组成,两者在密度、空隙率、强度性能等方面具有明显差异。随着砖混凝土分离技术逐渐发展、成熟。除螺旋法、涡流分离等方法外,在不久的将来空气夹具、传感器分拣、智能识别等可进一步高效实现砖混凝土分离。这为再生集料的精细化研究以及再生集料在实际工程中的应用打下了坚实的基础。

该文以再生集料为主要研究对象,开展再生集料应用于水泥稳定碎石基层中无侧限抗压强度、弯拉强度、疲劳性能的研究。根据威布尔双参数模型,建立不同再生集料掺量与砖混凝土比例下的疲劳方程。分析水泥剂量、再生集料掺量以及砖混凝土比例对水泥稳定再生混合料力学性能的影响。

## 1 原材料性能

### 1.1 原材料和集料级配

水泥为南方PC42.5级复合硅酸盐水泥,根据规范对道路用水泥质量标准要求,通过JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》试验方法,对水泥性能指标进行检测,结果满足规范要求。

试验用天然集料为石灰岩。根据JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》试验方法。对建筑固体废弃物再生粗集料的性能指标进行试验分析,结果见表1。

表 1 粗集料性能指标检测结果

集料类型	粒径/ mm	表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	吸水率/ %	针片状颗粒 含量/%	压碎值/ %
天然集料	4.75~9.5	2.71	0.75	9.6	22.1
	9.5~19	2.69	0.53	8.8	
	19~26.5	2.72	0.42	6.8	
混凝土再生集料	4.75~9.5	2.50	5.71	7.8	27.6
	9.5~19	2.55	5.44	7.1	
	19~26.5	2.53	5.50	3.2	
砖渣再生集料	4.75~9.5	2.38	17.08	7.3	29.3
	9.5~19	2.41	16.55	6.9	
	19~26.5	2.44	14.61	3.5	

混合料级配采用 JTG F20—2015《公路路面基层施工技术细则》中骨架密实型级配(C-B-3)中值,具体见表 2。

表 2 集料合成级配范围

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	86.0	58.0	32.0	28.0	15.0	3.0
下限	100	68.0	38.0	22.0	16.0	8.0	0
中值	100	77.0	48.0	27.0	22.0	11.5	1.5

1.2 最佳含水率与最大干密度

根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定

材料试验规程》T0842—2009 试验方法进行振动压实试验,确定 4%、5% 水泥剂量,再生集料掺量为 0%、25%、50%、75%,砖混凝土比例为 1:9、2:8、3:7,合计 20 种方案下混合料的最大干密度和最佳含水率,其结果见图 1。

2 试验方案

2.1 无侧限抗压强度

根据图 1 击实试验结果所得到的最佳含水率与最大干密度,采用试验规程中振动成型的试验方法(T0843—2009)成型 150 mm×150 mm 圆柱形试件,在标准养生条件下养生,然后按照 JTG E51—2009《公

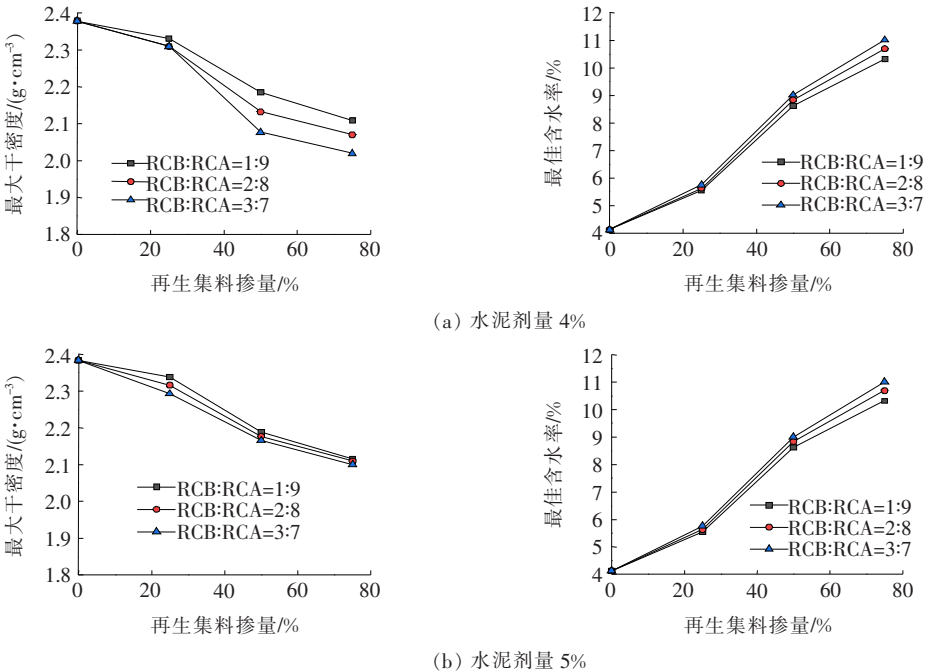


图 1 不同水泥剂量下击实试验结果

路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0805—2009 试验方法开展 7 d 无侧限抗压强度试验。

## 2.2 弯拉强度、疲劳寿命试验

参照击实试验结果,根据规范中 T0844—2009 的方法进行梁式试件的成型,此次研究中弯拉试验与疲劳试验均采用中梁试件(100 mm×100 mm×400 mm)。并按照 JTG E51—2009 中 T0845—2009 进行标准养生,龄期 90 d,最后 1 d 浸水。按照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0851—2009 试验方法开展分点加压弯拉强度试验。试验前的准备工作是先将球形支座以及左右两个圆柱体压头涂上机油,使得支座可以灵活地转动。将梁式试件放置在压块上,并注意保持荷载加载的方向使成

型时的压力方向一致。荷载加载时保持恒定的加载速率 50 mm/min,直到试件破坏,确定在 4 种不同应力比(0.70、0.75、0.80、0.85)下的疲劳试验荷载。按照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0856—2009 试验方法开展无机结合料稳定材料疲劳试验,其中采用应力控制加载模式,施加正弦波荷载,加载频率为 10 Hz。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 无侧限抗压强度

通过测定 20 种方案的水泥稳定再生混合料 7 d 无侧限抗压强度,其结果见图 2。

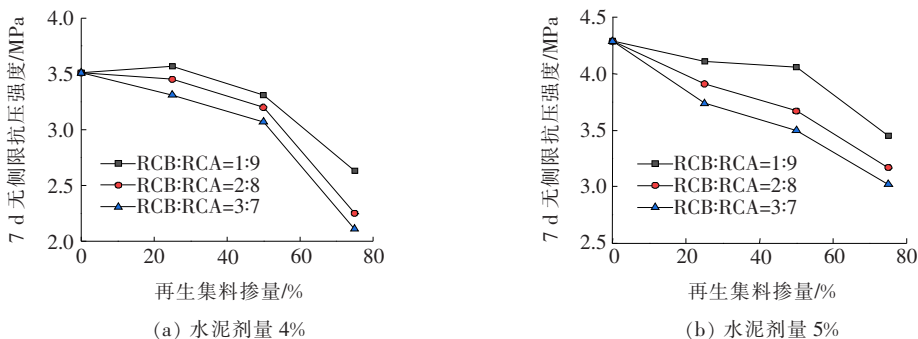


图 2 不同水泥剂量下水泥稳定再生混合料 7 d 无侧限抗压强度

由图 2 可知:水泥稳定再生混凝土 7 d 无侧限抗压强度随着水泥剂量的增大逐渐增大。对于再生集料掺量为 25%,砖混凝土比例为 1:9 的情况,水泥剂量从 4%增至 5%时,7 d 无侧限抗压强度从 3.57 MPa 增至 4.31 MPa,增加了 20.73%。且随着再生集料掺量及砖混凝土比例的增加,7 d 无侧限抗压强度增长率逐渐增大。在再生集料掺量为 75%,砖混凝土比例为 3:7 的情况,其增长率为 43.13%。随着再生集料掺量的增加,水泥稳定再生混合料 7 d 无侧限抗压强度逐渐减小。水泥剂量为 4%的情况下,砖混凝土比例为 1:9,再生集料掺量从 25%增加到 50%,7 d 无侧限抗压强度减小 7.28%,从 50%增加到 75%,7 d 无侧限抗压强度减小 20.54%。再生集料掺量从 25%到 50%,无论对应哪种砖混凝土比例,7 d 无侧限抗压强度变化较为恒定,且变化率维持在 7.26%左右,而再生集料掺量从 50%到 75%时,7 d 无侧限抗压强度变化明显,且随着砖混凝土比例的增加,变化率增大。在相同再生集料掺量下,随着砖混凝土比例的增大,7 d 无侧限抗压强度逐渐减小。再生集料掺量为 50%时,其变化率为 3.32%、4.06%;再生集料掺量为 75%

时,其变化率分别为 14.45%、40.67%。由此可见,随着再生集料掺量的增加,砖混凝土比例对于水泥稳定再生混合料的强度性能影响逐渐明显,这是由于再生集料掺量增加,在同样砖混凝土比例的情况下,试件中实际的再生砖集料增多。而由表 1 中粗集料基本性能试验可以得到,再生砖集料吸水率高,空隙率大,强度也较差,所以在掺量过多时,会使得混合料的强度明显下降。

在 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中对不同结构层(基层、底基层),在交通荷载(极重、特重、重、中等、轻)下,不同的公路等级(高级公路、一级公路、二级公路、二级以下公路)中水泥稳定类材料的 7 d 无侧限抗压强度进行了规定。根据图 2 无侧限抗压强度试验结果,可以得到在重交通荷载作用下,不同公路等级及结构层所对应的水泥剂量,再生集料掺量以及砖混凝土方案适配方案,见图 3。

同时也可以根据当地建筑固体废弃物再生集料的砖混凝土比例情况,以及路面的设计等级因地制宜选择合适的施工方案,同时可以得到在除重交通以外的其他荷载等级所对应的推荐方案,见表 3。

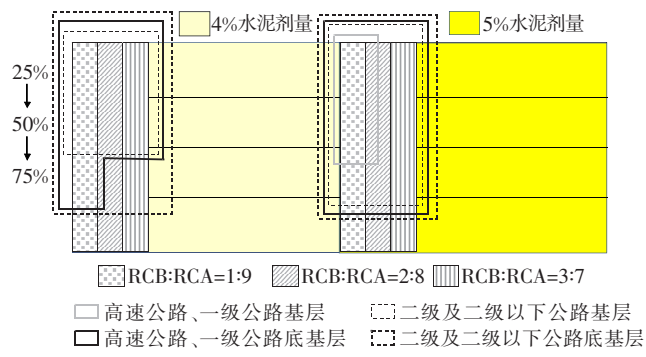


图 3 重交通荷载作用下不同公路等级及结构层建议方案

3.2 弯拉强度

通过测定不同水泥剂量下水泥稳定再生混合料 90 d 弯拉强度,结果见表 4。

由表 4 可知:随着水泥剂量的增大,水泥稳定再生混合料的弯拉强度逐渐增大。对于再生集料掺量为 25%,砖混凝土比例为 1:9 的情况,水泥剂量从 4% 增至 5% 时,弯拉强度增加了 10.91%;对于再生集料掺量为 75%,砖混凝土比例为 3:7 的情况,水泥剂量从 4% 增至 5% 时,弯拉强度增长率为 5.05%。在再生集料掺量低的情况下,水泥剂量对于提高水泥稳定

表 3 基于 7 d 无侧限抗压强度规范值实际路面设计建议方案

应用目标	极重、特重交通			重交通			中等、轻交通		
	C/%	K/%	R	C/%	K/%	R	C/%	K/%	R
A-1	—	—	—	5	25,50	1:9	4	25,50	1:9,2:8,3:7
							5	25,50,75	1:9,2:8,3:7
B-1	5	25,50	1:9	4	25,50	1:9,2:8,3:7	4	75	1:9,2:8,3:7
				5	25,50,75	1:9,2:8,3:7			
A-2	4	25,50	1:9,2:8,3:7	4	75	1:9	4	75	2:8,3:7
	5	25,50,75	1:9,2:8,3:7						
B-2	4	75	1:9	4	75	2:8,3:7	4	75	2:8,3:7

注:高速公路、一级公路基层 A-1;二级及二级以下公路基层 B-1;高速公路、一级公路底基层 A-2;二级及二级以下公路底基层 B-2;C 表示水泥剂量(%);K 表示再生集料掺量(%);R 表示砖混凝土比。

表 4 水泥稳定再生混合料弯拉强度试验结果

再生集料 掺量/%	砖混凝土 比例	4%水泥剂量			5%水泥剂量		
		平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数
		R/MPa	S/MPa	C <sub>v</sub> /%	R/MPa	S/MPa	C <sub>v</sub> /%
0		0.904	0.088	8.035	1.035	0.090	8.196
	1:9	1.027	0.091	8.861	1.139	0.092	8.078
	2:8	0.936	0.101	9.791	1.096	0.094	8.577
25	2:8	0.936	0.101	9.791	1.096	0.094	8.577
	3:7	0.903	0.113	9.514	1.014	0.102	9.059
	1:9	0.931	0.115	9.352	1.056	0.107	9.132
50	2:8	0.910	0.122	9.407	0.969	0.114	9.465
	3:7	0.886	0.133	9.611	0.936	0.131	9.496
	1:9	0.820	0.138	9.529	0.897	0.135	9.350
75	2:8	0.775	0.141	9.794	0.834	0.149	9.466
	3:7	0.753	0.150	9.920	0.791	0.160	9.628

再生混合料的弯拉强度作用显著,水泥剂量从 4% 增加到 5% 的过程中,弯拉强度平均增长率为 13.43%;而再生集料掺量为 50% 时,平均增长率为 8.52%;再生集料掺量为 75% 时,平均增长率为 7.35%。随着再生集料掺量的增大,水泥稳定再生混合料的弯拉强度先增大

后减小。再生集料掺量为 25%,砖混凝土比例不高于 2:8 时,水泥稳定再生混合料的弯拉强度比水泥稳定天然碎石大。

3.3 疲劳寿命

表 5 为疲劳寿命试验结果。

表 5 水泥稳定混合料疲劳寿命试验结果

再生集料 掺量/%	砖混凝 土比例	应力比		疲劳寿命(N)/次			
		$\sigma/s$					
0		0.70	67 452	95 873	170 650	283 214	352 314
		0.75	5 634	21 465	75 321	112 654	234 983
		0.80	1 849	4 563	13 530	54 281	87 273
		0.85	895	1 453	2 034	4 056	8 792
25	1 : 9	0.70	81 456	108 732	194 361	294 212	371 023
		0.75	5 465	23 231	90 123	145 328	382 017
		0.80	3 204	8 038	19 342	58 652	90 184
		0.85	1 032	1 623	2 698	4 870	9 302
	2 : 8	0.70	79 234	104 322	190 231	290 068	367 843
		0.75	5 328	22 872	89 342	144 129	375 674
		0.80	2 867	7 656	18 453	55 739	87 564
		0.85	987	1 543	2 578	4 790	8 784
	3 : 7	0.70	74 006	98 965	184 532	283 643	357 893
		0.75	4 785	20 563	84 567	139 867	368 756
		0.80	2 673	6 435	16 589	48 753	76 459
		0.85	878	1 467	2 356	4 329	7 860
50	1 : 9	0.70	80 567	95 984	180 043	274 272	368 061
		0.75	4 976	19 873	88 749	128 865	358 174
		0.80	2 980	7 633	16 427	46 950	78 148
		0.85	1 001	1 502	2 288	4 873	78 326
	2 : 8	0.70	64 234	84 324	160 153	270 068	357 372
		0.75	5 005	20 236	82 276	119 876	345 430
		0.80	2 678	7 566	15 545	45 739	77 562
		0.85	899	1 438	2 056	4 012	7 584
	3 : 7	0.70	70 065	80 964	155 632	268 643	340 839
		0.75	4 554	18 263	69 567	120 842	340 056
		0.80	2 538	5 235	15 553	33 352	70 954
		0.85	784	1 253	2 183	4 129	7 398
75	1 : 9	0.70	79 081	90 841	168 523	259 237	387 056
		0.75	4 684	18 478	82 359	103 841	309 174
		0.80	2 480	6 837	15 027	39 952	64 147
		0.85	928	1 378	1 983	4 292	70 323
	2 : 8	0.70	60 341	78 435	156 153	268 068	343 393
		0.75	4 862	19 603	78 283	109 872	323 049
		0.80	2 484	7 301	14 642	39 985	75 623
		0.85	796	1 153	1 842	3 862	6 845
	3 : 7	0.70	67 462	78 439	142 532	249 646	321 392
		0.75	3 960	13 342	48 675	10 084	281 321
		0.80	1 930	4 559	9 534	24 521	54 542
		0.85	604	1 006	1 652	3 762	5 489



由表 5 可知:水泥稳定碎石的疲劳寿命结果体现出比较明显的离散性。从能量的角度来分析,疲劳损伤过程实质上是一种能量耗散的过程。其随机性主要体现在材料结构内部以及外部的随机性。材料内部的随机性会导致材料及结构的弹性模量、断裂韧性、弯拉强度等的不唯一性。从外部因素来看,荷载大小以及加载方式、试件成型及养生条件等都会导致结构或材料疲劳性能的随机性。为了更加直观客观地反映材料的疲劳性能,分析多变量下的疲劳性能变化规律,建立更加准确的疲劳方程,宜采用威布尔分布模型进行数据拟合,得到不同方案下水泥稳定再生混合料疲劳拟合方程,见表 6。

表 6 不同方案下水泥稳定再生混合料疲劳拟合方程

再生集料掺量/%	砖混凝土比例	保证率/%	疲劳寿命拟合方程 (保留 3 位小数)
0		50	$\lg N = 13.622 - 11.999 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.857 - 11.999 \sigma/s$
	1:9	50	$\lg N = 13.482 - 11.722 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.182 - 11.999 \sigma/s$
25	2:8	50	$\lg N = 13.526 - 11.801 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.279 - 11.801 \sigma/s$
	3:7	50	$\lg N = 13.638 - 11.986 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.484 - 11.986 \sigma/s$
	1:9	50	$\lg N = 12.534 - 10.429 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.065 - 10.429 \sigma/s$
50	2:8	50	$\lg N = 13.511 - 11.853 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.106 - 11.853 \sigma/s$
	3:7	50	$\lg N = 13.568 - 11.951 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.503 - 11.951 \sigma/s$
	1:9	50	$\lg N = 12.766 - 10.7824 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.489 - 10.782 \sigma/s$
	2:8	50	$\lg N = 13.633 - 12.049 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.115 - 12.049 \sigma/s$
75	3:7	50	$\lg N = 13.860 - 12.446 \sigma/s$
		99	$\lg N = 12.765 - 12.446 \sigma/s$

为了更直观地体现水泥稳定再生混合料与再生集料以及砖混凝土比例的变化规律,可以得到不同再生集料掺量下的疲劳寿命拟合曲线,见图 4。

由图 4 可得:在 3 种不同再生集料掺量下,随着砖混凝土比例增大,水泥稳定再生混合料的疲劳寿命逐

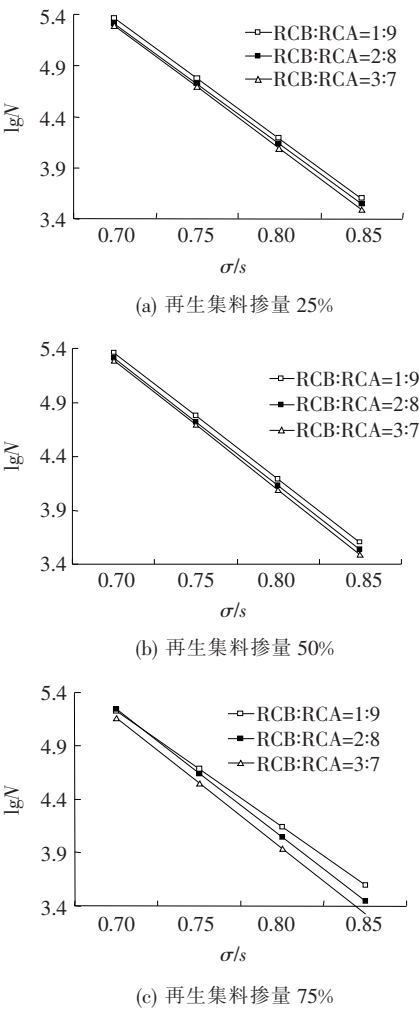


图 4 不同再生集料掺量下的疲劳寿命拟合曲线

渐减小。这是由于再生砖集料孔隙率大,自身强度缺陷明显等原因,导致水泥稳定再生混合料的疲劳寿命降低。因此在实际项目施工过程中,要严格控制再生砖集料的比例。在砖混凝土比例为 1:9、2:8、3:7 时,研究再生集料掺量对于水稳再生混合料疲劳性能的影响。随着再生集料掺量的增加,水泥稳定再生混合料的疲劳寿命先增大后减小。在再生集料掺量为 25%,砖混凝土比例为 1:9 时,对应于 4 种不同的应力比,水泥稳定再生混合料的疲劳寿命均大于其他掺配方案。也就是说一定量的再生集料有利于提高水泥稳定混合料的弯拉强度。这主要是由于再生集料的表面较天然集料更粗糙,与水泥吸附力大;同时再生集料的孔隙率大,一定的空隙有利于在水化反应过程中的散热,从而在 25%再生集料掺量,砖混凝土比例为 1:9 时,水泥稳定再生混合料的疲劳寿命最大,同时疲劳寿命随各砖混凝土比例的变化基本一致。而随着再生

集料不低于 50% 时, 砖混凝土比例越大, 疲劳寿命下降越明显。

## 4 结 论

以建筑废弃物再生集料为主要研究对象, 开展建筑废弃物再生集料基本性能试验, 以及水泥稳定再生混合料的无侧限抗压强度、抗弯拉疲劳性能的研究。探究不同变量对于水泥稳定再生混合料性能的影响规律, 得到在不同等级路面、不同交通等级下基层与底基层的推荐用料方案。

(1) 再生集料的吸水率远大于天然集料, 其中再生粗集料的吸水率为天然集料的 12~18 倍, 再生细集料的吸水率为天然集料的 3 倍左右。对于表观密度, 天然集料大于混凝土再生集料大于再生砖集料。

(2) 随着水泥剂量、再生集料的掺量以及砖混凝土比例的增加, 水泥稳定再生混合料的最大干密度减小, 最佳含水率增大。其中, 砖混凝土比例对其最大干密度和最佳含水率影响较为明显, 主要是由于再生砖集料表面粗糙, 水泥砂浆较多, 空隙率较大, 密度小。

(3) 对于再生集料掺量不超过 75%, 砖混凝土比例不超过 3:7, 在 4% 水泥剂量下水稳再生混合料满足在重交通荷载下二级及二级以下公路底基层的要求。而 5% 水泥剂量下满足中等、轻交通下的高速公路、一级公路基层的要求。

(4) 随着再生集料掺量与砖混凝土比例的增加, 其疲劳寿命差异逐渐加大。再生集料掺量与砖混凝土比例对于水稳再生混合料疲劳寿命的影响曲线呈现良好的线性关系。

## 参考文献:

- [1] Zhang J, Ding L, Li F, et al. Recycled Aggregates from Construction and Demolition Wastes as Alternative Filling Materials for Highway Subgrades in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120—223.
- [2] Hong Yang J X, Julian R. Thompson, Roger J. Flower. Urban Construction and Demolition Waste and Landfill Failure in Shenzhen, China [J]. Waste Management, 2017, 63: 393—396.
- [3] Cesare Sangiorgi C L, Giulio Dondi. Construction and Demolition Waste Recycling: An Application for Road Construction[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2015, 16(6): 530—537.
- [4] Tam V W Y, Soomro M, Evangelista A C J. . A Review of Recycled Aggregate in Concrete Applications (2000—2017) [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 272—292.
- [5] 李培植, 于静涛. 再生细骨料不同取代率对混凝土强度的影响[J]. 公路交通科技, 2012(2).
- [6] 李家豪. 建筑废弃物再生集料路用性能研究[D]. 广州大学硕士学位论文, 2016.
- [7] Etxeberria M, Vazquez E, Mari A, et al. Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process on Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5): 735—742.
- [8] Kezhen Yan G L, Lingyun You, Yubo Zhou, et al. Performance Assessments of Open—Graded Cement Stabilized Macadam Containing Recycled Aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233.
- [9] 刘克非. 建筑垃圾再生骨料用于道路基层的力学与干缩性能试验研究[J]. 中外公路, 2016(5).
- [10] 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(3).
- [11] 孙吉书, 窦远明, 刘熙媛. 水泥路面再生混凝土主要路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报, 2014(1).
- [12] Coelho A, De Brito J. Economic Viability Analysis of a Construction and Demolition Waste Recycling Plant in Portugal—Part I: Location, Materials, Technology and Economic Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 39: 338—352.
- [13] Sampaio C H, Cazaciu 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.
- [14] 刘燕燕, 裴秋波, 李政, 等. 基于博纳帝再生设备的上面层再生混合料性能研究[J]. 中外公路, 2020(4).