

文章编号: 1674-599X(2021)02-0001-07

建筑垃圾再生集料沥青稳定碎石基层性能研究

余琦¹, 许立², 高金仓², 赵丁鑫³, 梁新涛²

(1. 中建桥梁有限公司, 重庆 402260; 2. 三门峡市国道 310 南移项目建设管理有限公司, 河南 三门峡 472000;
3. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 为研究沥青稳定建筑垃圾再生集料的路用性能, 采用贝雷法确定建筑垃圾再生集料沥青稳定碎石的最优配合比, 通过单轴压缩试验、冻融劈裂试验、水稳定试验和车辙试验, 研究再生集料中砖砼集料掺量和砖砼比例变化对沥青稳定碎石基层性能的影响。研究表明: 建筑垃圾再生集料用于沥青稳定碎石基层应控制砖砼集料掺量和砖砼比例; 沥青稳定碎石基层中, 建筑垃圾再生集料掺量宜小于 50%, 砖砼比例宜控制在 1:4 和 2:3, 其再生混合料的水稳定性和力学性能均可满足要求且高温性能有所提高。

关键词: 道路工程; 再生砖砼集料; 沥青稳定碎石基层; 配合比设计

中图分类号: U416.217 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.001

Pavement performance of asphalt treated permeable base using construction waste recycled aggregate

YU Qi¹, XU Li², GAO Jin-cang², ZHAO Ding-xin³, LIANG Xin-tao²

(1.China Construction Bridge Co., Ltd., Chongqing 402260, China; 2.Sanmenxia National Highway 310 south Project Construction Management Co., Ltd., Sanmenxia 472000, China; 3.China Construction Fifth Engineering division Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: In order to study the pavement performance of asphalt-treated permeable base using construction waste recycled aggregate, the Bailey method was used to determine the optimal mix proportion. A series of trials on asphalt-treated permeable base, such as unconfined compressive strength test, freeze-thaw splitting test, water stability test and rutting test, were done. The influence of parameters of recycled aggregate, such as the mixing amount of brick and concrete, the proportion of recycled aggregate, on pavement performance was analyzed. The results show that, the content and proportion of brick and concrete in recycled aggregate should be controlled. The content of recycled aggregate in asphalt stabilized macadam should be less than 50%, and the proportion of brick and concrete should be controlled from 1:4 to 2:3. Compared with the asphalt stabilized macadam without recycled aggregate, the water stability and mechanical strength can meet the requirement, and the high temperature performance of recycled mixture is improved.

Key words: road engineering, recycled brick and concrete aggregate, asphalt-treated permeable base, mix design

收稿日期: 2020-10-07

基金项目: 中原千人计划-中原科技创新领军人才项目资助(204200510004)

作者简介: 余琦(1986-), 男, 中建桥梁有限公司工程师。

公路建设需消耗大量碎石集料,尤其是高速公路平均每公里需要碎石集料高达 2 000 t,加剧了生态环境的破坏。随着城镇化建设持续推进,由于房屋改造和道路改扩建,中国每年产生了约 15 亿吨的建筑垃圾,占年产垃圾总量的 40%。经过加工筛分处理后的建筑垃圾可以替代天然集料,满足公路工程建设需求,有助于解决石料开采和建筑垃圾堆存引起的生态环境问题,因此许多学者针对建筑垃圾在公路工程领域的应用进行了研究。刘峰^[1]等人研究发现,通过控制再生料中混凝土与砖渣的比例,可以实现建筑垃圾在不同交通等级的道路基层、底基层的应用。虞磊^[2]等人对不同水泥剂量和混砖比的水泥稳定再生集料进行无侧限抗压强度等试验,结果表明:水泥剂量一定时,再生集料的强度与废弃混凝土掺量成正比,与废弃砖集料掺量成反比。当废弃砖集料掺量不超过 50%时,各项指标均能满足路面基层、底基层的施工要求。李玉梅^[3]等人对影响建筑废弃物再生混合料的击实特性和力学特性的因素进行分析,发现随着再生骨料用量的增加,混合料的最大干密度和无侧限抗压强度减小,最佳含水量增加,试验数据稳定性会减弱。当水泥用量为 3%~4%时,采用粒径为 5~10 mm 再生骨料的混合料,其抗压强度满足底基层强度的要求。左洁^[4]通过对不同水泥掺量的再生混合料和水泥稳定碎石的 7 d 无侧限抗压强度和干缩特性进行对比分析,发现水泥剂量为 4.5%的再生骨料用于二级公路基层填筑。杨锐^[5-6]等人对建筑垃圾路基填料的干缩性能、路面结构力学性能等进行研究,验证了建筑垃圾在道路基层中应用的可行性。贾艳东^[7]等人对再生砖骨料沥青混合料进行试验,发现沥青砖骨料混合料可满足低等级公路沥青路面的施工要求,但水稳定性偏低,建议使用在交通荷载较少的人行道、广场、农村道路等沥青路面。

沥青稳定碎石基层具有较好的柔韧性和应力扩散能力,可有效减少反射裂缝的产生和发展^[8-9]。由于砖渣废弃物处理后,再生集料与天然集料的性能存在差异^[10-13],再生砖渣集料掺量和再生砖与再生砂的比例(以下简称“砖砂比例”)会对再生混合料性能产生较大影响。因此,作者拟对不同再生砖渣集料掺量和砖砂比例的混合料力学性能、水稳定性和高温稳定性进行试验研究,确定再生砖渣集料最佳掺量及砖砂比例,以期再生砖渣集料在沥青

稳定碎石基层中的应用提供参考。

1 原材料

1.1 天然碎石

天然集料采用石灰岩,级配见表 1,其他相关性能指标满足《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)》^[14]规范的要求。

表 1 天然集料筛分结果

筛孔尺寸/mm	A	B	C	D
31.500	100.0	100.0	100.0	100.0
26.500	100.0	100.0	100.0	91.3
19.000	100.0	100.0	80.9	27.6
16.000	100.0	100.0	62.8	15.3
13.500	100.0	100.0	38.4	9.1
9.500	100.0	99.7	9.9	1.0
4.750	96.2	7.8	0.5	0.5
2.360	89.4	1.3	0.5	0.1
1.180	67.7	1.3	0.5	0.1
0.600	43.2	1.3	0.5	0.1
0.300	25.1	1.3	0.5	0.1
0.150	12.8	1.3	0.5	0.1
0.075	8.2	1.3	0.5	0.1

注: A 的粒径范围为 0~4.75 mm; B 的粒径范围为 4.75~9.5 mm; C 的粒径范围为 9.5~19 mm; D 的粒径范围为 19~26.5 mm

1.2 再生砖渣集料性能

本试验使用的再生集料中废弃混凝土约占 70%,废弃砖块约占 10%。再生砂、再生砖的表观相对密度、吸水性、砂当量、棱角性、坚固性分别为: 2.49、5.75%、85.60%、49.70%、2.59%; 2.40、17.19%、81.00%、47.20%、2.46%。再生砖、砂集料的筛分结果见表 2,粗集料性能指标见表 3。

由表 2 可知,再生砂集料和再生砖集料的颗粒级配筛分结果基本相同,因为这 2 种再生集料是由建筑垃圾经破碎、分拣而来,生产加工工艺和设备相同,使得 2 种再生材料的级配基本一致,当砖砂比例变化时,再生集料级配变化不大。

由表 3 可知,相对于天然集料,再生砖、砂集料的密度较小,吸水率较大,压碎值偏大。

1.3 沥青

本试验采用 AH-70 沥青,其余各项性能均符合

表 2 再生砖、砼集料筛分结果

Table 2 Screening results of recycled brick concrete aggregate

筛孔尺寸/mm	再生砼集料				再生砖集料			
	A	B	C	D	A	B	C	D
31.500	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
26.500	100.0	100.0	100.0	78.6	100.0	100.0	100.0	79.2
19.000	100.0	100.0	79.3	20.3	100.0	100.0	79.6	21.4
16.000	100.0	100.0	66.7	8.6	100.0	100.0	66.9	9.2
13.500	100.0	100.0	37.3	3.2	100.0	100.0	37.7	4.1
9.500	100.0	81.2	2.6	1.4	100.0	81.5	3.2	1.9
4.750	88.2	11.6	1.5	0.4	88.5	10.8	1.9	0.8
2.360	67.1	8.2	1.0	0.2	67.3	7.1	0.8	0.5
1.180	42.3	6.5	0.6	0.1	42.1	5.5	0.4	0.4
0.600	30.4	5.6	0.4	0.1	30.2	4.6	0.2	0.4
0.300	15.1	0.7	0.1	0.0	14.2	0.8	0.2	0.0
0.150	6.4	0.7	0.0	0.0	6.7	0.8	0.2	0.0
0.075	2.1	0.7	0.0	0.0	2.4	0.8	0.0	0.0

表 3 再生砖、砼集料性能指标

Table 3 Performance index of coarse aggregate and fine aggregate of recycled brick concrete

指标	再生砼集料				再生砖集料			
	表观相对密度	石料压碎值/%	针片状/%	吸水率/%	表观相对密度	石料压碎值/%	针片状/%	吸水率/%
B	2.49	26.2	7.9	5.73	2.40	28.7	7.5	17.28
C	2.50	26.5	7.2	5.46	2.42	29.5	6.5	16.62
D	2.52	27.5	3.6	5.53	2.43	29.6	3.3	14.71

《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)》的要求。

1.4 填料

填料为石灰岩矿粉, 亲水系数、塑性指数等性能指标均满足《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)》的要求。

2 再生砖砼集料沥青稳定碎石基层配合比设计

2.1 基于贝雷法的级配设计

再生集料具有吸水率高、强度低、压碎值高的特点, 选用连续级配 ATB-25 作为设计级配, 以保证集料间形成嵌挤-密实结构。采用贝雷法设计理论对沥青稳定再生砖砼集料(再生砼: 再生砖=1: 1)和天然集料(碎石)进行了配合比设计, 合成级配见表 4。

从表 4 中可以看出, ①该配合比下, 沥青稳定碎石和沥青稳定再生集料的配合比设计均能满足现行《公路沥青路面施工技术规范(JTCF40—2004)》

表 4 沥青稳定天然集料和再生砖砼集料(ATB-25)合成级配表

Table 4 Composite gradation table of asphalt stabilized original aggregate and recycled brick concrete aggregate (ATB-25)

筛孔尺寸/mm	混合料合成级配/%		级配范围/%
	沥青稳定碎石	沥青稳定再生集料	
31.500	100.0	100.0	100
26.500	97.0	92.6	90~100
19.000	69.9	67.2	60~80
16.000	61.1	59.8	48~68
13.500	52.8	50.7	42~62
9.500	42.9	39.1	32~52
4.750	28.2	26.9	20~40
2.360	25.5	20.7	15~32
1.180	19.9	13.9	10~25
0.600	13.5	10.7	8~18
0.300	8.8	5.9	5~14
0.150	5.5	3.7	3~10
0.075	4.1	2.4	2~6

注: D:C:B:A:矿粉=35:25:12:26:2

中 ATB-25 的级配要求; ②沥青稳定天然碎石的各档筛孔通过率均大于沥青稳定再生集料, 表明: 沥

青稳定天然碎石的颗粒组成较沥青稳定再生集料的偏细。因此, 沥青稳定碎石中掺入一定比例的再生集料时, 随着掺量提高和混合料级配变粗, 混合料级配曲线介于沥青稳定再生集料和沥青稳定级配碎石之间。

采用贝雷法 CA 值、FA_c 值、FA_f 值 3 个检验参数对合成级配检验时, CA 值范围为 0.4~0.6, FA_c 值比值范围为 0.4~0.6, FA_f 值范围宜为 0.3~0.6^[12-13], 检验参数计算式为:

$$CA = \frac{P_{D/2} - P_{PCS}}{100 - P_{D/2}} \quad (1)$$

式中: $P_{D/2}$ 为 $D/2$ 粒径的筛孔通过率; D 为集料的公称最大粒径; P_{PCS} 为第一控制筛孔通过率; ATB-25 为 4.75 mm 筛孔通过率。

$$FA_c = \frac{P_{SCS}}{P_{PCS}} \quad (2)$$

式中: P_{SCS} 为第二控制筛孔通过率; ATB-25 为 1.18mm 筛孔通过率。

$$FA_f = \frac{P_{TCS}}{P_{SCS}} \quad (3)$$

式中: P_{TCS} 为第三控制筛孔通过率; ATB-25 为 0.3 mm 筛孔通过率。

采用式(1)~(3)对沥青稳定碎石和再生砖砟集料的 CA、FA_c、FA_f 值进行计算, 计算结果表明: 3 个检验参数值均在合理范围内, 混合料能够形成骨架嵌挤结构。

2.2 最佳油石比确定

按照确定的级配, 在混合料中分别掺入 25%、50%、75%、100% 的再生砖砟集料。按照马歇尔配合比设计方法, 确定不同再生砖砟集料掺量和砖砟比例的混合料最佳油石比和相关性能指标, 试验结果见表 5。

由表 5 可知, 对于不同再生集料掺量和砖砟比的沥青稳定碎石, 各项技术指标均满足现行规范要求。砖砟比一定时, 随着再生集料掺量增加, 最佳油石比增加, 稳定度减小, 流值增大。再生集料掺量由 25% 增加到 100% 时, 沥青稳定碎石的孔隙率、矿料间隙率先增大后减小, 沥青饱和度先减小后增大。当再生集料掺量一定时, 随着砖砟比例增加, 最佳油石比、流值、孔隙率、矿料间隙率增大,

表 5 最佳油石比及相关性能指标

Table 5 Optimum asphalt aggregate ratio and performance indexes

砖砟比	再生集料掺量/%	油石比/%	稳定度/kN	流值/mm	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%
0:10	0	3.60	14.86	2.23	4.40	12.50	63.31
0:10	25	3.72	13.17	2.79	3.77	11.78	67.95
0:10	50	4.11	12.53	3.13	4.10	12.70	67.52
0:10	75	4.21	11.46	3.30	4.99	13.61	63.21
0:10	100	4.34	11.39	3.35	4.86	13.75	64.41
2:8	0	3.60	14.86	2.23	4.40	12.50	63.31
2:8	25	3.76	12.94	2.82	3.83	11.91	66.72
2:8	50	4.15	11.92	3.18	4.35	12.93	66.63
2:8	75	4.26	11.04	3.36	5.14	13.78	62.80
2:8	100	4.38	10.96	3.39	5.02	13.89	63.99
4:6	0	3.6	14.86	2.23	4.40	12.50	63.31
4:6	25	3.82	12.67	3.01	3.85	12.03	66.34
4:6	50	4.23	11.24	3.33	4.57	13.27	65.76
4:6	75	4.31	10.60	3.42	5.19	13.93	62.52
4:6	100	4.41	10.51	3.43	5.10	14.03	63.46
6:4	0	3.60	14.86	2.23	4.40	12.50	63.31
6:4	25	3.85	12.14	3.31	4.07	12.27	65.94
6:4	50	4.27	10.74	3.52	4.83	13.56	64.54
6:4	75	4.35	10.13	3.71	5.35	14.10	61.98
6:4	100	4.43	10.00	3.73	5.30	14.21	62.60
规范 ^[14] 要求			≥7.50	1.5~40	3~6	孔隙率 4%, ≥12; 孔隙率 5%, ≥13。	55~70

稳定度、沥青饱和度减小。该结果表明: 再生集料掺量及砖砂比例均会使最佳油石比增大, 稳定度减小。这是由于再生砖砂集料比天然集料吸水率大, 从而导致集料吸附较多沥青, 有效沥青减少, 油石比增加。

3 再生砖砂集料沥青稳定碎石基层性能

3.1 力学性能

沥青稳定碎石基层的重要力学性能指标有抗压强度、回弹模量与劈裂抗拉强度等。力学强度主要取决于集料之间形成的嵌挤作用和摩阻作用、集料与沥青之间的黏附作用和沥青胶结料的黏结性。再生集料与天然集料掺量的变化会对混合料的性

能产生影响, 所以对不同再生砖砂集料掺量和不同砖砂比例沥青稳定碎石的路用性能指标进行了研究。

3.1.1 抗压强度与回弹模量

采用单轴压缩试验对再生砖砂集料沥青稳定碎石的抗压强度与回弹模量进行了测试, 试验结果如图 1 所示。

从图 1 中可看出, 当再生砖砂比例分别为 0 : 10、1 : 4、2 : 3、3 : 2, 再生集料掺量由 25% 增加到 100% 时, 混合料抗压强度分别降低了 14.4%、22.7%、37.5%、53.0%, 回弹模量分别降低了 29.0%、40.9%、60.7%、79.1%。表明: 再生砖砂集料掺量和砖砂比例的增加对再生混合料的抗压强度和回弹模量产生不利影响。这主要是由于再生砖砂集料掺量及再生砖砂集料含量增加, 再生砖砂集料强度和密度较

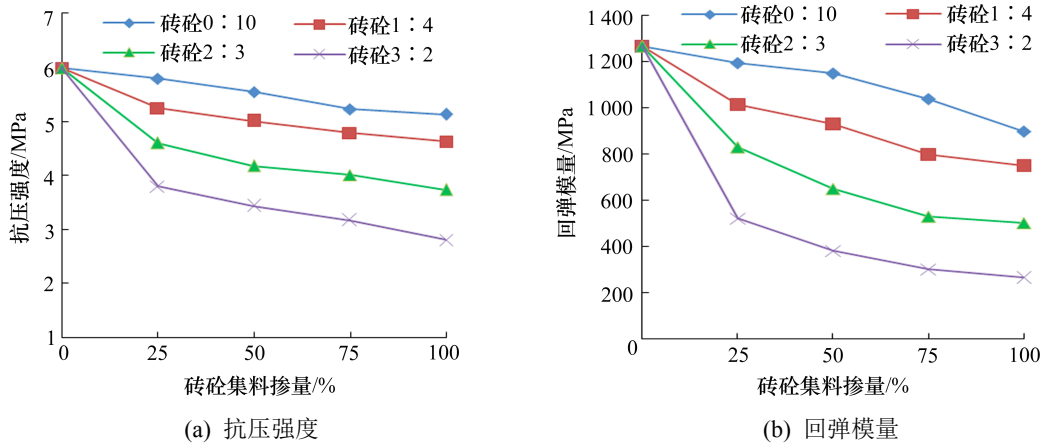


图 1 混合料抗压强度和回弹模量

Fig. 1 Compressive strength and resilient modulus of mixture

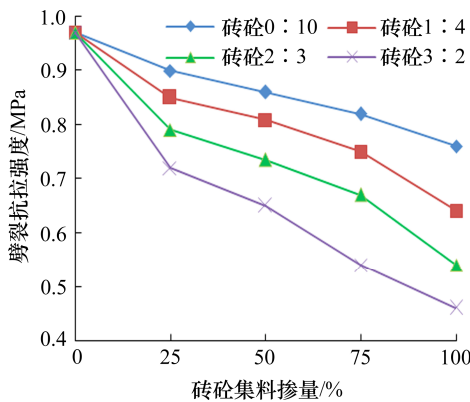


图 2 混合料劈裂抗拉强度

Fig. 2 Splitting tensile strength of mixture

低, 吸水率较大, 导致混合料内部闭口孔隙较多, 力学强度降低。

3.1.2 劈裂抗拉强度试验

参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程 (JTG E20—2011)》对再生砖砂集料沥青稳定碎石混合料进行了劈裂强度试验, 结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 随着再生集料掺量和砖砂比例增加, 混合料劈裂抗压强度均逐渐降低。相同再生集料掺量下, 砖砂比例越高, 劈裂抗压强度降低幅度越大; 砖砂比例一定时, 再生集料掺量增加, 劈裂抗拉强度降低幅度也越大。这是由于与天然集料相比, 再生砖砂集料吸水率较大, 强度较低, 且再生集料与沥青粘附性较低。

3.2 水稳定性

水稳定性是确保公路路面基层质量的重要指标之一。本试验参照《公路沥青路面施工技术规范

(JTGF40—2004)》中基质沥青混合料的水稳定性要求^[15],采用残留稳定性和冻融劈裂强度比作为评价再生砖砟集料沥青稳定碎石水稳定性的指标,试验结果分别如图 3、4 所示。

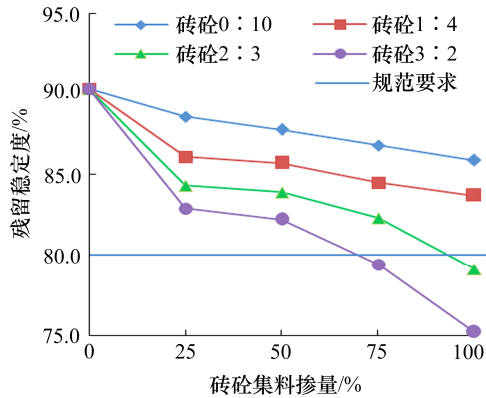


图 3 残留稳定度

Fig. 3 Residual stability

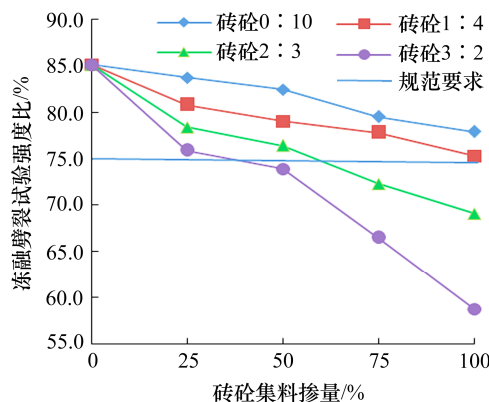


图 4 冻融劈裂强度比

Fig. 4 Frozen-thaw splitting strength ratio

从图 3、4 中可以看出,随着再生集料掺量和砖砟比例增加,混合料残留稳定性和冻融劈裂强度比均逐渐降低。相同再生砖砟集料掺量下,砖砟比例越高,残留稳定性和冻融劈裂强度比降低的幅度越大。当砖砟比例为 2:3,再生砖砟集料掺量大于 65%,以及砖砟比例为 3:2,再生砖砟集料掺量大于 50%时,再生混合料冻融劈裂强度比小于 75%,均不满足规范要求。

3.3 高温稳定性能

高温环境下,柔性基层容易软化,从而导致沥青路面发生车辙病害。因此,本研究采用动稳定度和车辙深度作为评价指标,对沥青稳定建筑垃圾再生集料高温性能进行了研究,结果如图 5、6 所示。

从图 5、6 中可以看出,随着再生集料掺量增

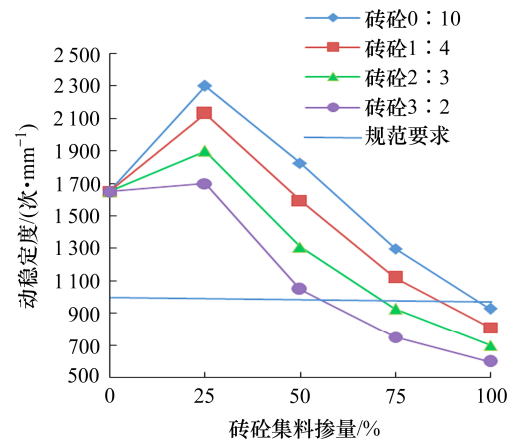


图 5 动稳定度

Fig. 5 Dynamic stability

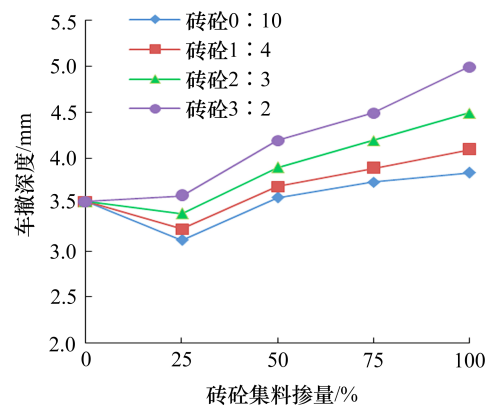


图 6 车辙深度

Fig. 6 Rut depth

加,混合料动稳定度先增加后减小,车辙深度先减小后增加;随着砖砟比例增加,混合料动稳定度逐渐减小,车辙深度逐渐增加。当再生集料掺量为 25%时,混合料动稳定度比未掺加再生集料的天然集料混合料动稳定度有所提高。当砖砟比小于 2:3 时,车辙深度减小,再生砖砟混合料性能提升。当再生砖砟掺量为 50%,砖砟比 1:4 时,混合料动稳定度和车辙深度与未掺加再生集料的混合料相当。当再生砖砟集料掺量大于 50%,砖砟比大于 1:4 时,混合料高温性能低于未掺加再生料的混合料性能。当混合料动稳定度大于 1000 次/mm 时,柔性基层具有较好的抗车辙能力。因此,当砖砟比例为 1:4 时,再生砖砟集料掺量宜小于 80%;砖砟比例为 2:3 时,再生砖砟集料掺量宜小于 70%;当砖砟比例为 3:2 时,再生砖砟集料掺量宜小于 50%。

再生砖砟集料掺量和砖砟比例对混合料高温性能的影响规律,主要是由于再生砖砟集料表面粗

糙, 骨料之间摩阻力和混合料抗变形能力增加, 再生砖砣集料强度比天然集料的低。当再生砖砣集料继续增加, 会导致混合料强度降低。轮碾仪车轮反复碾压作用下, 混合料易发生破碎变形, 造成动稳定度降低, 车辙深度增加。

4 结论

通过对再生砖砣集料性能及不同再生砖砣集料掺量和砖砣比例的再生混合料性能进行试验研究, 得出结论:

1) 随着再生集料掺量和砖砣比例增加, 混合料最佳油石比增加, 稳定度减小, 其他指标出现明显波动, 但各项指标均满足施工规范的相关要求, 能够用于 ATB-25 基层铺筑。

2) 再生砖砣集料掺量和砖砣比例的增加, 对再生混合料的抗压强度和回弹模量产生不利影响。再生砖砣集料掺量越高, 砖砣比例越大, 混合料抗压强度和回弹模量降低幅度越大。

3) 为保证再生混合料水稳定性能, 砖砣比例为 2 : 3 时, 再生砖砣集料掺量宜小于 65%; 砖砣比例为 3 : 2 时, 再生砖砣集料掺量宜小于 50%。

4) 为保证混合料的抗车辙性能, 再生砖砣掺量宜小于 50%, 砖砣比例宜为 1 : 4~2 : 3。与未掺加再生集料的原混合料相比, 该掺量范围下再生混合料高温性能提高或相当。

参考文献(References):

- [1] 刘峰, 刘海涛, 封栋杰. 建筑垃圾混合再生料道路基层应用试验研究[J]. 四川建材, 2020, 46(11): 140-141. (LIU Feng, LIU Hai-tao, FENG Dong-jie. Experimental study on the application of recycled construction waste mixture in road base[J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(11): 140-141. (in Chinese))
- [2] 虞磊, 刘卫东, 钱耀丽, 等. 建筑垃圾再生集料作为道路基层材料的性能研究[J]. 中国水运, 2020, 20(3): 251-253. (YU Lei, LIU Wei-dong, QIAN Yao-li, et al. Study on performance of road base material using recycled aggregate of construction waste[J]. China Water Transport, 2020, 20(3): 251-253. (in Chinese))
- [3] 李玉梅, 栗威, 王自浩. 建筑废弃物再生水泥稳定基层的配合比设计与力学性能[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(7): 52-57. (LI Yu-mei, LI Wei, WANG Zi-hao.

Mixing proportion design and mechanical properties of building waste for regeneration of cement stabilized base[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36(7): 52-57. (in Chinese))

- [4] 左洁. 建筑废弃物在水稳碎石基层再利用技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. (ZUO Jie. Construction waste stabilized gravel base in water reuse technology research [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese))
- [5] 杨锐, 宁培淋, 刘浩, 等. 无机结合料稳定的建筑垃圾路基填料干缩性能研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(6): 29-31. (YANG Rui, NING Pei-lin, LIU Hao, et al. Study on dry shrinkage performance of subgrade filled with construction waste stabilized by inorganic binder[J]. New Building Materials, 2016, 43(6): 29-31. (in Chinese))
- [6] 顾万, 肖鹏, 杨宇轩, 等. 再生水泥稳定碎石基层材料收缩及疲劳性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(12): 95-100. (GU Wan, XIAO Peng, YANG Yu-xuan, et al. Experimental study on shrinkage and fatigue properties of macadam base materials stabilized by recycled cement[J]. China Concrete and Cement Products, 2018(12): 95-100. (in Chinese))
- [7] 贾艳东, 刘俊杰, 韩硕, 等. 再生砖骨料沥青混合料性能研究[J]. 工程与建设, 2016, 30(5): 666-668. (JIA Yan-dong, LIU Jun-jie, HAN Shuo, et al. Study on performance of recycled brick aggregate asphalt mixture[J]. Engineering and Construction, 2016, 30(5): 666-668. (in Chinese))
- [8] 陈智蓉, 严军. 橡胶沥青稳定碎石基层材料性能研究[J]. 公路, 2017, 62(1): 206-208. (CHEN Zhi-rong, YAN Jun. Study on properties of rubber asphalt stabilized macadam base materia[J]. Highway, 2017, 62(1): 206-208. (in Chinese))
- [9] 冯新军, 郝培文, 查旭东. 沥青稳定碎石基层抗反射裂缝能力评价方法[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 6-11. (FENG Xin-jun, HAO Pei-wen, ZHA Xu-dong. Evaluating method on resisting reflective cracking ability of asphalt stabilized macadam base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 6-11. (in Chinese))
- [10] 秦仁杰, 李本鹏, 侯湘泉, 等. 沥青稳定碎石基层级配比选及路用性能研究[J]. 中外公路, 2013, 33(2): 51-54. (QIN Ren-jie, LI Ben-peng, HOU Xiang-quan, et al. Study on mix selection and road performance of asphalt stabilized macadam[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(2): 51-54. (in Chinese))

(下转至第 97 页)

- Science Edition), 2007,27(6):63-66.(in Chinese))
- [7] 施文彬,颜东煌,许红胜,等.大跨度板桁结合斜拉桥施工阶段温差效应研究[J].交通科学与工程,2017,33(2):37-42.(SHI Wen-bin, YAN Dong-huang, XU Hong-sheng, et al. Study on temperature difference effect of long-span plate-truss combined cable-stayed bridge during construction[J].Journal of Transport Science and Engineering,2017,33(2):37-42.(in Chinese))
- [8] 张德平,周健鸿,王东晖.赤壁长江公路大桥主桥主梁设计[J].桥梁建设,2019,49(4):81-85.(ZHANG De-ping, ZHOU Jian-hong,WANG Dong-hui.Design of main girder of Chibi Changjiang river highway bridge[J]. Bridge Construction,2019,49(4):81-85.(in Chinese))
- [9] 赵雷,孙才志,陈文元.大跨度组合梁斜拉桥的参数敏感性分析[J].世界桥梁,2011,39(6):38-41.(ZHAO Lei,SUN Cai-zhi,CHEN Wen-yuan.Analysis of parameter sensitivity of long span composite girder cable-stayed bridge[J].World Bridges,2011,39(6):38-41.(in Chinese))
- [10] 黄侨.桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M].北京:人民交通出版社,2004.(HUANG Qiao. Design principle of bridge steel-concrete composite structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [11] 颜东煌.斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D].长沙:湖南大学,2001.(YAN Dong-huang. Determining of reasonable design states and construction controlling of cable-stayed bridges[D]. Changsha: Hunan University, 2001. (in Chinese))
- [12] 颜东煌,陈常松,涂光亚.混凝土斜拉桥施工控制温度影响及其现场修正[J].中国公路学报,2006,19(4):71-76.(YAN Dong-huang, CHEN Chang-song, TU Guang-ya. Temperature influence and its field correction during construction control of concrete cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 71-76.(in Chinese))

(上接第7页)

- [11] 张宜洛,陈阳阳,李晨,等.干法掺入煤液化残渣沥青稳定碎石基层材料性能[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(11):47-51.(ZHANG Yi-luo,CHEN Yang-yang, LI Chen, et al. Performance of coal liquefied residue asphalt stabilized gravel base materials with dry mixing method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science,2018,37(11):47-51.(in Chinese))
- [12] 袁玲,魏汝明,黄兴,等.ATB-25混合料级配优化设计与路用性能研究[J].公路,2014,59(3):133-139.(YUAN Ling, WEI Ru-ming, HUANG Xing, et al. Optimization design and road performance research on gradation of ATB-25 mixture[J]. Highway, 2014, 59(3): 133-139. (in Chinese))
- [13] 张凌云,金成,贾小龙,等.基于AC-13沥青混凝土的贝雷法级配设计研究[J].公路,2018,63(11):105-109.(ZHANG Ling-yun, JIN Cheng, JIA Xiao-long, et al. Study on Bailey method gradation design of AC-13 asphalt concrete[J]. Highway, 2018, 63(11): 105-109.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国交通部. JTG F 40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].北京:人民交通出版社,2004.(Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG F 40—2004,Technical specification for construction of highway asphalt pavements[S]. Beijing: China Communications Press,2004.(in Chinese))
- [15] 韩先瑞,张宝虎,余天航,等.铁尾矿沥青混合料水稳定性试验研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):6-10.(HAN Xian-rui, ZHANG Bao-hu, YU Tian-hang, et al. Experimental study on the moisture stability of the asphalt mixture with iron tailings[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 6-10.(in Chinese))