

RAP 粒径对水泥稳定再生混合料的性能影响研究

李秀君¹, 陈亚雄¹, 拾方治^{1,2}, 刘端阳³, 高种晟¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院 上海 200093; 2. 嘉兴市高新交通技术测评研究院 嘉兴 314001;

3. 浙江省嘉兴市公路管理局 嘉兴 314001)

摘要: 为了研究旧沥青混凝土对水泥稳定再生混合料的性能影响,拟定了4种粒径范围的RAP替代相同粒径范围的RBP集料,对比采用骨架密实级配和悬浮密实级配的再生混合料,通过室内力学试验进行分析,并利用电子显微镜对RAP替代不同粒径RBP的混合料界面进行观察.试验结果表明:采用骨架密实和悬浮密实级配的混合料,当RAP替代粒径大于4.75 mm,随着RAP替代粒径的增大,再生混合料的强度、模量均有明显降低,干燥收缩系数逐渐增大.粒径范围为2.36~4.75 mm的RAP集料替代相同粒径范围的RBP集料,采用骨架密实级配的水泥稳定再生混合料,强度和模量降低幅度较小,同时干燥收缩系数有明显提高,RAP粒径越小,RAP与RBP界面融合程度越高.

关键词: 道路工程;全深式水泥稳定再生混合料;RAP粒径;再生基层

中图分类号: U 416.217 **文献标志码:** A

Effect of RAP Diameter on the Performance of Cement Stabilized Regeneration Mixture

LI Xiujun¹, CHEN Yaxiong¹, SHI Fangzhi^{1,2}, LIU Duanyang³, GAO Zhongsheng¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Jiaxing Hi-tech Communication Evaluation Institute, Jiaxing 314001, China;

3. Highway Administration Bureau of Jiaxing City in Zhejiang Province, Jiaxing 314001, China)

Abstract: Four kinds of diameter scopes of RAP (reclaimed asphalt pavement), which were prepared to replace RBP (reclaimed base pavement) in the same diameter scope, were designed for the cement stabilized recycled mixture, in order to study the impact of old asphalt concrete on the performance of recycled mixture. The performances of the regeneration mixtures of skeleton dense gradation and suspended dense gradation were compared by indoor mechanics tests, and at the same time the electron microscope was used to observe the interface of the mixtures in which RBP was replaced by different partical sizes RAP. The results show that the strength and modulus of the regeneration mixture decreases and the drying shrinkage coefficient increases with the aggrandizement of the diameter of RAP substitution, when the RAP diameter is larger than

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 浙江省公路管理局科技计划项目(2016-2-13)

第一作者: 李秀君(1976-),女,副教授.研究方向: 沥青路面结构与路面材料研究、沥青路面冷再生技术研究. E-mail: junzixiu@163.com

4.75 mm. The strength and modulus of the cement stabilized aggregate of skeleton dense gradation decrease slightly, while the dry shrinkage coefficient is obviously improved, when the diameter scope of RAP is 2.36~4.75 mm. The smaller the particle size of RAP, the easier the fusion at the interface between RAP and RBP.

Keywords: road engineering; full-depth cement stabilized regeneration mixture; diameter of RAP; regeneration base

半刚性基层沥青路面是我国公路的主要结构形式,长期奉行的“强基薄面”的设计方针片面强调半刚性基层的强度.无机结合料稳定粒料基层强度愈高,产生开裂的可能性愈大.而这些产生不同裂缝病害的基层采用水泥稳定半刚性材料再生时,基层的强度仍主要依靠无机结合料剂量,基层板体强度高产生开裂病害的根源并没有解决^[1-4].于是提出了全深式水泥稳定再生基层方法,将老路的沥青面层和基层(或部分基层)一并铣刨后与无机稳定剂就地拌合(或厂拌),形成全深式再生集料,碾压成型后成为新路面的基层或底基层^[5].该工艺的初衷主要是利用旧沥青混凝土中旧沥青的柔性减缓半刚性基层的刚度,提高半刚性基层抗干燥收缩能力,避免或缓解半刚性基层普遍存在的开裂病害^[6-7].

全深式再生基层材料包括 RAP 和 RBP 等原材料,RAP 指旧沥青路面的面层铣刨料,RBP 指旧沥青路面的基层铣刨料.在实际工程应用中,再生混合料设计方法仍沿用水稳混合料的设计方法,将旧沥青混凝土与半刚性基层材料进行级配合成,未考虑旧沥青裹附的矿料与单纯矿料的差异,导致面层和基层材料复合使用时路用性能不佳.本文提出了针对水泥稳定再生混合料“以半刚性材料为骨架,沥青面层细集料作为嵌挤填充的骨架密实结构”的概念,

通过采用不同级配类型,展开 RAP 替代 RBP 试验,分析旧沥青面层材料与半刚性基层材料的最佳结合形式,探讨旧沥青混凝土对水泥稳定再生混合料性能的改善机制.

1 原材料属性与分析方法

1.1 原材料属性

料源取自大中修养护项目某路段,原路面结构形式为 5 cm 沥青面层+17 cm 水稳碎石基层.铣刨机从上至下分别对沥青面层和半刚性基层进行破碎,得到旧沥青面层和半刚性基层破碎料.对半刚性基层破碎料进行筛分,按照《公路水泥稳定碎石基层振动成型法施工技术规范》(DB 33T836-2011) 5.2 中 5 级配、《公路沥青路面基层再生技术规范》(JTJ034-2000) 5.6.2 中 1 号级配,分别合成骨架密实级配和悬浮密实级配的纯基层再生混合料,E1 和 E2 中掺加 RAP 的质量为 0%,级配结果如表 1 所示.对旧沥青面层破碎料进行筛分分档,分为 0~2.36 mm,2.36~4.75 mm,4.75~19 mm,19~31.5 mm 4 档集料,沥青面层破碎料经抽提后计算得到油石比为 3.7%.试验中添加剂采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥.

表 1 纯基层集料的合成级配
Tab.1 Gradation of base aggregate

编号	级配类型	通过下列筛孔(mm)的百分率/%							
		31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
E1	骨架密实级配	100.0	96.5	80.6	49.4	31.3	21.3	11.6	2.4
E2	悬浮密实级配	100.0	95.6	80.2	58.7	41.2	27.4	15.4	1.6

1.2 RAP 替代 RBP 的合成级配

将骨架密实级配和悬浮密实级配的水稳碎石再生集料分为 4 组,对 0~2.36 mm,2.36~4.75 mm,4.75~19 mm,19~31.5 mm 4 种粒径范围的水稳碎石集料,用 RAP 对 RBP 进行相同粒径范围和相

同质量的替换.由于 19~31.5 mm 粒径范围的集料在混合料中所占比例最小,因此,取该档集料占混合料的质量比为统一替代质量,本试验中取 20%,RAP 替换 RBP 后再生混合料的级配如表 2 和表 3 所示(见下页).

表 2 再生混合料合成级配 1
Tab.2 Gradation 1 of regeneration mixtures

编号	RAP 替 RBP 粒径范围/mm	通过下列筛孔(mm)的百分率/%							
		31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
A-1	0~2.36	100.0	94.1	82.3	49.2	31.3	20.8	10.4	4.8
B-1	2.35~4.75	100.0	93.8	82.5	48.7	32.1	17.4	17.3	2.3
C-1	4.75~19	100.0	94.3	84.9	46.0	26.4	21.3	12.1	2.6
D-1	19~31.5	100.0	94.5	78.3	61.6	33.2	21.8	11.5	2.2

表 3 再生混合料合成级配 2
Tab.3 Gradation 2 of regeneration mixtures

编号	RAP 替 RBP 粒径范围/mm	通过下列筛孔(mm)的百分率/%							
		31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
A-2	0~2.36	100.0	95.7	80.2	65.2	41.5	25.8	12.3	3.8
B-2	2.35~4.75	100.0	96.2	80.4	65.3	39.4	22.4	17.3	2.1
C-2	4.75~19	100.0	96.3	81.9	56.6	37.2	27.4	16.1	1.6
D-2	19~31.5	100.0	94.5	78.7	62.6	42.3	27.8	15.4	1.8

1.3 最大干密度和最佳含水量

本文按 5% 的水泥剂量, 根据现行《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009) 中“无机结合料稳定材料击实试验方法”T0804-1994 的“丙”方法进行, 对不同合成级配的混合料进行击实试验, 获得含水量-干密度关系曲线, 确定最佳含水量与最大干密度。试验结果如表 4 所示。

表 4 再生混合料击实试验结果

Tab.4 Compaction test result of regeneration mixtures

编号	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水量/%
A-1	2.095	5.5
B-1	2.117	5.7
C-1	2.136	6.1
D-1	2.138	6.2
E-1	2.156	6.5
A-2	2.186	6.8
B-2	2.213	7.0
C-2	2.227	7.2
D-2	2.235	7.3
E-2	2.249	7.5

1.4 分析方法

a. 无侧限抗压强度试验. 对上述各种混合料分别根据击实结果确定最佳含水量和最大干密度, 水泥剂量(质量掺量)为 5%, 通过静压法成型 150 mm×

150 mm 的圆柱体试件, 在相对湿度为 96%、温度为 20℃ 的养护室内进行 7 d 养生. 将完成养护后的试件浸水一天, 从水中取出后用软布吸去试件表面可见水, 将试件放在 WE-600B 液压式万能试验机升降台上进行抗压强度、抗拉强度试验, 加压速度取 0.1~0.2 kN/S. 以 3 个试件测试值的平均值作为该组试件抗压强度试验结果代表值, 按下式计算得

$$R_c = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi D^2}$$

式中: R_c 为试件的无侧限抗压强度, MPa; P 为试件破坏时最大压力, N; A 为试件的截面积, mm²; D 为试件的直径, mm.

b. 抗压回弹模量试验. 试验所用试件的成型、养护方法与抗压强度试验时相同, 测试采用顶面法进行抗压回弹模量的测定. 将试件放在万能试验机升降台上, 千分表的表架固定在试验台上试件对称的两侧. 试验时加载板上的计算单位压力用 0.5~0.7 MPa, 加压速度取 0.1~0.2 kN/S. 以 3 个试件测试值的平均值作为该组试件抗压强度试验结果代表值, 按下式计算得

$$E = \frac{pH}{l}$$

式中: E 为试件的抗压回弹模量, MPa; p 为单位压力, MPa; H 为试件的高度, mm; l 为试件的回弹变形量, mm.

c. 干燥收缩试验. 干缩变形的测试采用尺寸为

100 mm×100 mm×400 mm 的梁式试件,试件均以最佳含水量、最大干密度和 98% 的压实度静压成型。4 种配合比各成型 2 组,分别用于测试 7 d,28 d 失水率和干缩应变,每组 3 个平行试件的平均值作为该组试件收缩变形试验结果代表值,干缩系数 α_d 按下式计算

$$\alpha_d = \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{\omega_{i+1} - \omega_i}$$

式中: α_d 为试件的干缩系数, $10^{-6}/\%$; ω_i, ω_{i+1} 分别为相邻两测点测定的试验含水量, $\%$; $\varepsilon_i, \varepsilon_{i+1}$ 分别为相邻两测点试件的干缩应变, 10^{-6} 。

d. 立式显微镜观察. 不同配合比成型养护完成后的试件放在阴凉处干燥一周,再用切割机对柱状试件进行横向切片,切片时尽量在 RAP 与 RBP 交接集中处切割,采用 Carl Zeiss 立式显微镜分别对切片断面的不同部位进行观察,观察水泥石与不同粒径 RAP 集料的界面状态。

2 试验结果与分析

2.1 骨架密实级配的再生混合料试验结果

2.1.1 强度与模量

试验结果见图 1~3。

从图 1~3 可知,对于骨架密实级配,矿料之间以粗集料形成骨架结构,细集料起填充空隙作用^[8-9]。RAP 替换不同粒径 RBP 后的再生混合料,强度和模量相对于纯水泥稳定碎石再生混合料有不同程度降低,表明矿质集料表面裹附的沥青阻碍了矿质集料之间的强度黏结,对再生混合料的整体强度有削弱作用。对比分析图 1~3 可知:

a. 与纯水泥稳定碎石再生混合料相比,用 RAP 替换粒径 19~31.5 mm 和 4.75~19 mm 的 RBP 后,再生混合料的强度和模量明显降低,说明 RAP 粗集料作为骨架结构时对混合料的整体强度和刚度不利,水泥水化产物与旧沥青之间不能形成黏结强度,也难以穿透旧沥青层与矿质集料形成黏结,骨料之间不能形成牢固的支撑结构。用 RAP 替换粒径 0~4.75 mm 和 4.75~9.5 mm 的 RBP 后,再生混合料的强度和模量降低幅度较小,此时水泥水化产物可以对粒径较小的 RAP 形成完全或部分裹附,从而产生强度来源,说明 RAP 细集料以填充形式存在对再生混合料强度影响较小。

b. 对于 RAP 细集料,A-1 的强度和模量略小于 B-1,主要原因是 RAP 表面有旧沥青的裹附,粒

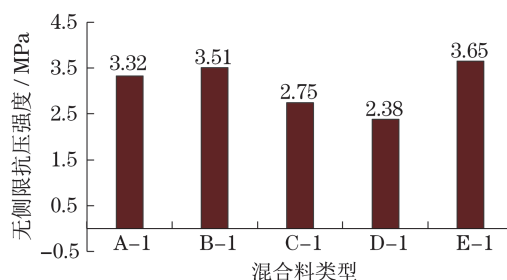


图1 骨架密实级配再生混合料的抗压强度

Fig.1 Compressive strength of skeleton dense gradation recycled mixture

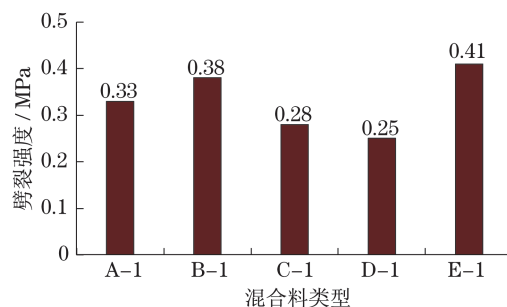


图2 骨架密实级配再生混合料的劈裂强度

Fig.2 Splitting strength of skeleton dense gradation recycled mixture

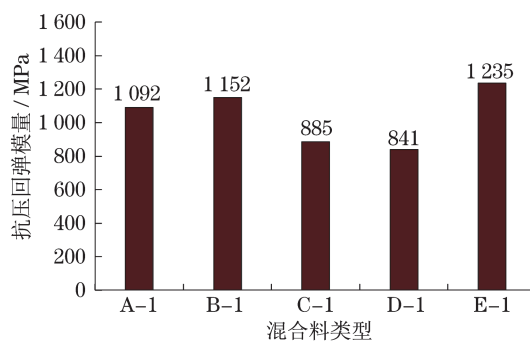


图3 骨架密实级配再生混合料的回弹模量

Fig.3 Resilient modulus of skeleton dense gradation recycled mixture

径为 0~2.36 mm 的 RBP 集料主要以剥落的沥青颗粒和被破碎的沥青矿质料组成,1.18 mm 以下的细料极少,混合料空隙难以被充分填充,因此,再生混合料强度和模量都有所降低。

c. RAP 替代细集料的混合料 A-1 和 B-1,与 RAP 替代粗集料的混合料 C-1 和 D-1 相比,A-1, B-1 的强度和模量高于 C-1, D-1,这主要是由骨料在混合料中的结构粒径所决定,旧沥青混凝土中粗集料不利于承担再生混合料骨架结构,水泥水化产物也难以穿透沥青膜形成强度,细集料作为填

充状态对再生混合料的强度降低幅度较小. 因此, 旧沥青半刚性基层路面进行全深式再生施工时, 旧沥青混凝土以细集料形式合成再生混合料, 对基层的整体强度有利.

2.1.2 干缩性能

试验结果如图4所示.

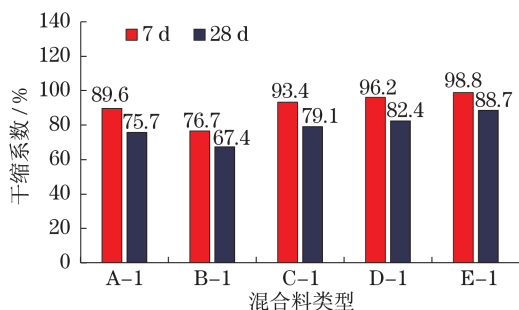


图4 骨架密实级配再生混合料的干缩系数

Fig.4 Shrinkage coefficient of skeleton dense gradation recycled mixture

由图4试验结果来看, 随着RAP替代RBP粒径的逐渐增大, 水泥稳定再生混合料的干缩系数表现出先降低后增加的趋势. 粒径为2.36~4.75 mm的RAP替代RBP后的再生混合料干缩系数最小, 说明2.36~4.75 mm的RAP有利于降低再生混合料的干缩应变, 这主要是半刚性材料内部的空隙被裹附沥青的矿料挤占, 引起干缩的作用粒的作用范围减小, 从而干缩系数减小幅度较明显^[10]. 当RAP替代RBP的粒径大于4.75 mm, 随着RAP粒径增大, 再生混合料的干缩系数逐渐增大, 与纯水泥稳定碎石再生混合料的干缩系数相比差异较小, 此时的RAP不能对RBP的空隙形成柔性填充, 因此, 粒径大于4.75 mm的RAP对再生混合料干缩性能的改善作用较弱.

从养护龄期来看, 随着龄期的增长, 再生混合料的干缩系数都有明显降低. 当龄期超过7 d后, 干缩系数随龄期增长而降低较缓慢. 这与普通水泥稳定再生混合料的规律一致, 表明基层材料成型完成后的7 d内, 采取防止基层含水量过快损失的措施, 对减小再生混合料的干缩应变有利.

2.2 悬浮密实级配再生混合料的试验结果

2.2.1 强度与模量

试验结果见图5~7.

由图5~7可知, 对于悬浮密实级配, 小一档粒径集料将大一档粒径集料挤开, 大颗粒集料以悬浮状态处于较小颗粒集料之间. 试验结果表明, 随着替

换的旧沥青矿料粒径增大, 再生混合料强度和刚度呈现逐渐降低趋势. 对比图5~7可知:

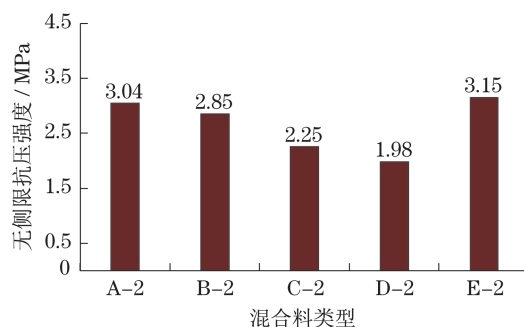


图5 悬浮密实级配再生混合料的抗压强度

Fig.5 Compressive strength of suspended dense gradation recycled mixture

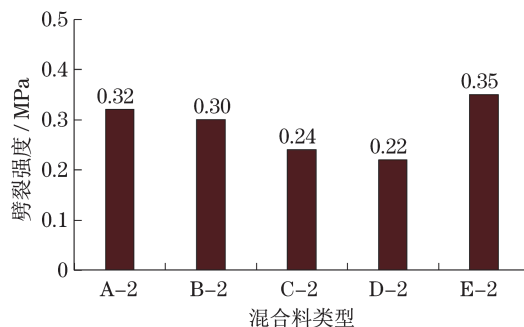


图6 悬浮密实级配再生混合料的劈裂强度

Fig.6 Splitting strength of suspended dense gradation recycled mixture

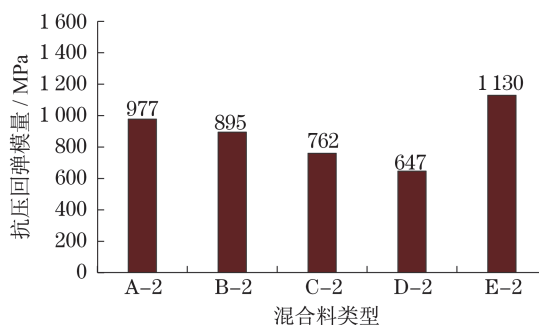


图7 悬浮密实级配再生混合料的回弹模量

Fig.7 Resilient modulus of suspended dense gradation recycled mixture

a. 采用悬浮密实级配的再生混合料, RBP集料被相同粒径的RBP集料替代后对应的混合料, 整体低于骨架密实级配的再生混合料的强度和模量. 由于悬浮密实级配为逐级填充的连续型密实级配, 单一粒径的集料对再生混合料的强度影响较小.

b. 随着RAP替代RBP粒径的逐渐增大, 再生混合料的强度和模量逐渐降低. 替换粒径范围为19~31.5 mm和9.5~19 mm的再生混合料强度和

模量均较低,说明 RAP 粗集料对再生混合料的强度和模量影响显著,RAP 以粗集料形式存在时不利于混合料的路用性能。

c. 从养护龄期来看,采用悬浮密实级配,RAP 替换不同粒径 RBP 后的再生混合料,与骨架密实级配再生混合料的强度、模量增长规律相似,随着养护龄期的增加,再生混合料的强度和模量均逐渐增大。

2.2.2 干缩性能

试验结果如图 8 所示。

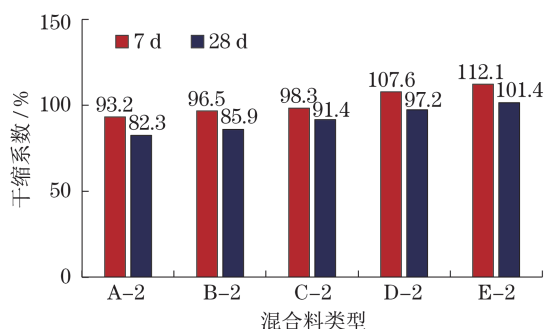


图 8 悬浮密实级配再生混合料的干缩系数

Fig.8 Shrinkage coefficient of suspended dense gradation recycled mixture

从图 8 可以看出,对于悬浮密实级配,随着 RAP 替代 RBP 粒径的逐渐增大,再生混合料的干缩系数逐渐增加,表明 RAP 集料粒径较小,有利于提高再生混合料的抗干燥收缩能力,这与骨架密实级配的干缩试验结果相同。从养护龄期上看,随着养护龄期的增长,RAP 替代不同粒径 RBP 后的再生混合料干缩系数都有减小趋势。

2.3 RAP 与 RBP 界面表现分析

针对骨架密实级配对 RAP 替换相同粒径范围 RBP 后的再生试件,通过电子显微镜对不同粒径 RAP 与 RBP 结合处进行观察,试验结果如图 9~12 所示。

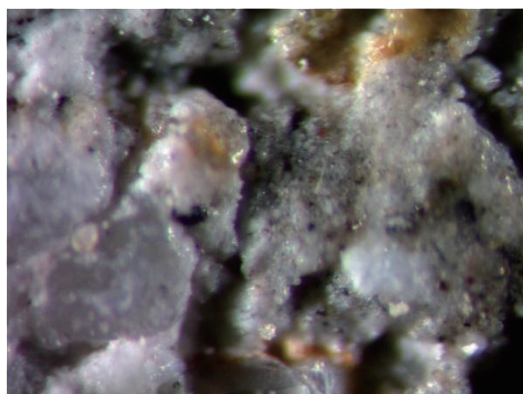


图 9 $D_{RAP} \leq 2.36 \text{ mm}$ 的混合料界面

Fig.9 Mixture interface of $D_{RAP} \leq 2.36 \text{ mm}$

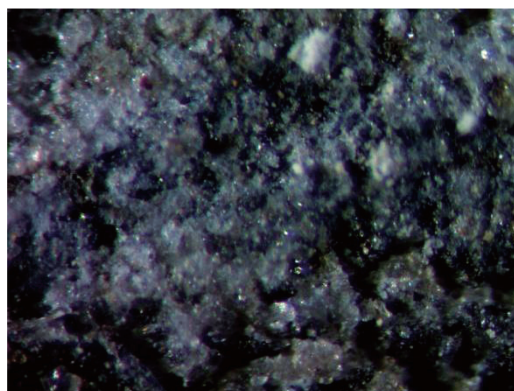


图 10 $2.36 \text{ mm} < D_{RAP} \leq 4.75 \text{ mm}$ 的混合料界面

Fig.10 Mixture interface of $2.36 \text{ mm} < D_{RAP} \leq 4.75 \text{ mm}$

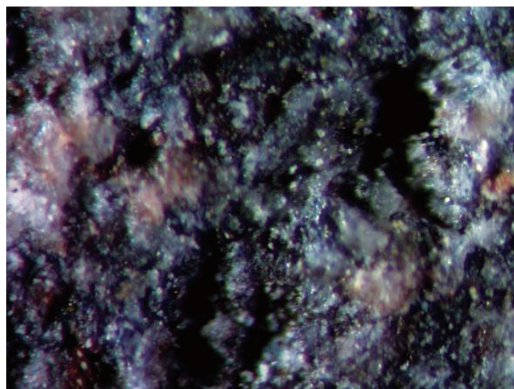


图 11 $4.75 \text{ mm} < D_{RAP} \leq 19 \text{ mm}$ 的混合料界面

Fig.11 Mixture interface of $4.75 \text{ mm} < D_{RAP} \leq 19 \text{ mm}$

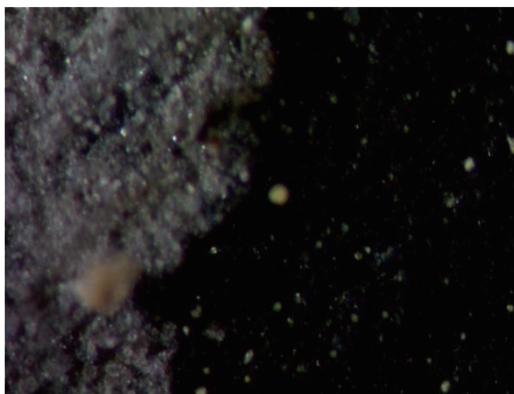


图 12 $19 \text{ mm} < D_{RAP} \leq 31.5 \text{ mm}$ 的混合料界面

Fig.12 Mixture interface of $19 \text{ mm} < D_{RAP} \leq 31.5 \text{ mm}$

从图 9~12 可以看出,随着 RAP 替代 RBP 粒径的增大,RAP 与 RBP 通过水泥稳定形成再生混合料的“黑白”界面越来越明显,黑白界线即是旧沥青混凝土材料与半刚性基层材料的交界面,该界面部位是再生混合料强度的薄弱面^[11-14]。当 RAP 替代粒径小于 2.36 mm,RAP 以细集料状态存在被水泥水化产

物全部裹附;当 RAP 替代粒径在 2.36~4.75 mm, RAP 部分裹附或填充, RAP 与 RBP 呈现混融状态;当 RAP 替代粒径大于 4.75 mm 后, RAP 与 RBP 的结合界面的分界逐渐明显,此时 RAP 与 RBP 未能较好地填充结合.说明再生混合料中 RAP 粒径越大, RAP 与 RBP 结合界线越明显,再生混合料的稳定性越差,当 RAP 和 RBP 充分融合的状态即是再生混合料的最佳状态.

3 结束语

基于水泥稳定的 RAP 与 RBP 合成再生混合料,采用骨架密实级配再生混合料的强度、模量和抗干缩性能明显优于悬浮密实级配,特别是采用骨架密实级配,2.36~4.75 mm 范围的 RBP 被 RAP 替代后,抗干缩能力有明显的提高,有利于缓解水泥冷再生基层板体强度过高造成的后期干缩裂缝病害.9.5~31.5 mm 粒径对于骨架密实级配和悬浮密实级配都属于骨架结构粒径, RAP 替代 RBP 后的再生混合料整体强度、模量相对较低,表明当旧沥青面层掺量一定时,再生混合料中旧沥青集料粒径不宜过大.

采用不同的级配类型对 RAP 与 RBP 合成的再生混合料进行设计,有研究认为旧沥青混凝土的掺量越高,再生混合料的强度和模量越低,而通过增加水泥剂量提高水泥稳定材料的强度,容易导致混合料后期较大的干缩变形.本文通过控制 RAP 在合理的掺量范围内,同时控制 RAP 的粒径在 2.36~4.75 mm,允许再生混合料的强度适当降低,提高抗干燥收缩能力,是充分利用旧沥青混凝土的柔性来减缓水泥板体刚度过大的一种理想的方法.但考虑到施工中集料粒径难以控制,同时会提高施工成本,因此,建议在全深式再生基层施工中,采用厂拌再生施工时,可将旧沥青面层预先进行细化筛分,降低旧沥青集料的粒径.采用就地再生施工时,可降低铣刨机或再生机行进速度等措施减小 RAP 粒径,旧沥青集料粒径控制在 4.75 mm 以内.

参考文献:

- [1] 黄兵,周正峰,贾宏财,等.半刚性基层沥青路面结构动力响应分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(1):47-51.
- [2] 黄河,李乾辉,阮伟,等.旧沥青路面水泥稳定就地冷再生技术在公路大修工程中的应用[J].交通科技,2014(3):88-90.
- [3] JITSANGIAM P, BOONSERM K, PHENRAT T, et al. Recycled concrete aggregates in roadways: laboratory examination of self-cementing characteristics [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10):04014270.
- [4] 陈喻军,季杰,黄亚琴.旧沥青路面全深式就地冷再生技术应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2016(11):114-116.
- [5] 拾方治,马卫民.沥青路面再生技术手册[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [6] 李清富,张鹏,刘晨辉.聚丙烯纤维半刚性基层抗裂性能研究[M].郑州:黄河水利出版社,2010.
- [7] 郝永鹏.水泥稳定旧沥青路面材料用于基层的路用性能研究[J].山东交通科技,2016(6):40-42.
- [8] 魏建军.水泥稳定再生骨料混合料抗压回弹模量试验研究[J].混凝土与水泥制品,2013(8):85-88.
- [9] 王浩宇.全深式沥青路面现场冷再生技术研究[D].西安:长安大学,2014:44-61.
- [10] 白雪.水泥稳定碎石基层抗裂性综合评价体系研究[D].重庆:重庆交通大学,2013:15-23.
- [11] PUPPALA A J, HOYOS L R, POTTURI A K. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7):990-998.
- [12] 徐伟,王勋.再生沥青混合料沥青胶浆微观状态测试方法研究[J].公路工程,2014,39(2):68-71.
- [13] 陈惠苏,孙伟,PIET S.水泥基复合材料界面对材料宏观性能的影响[J].建筑材料学报,2005,8(1):51-62.
- [14] 何锐,嵇绍华,黄平明,等.粗骨料/浆体界面性能对混凝土力学性能影响的数值模拟[J].长安大学学报(自然科学版),2015,35(2):31-37.

(编辑:丁红艺)