

橡胶沥青混合料 SAC-13 级配空隙率变化分析

黄卫东¹, 黄明¹, 郑茂², 李彦伟³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 四川省交通厅交通勘察设计研究院, 成都 610000;
3. 石家庄市交通运输局, 河北 石家庄 050051)

摘要: 在普通沥青的多碎石沥青混凝土(SAC)设计的基础上, 以空隙率为研究变量, 采用固定油石比, 再微调级配的方式, 深入对比了 SAC-13 级配变化的普通沥青和橡胶沥青混合料空隙率影响规律。结果显示: 对于普通 SAC-13 沥青混合料, 油石比每增加 0.5%, 空隙率减小 1%~1.5%, 随着 9.5~13.2 mm 粗集料含量增多, 4.75~9.5 mm 粗集料含量减少, 混合料粗集料间隙率呈递减之势; 对 SAC 橡胶沥青混合料, 建议 9.5 mm 以上集料用量范围限定在 30%~45% 之间, 4.75~9.5 mm 集料用量范围限定在 20%~40% 之间, 且 4.75 mm 以上粗集料总用量应达到 60% 以上, 2.36~4.75 mm 集料含量不宜高于 10%, 且不宜使用过多矿粉; 同样目标空隙率下, SAC-13 橡胶沥青混合料的粗集料掺量应略低于普通沥青混合料; SAC-13 橡胶沥青混合料中当 2.36~4.75 mm 集料含量达到 8% 以后, 随着该档料用量的增加, 空隙率增幅明显高于普通沥青混合料, 需严格控制此档料含量。

关键词: 多碎石沥青混凝土(SAC); 橡胶沥青; 级配; 空隙率

中图分类号: U 414

文献标识码: A

Air Void Variation of Asphalt Rubber Mixture Grade SAC-13

HUANG Weidong¹, HUANG Ming¹, ZHENG Mao², LI Yanwei³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Traffic Investigation and Design Institute of Sichuan Provincial Communications Department, Chengdu 610000, China; 3. Shijiazhuang Bureau of Transportation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Based on the design of stone asphalt concrete (SAC) mixture of plain asphalt, a comparative study was made of the influence law of air void of SAC-13 grading on plain asphalt and asphalt rubber mixture with the air void as the variable by setting the asphalt content first and then fine-tune

grading. The result shows that for normal SAC-13 mixture, when the oil-aggregate ratio increases by 0.5% each time, air void will decrease by 1% to 1.5% instead. With the increase of 9.5 ~ 13.2 mm coarse aggregate content, 4.75 ~ 9.5 mm aggregate content and the void of coarse aggregates (VCA) will decrease by degrees. With regard to the SAC asphalt rubber mixture, aggregate content (> 9.5 mm) is recommended to be within 30% ~ 45% and the 4.75 ~ 9.5 mm be within 20% ~ 40%, in addition, the total volume of coarse aggregate (> 4.75 mm) is proposed to be over 60%, 2.36 ~ 4.75 mm aggregate content is not proposed to be over 10%, and mineral powder to be used little. With the same objective void, SAC-13 asphalt rubber mixture of coarse aggregate content is proposed to be slightly less than normal SAC mixture. As for SAC-13 rubber asphalt mixture, when the content of 2.36 ~ 4.75 mm aggregate reaches 8%, void increases much more distinctively than that of normal SAC mixture, so the content of this grade should be strictly controlled.

Key words: stone asphalt concrete (SAC); asphalt rubber; grade; air void

多碎石沥青混凝土(SAC)是一种断级配沥青混凝土,其设计原则是用粗集料形成骨架,用细集料和沥青填充骨架中的孔隙,使设计的沥青混凝土既密实、空隙率小,使水不容易透入,又具有较高的高温抗永久形变能力和很好的表面构造深度^[1]。现行的《橡胶沥青及混合料设计施工技术指南》与“橡胶沥青行标湿拌法草案”中根据橡胶沥青高粘和可膨胀的特点推荐采用使用美国橡胶沥青混凝土(asphalt rubber-asphalt concrete, ARAC)与橡胶化沥青混凝土(rubbered asphalt concrete, RAC)级配,这两种橡胶沥青混合料级配具有的共同特点即间断与骨架密实^[2],对比上述指南和草案可发现, SAC-13 与

ARAC-13 在级配范围上有许多相似之处,区别仅在于 SAC-13 建议使用更粗的骨架结构,其粗料含量较 ARAC-13 更多,且 SAC-13 矿粉用量稍大,其相似性说明 SAC-13 在橡胶沥青的应用上大有可为,而 SAC 也满足这两点,因此可将 SAC 级配应用于橡胶沥青混合料设计。

普通沥青 SAC-13 混合料有着广泛的使用经验,应用在橡胶沥青上必定有可借鉴和不同之处;其二,常规的马歇尔混合料设计方法是先确定级配再选取油石比,往往成本很难控制,目前对采用在固定油石比的基础上进行级配微调设计的方法,在很多应用中有良好的效果;其三,研究发现,空隙率影响沥青混合料性能,其间存在很好的相关性,随着沥青混合料的空隙率增大,沥青饱和度降低,吸水率增大,力学性能(模量、劈裂强度、抗剪强度)和抗水损坏性能降低,疲劳寿命减少^[3]。因此,空隙率是混合料性能的一个综合体现;基于上述原因,本文试验首先总结 SAC 级配变化对普通沥青混合料的空隙率影响情况,再研究对橡胶沥青混合料的空隙率影响情况,并对其进行比较从而总结其空隙率变化的差异性,以便考虑普通沥青混合料的 SAC-13 级配的经验规律是否可以用于橡胶沥青混合料实际应用中,提出值得注意之处。

1 试验材料与试验步骤

试验用石料粒径组成为 13.2~9.5 mm, 9.5~4.75 mm, 4.75~2.36 mm 和 2.36~0.075 mm 四档。对 4.75 mm 以上粗集料,使用产地江苏溧阳的玄武岩,对 2.36 mm 以下细集料使用产地江苏溧阳的石灰岩。根据规范测试^[4],其基本性能测试的结果见表 1。试验所用基质沥青均为中海 70 号沥青,橡胶沥青均为内掺 19% 质量分数的 20 目胶粉。

表 1 集料密度表

Tab.1 Specific gravity of aggregates

集料总类	粒径/mm	表观密度/ (g · cm ⁻³)	毛体积密度/ (g · cm ⁻³)	吸水率/ %
玄武岩	9.50~13.2	2.933	2.910	0.79
	4.75~9.50	2.925	2.890	1.21
	2.36~4.75	2.881	2.881	
石灰岩	0~2.36	2.581	2.581	

本次研究采用马歇尔设计方法,双面击实 75 次。通过计算毛体积密度和最大理论密度计算出混合料试件的空隙率,其中最大理论密度取计算法理

论密度和实测法理论密度的平均值。

2 油石比的确定

本次研究是基于固定油石比的前提下进行空隙率变化的研究,确定油石比的过程不同于常规马歇尔设计方法中的目的,此处确定油石比的目的在于将油石比固定在一个相对施工成本可接受的范围内,为级配的微调做准备^[5]。SAC 沥青混合料目标空隙率定为 3%~5%,采用中海 70 号基质沥青,以目标空隙率为标准,选取 4.5%, 5.0%, 5.5% 三种油石比进行试验,试验选用级配见表 2,空隙率结果见表 3 和如图 1 所示。

表 2 油石比确定过程中试验用级配

Tab.2 Mixture grading to find the best oil-stone ratio

级配编号	筛孔尺寸/mm				矿粉 %
	10~13	5~10	3~5	0~3	
1	32	38	6	16	8
2	28	37	8	19	8
3	25	35	10	22	8

注:筛孔尺寸单位为 mm;级配中各档料的用量采用质量分数表示,单位为%,下同。

表 3 空隙率结果(设计过程)

Tab.3 Air voids at different oil-aggregate ratios
(design procedure)

油石比/%	级配编号	最大理论密度/ (g · cm ⁻³)	毛体积密度/ (g · cm ⁻³)	空隙率/%
4.5	1	2.653	2.463	7.2
	2	2.644	2.507	5.2
	3	2.636	2.530	3.9
5.0	1	2.633	2.475	6.0
	2	2.625	2.528	3.7
	3	2.616	2.548	2.6
5.5	1	2.614	2.486	4.9
	2	2.605	2.540	2.6
	3	2.597	2.560	1.4

由结果可知,当油石比处于由 4.5%~5.5% 的变化过程中,级配 1 的空隙基本处于目标空隙之外。对于级配 2、3,油石比大于 5% 时,空隙率偏小,油石比为 4.5% 时,级配 2 的空隙率大于 5%,综合考虑,本次系列试验,定油石比为 4.8%。将表 3 中的空隙率与油石比做直观柱状图,得到图 1。

在普通沥青 SAC 混合料设计基础之上,橡胶沥青 SAC 的所有级配均使用 1.5% 的水泥代替等量矿粉填料。基质沥青为中海 70 号,胶粉为 40 目胶粉,胶粉掺量为内掺 18%。橡胶粉改性沥青的加工工艺是

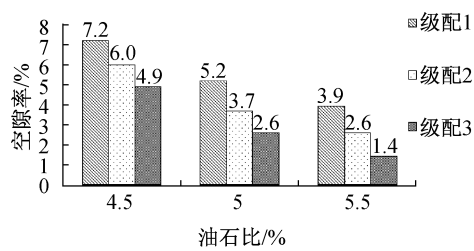


图1 三种级配随油石比变化的空隙率

Fig.1 Air voids at different oil-aggregate ratios of 3 types of grades

在 $185^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 下,用高速搅拌器,将沥青与橡胶粉共炼 90 min. 油石比取定为 6%,油石比确定过程即采用与普通 SAC 混合料的马歇尔设计方法^[5]相同,过程不再赘述.

3 粗集料掺量变化对空隙率的影响

3.1 粗集料总掺量变化

此节普通沥青 SAC 混合料级配沿用油石比确定过程中的试验级配,即表 2 所示级配. 由表 2,3 及图 1 可见,4.75 mm 以上粗集料总含量由 70%→65%→60%递减的过程中,空隙率也随之减小. 粗集料总含量减小,细料增多,从空隙率变化的角度出发,必然是呈减小之势. 另一方面,SAC 是粗骨架密级配,粗骨料的减小,细集料的增多,导致骨架结构发生改变. 按 SAC 级配理论,骨架密实结构与悬浮式密实结构的分界线为粗集料含量约 59%~60%. 含量 60%为疏松骨架密实结构的下限值,含量在 65%左右的是一般骨架结构,含量在 70%左右的是紧密骨架结构.

普通 SAC-13 级配设计是基于油石比的确定,相对普通 SAC-13 级配设计来说,橡胶沥青 SAC 级配设计更为细化,呈 70%→65%→62%→60%,见表 4,空隙率结果见表 5.

表4 试验所用级配(粗集料总掺量变化)

Tab.4 Mixture grades (coarse aggregate contents variation) %

级配编号	筛孔尺寸/mm				矿粉
	10~13	5~10	3~5	0~3	
4	40	30	12	10	8
5	35	30	12	15	8
6	32	30	15	15	8
7	25	35	10	22	8

由表 5 可知,对于所采用的三种油石比,橡胶沥青混合料空隙率随着粗集料总掺量的减少而呈现递

减规律. 由 SAC 级配理论可知,粗集料总掺量为 60%左右是悬浮密实结构同骨架密实结构的分解线,而含量在 65%左右为一般骨架结构,含量在 70%左右为紧密骨架结构. 结合 SAC-13 普通沥青混合料的空隙率情况,可知,当粗集料含量大于 60%的前提下,即在保证混合料粗集料形成骨架结构的前提下,随着粗集料用量的减少,橡胶沥青混合料空隙率将随之出现减小规律,这一点普通沥青 SAC 与橡胶沥青 SAC 大体一致. 且骨架结构的疏密对混合料空隙率的影响程度是深于 2.36~4.75 mm 一档集料对混合料空隙率的影响程度的.

表5 粗集料用量对空隙率影响的结果

Tab.5 Effect of different coarse aggregates contents on air voids at different grades

级配编号	最大理论密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	毛体积密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	空隙率/%
4	2.622	2.399	8.5
5	2.613	2.497	4.4
6	2.612	2.511	3.9
7	2.600	2.546	2.1

3.2 粗集料用量比例相对变化

本次试验所用级配均保持 70%的粗集料总含量,改变两档粗集料的相对含量变化,观察其对混合料空隙率的影响情况. 试验所用油石比为 4.8%,试验级配见表 6,空隙率结果见表 7.

表6 试验所用级配(粗集料的相对用量变化)

Tab.6 Mixture grades (variation of relative content of coarse aggregates) %

级配编号	筛孔尺寸/mm				矿粉
	10~13	5~10	3~5	0~3	
8	10	60	6	16	8
9	20	50	6	16	8
10	40	30	6	16	8
11	50	20	6	16	8
12	60	10	6	16	8

表7 粗集料用量相对变化对空隙率的影响结果

Tab.7 Effect of different coarse aggregate contents on air voids

级配编号	普通沥青 SAC 空隙率/%	橡胶沥青 SAC 空隙率/%
8	8.1	7.7
9	7.2	6.0
10	4.4	4.2
11	3.1	4.2
12	3.0	3.1

由表 5 可知,当 9.5 mm 以上粗集料由 10%~60%以 10%为间隔递增,同时 4.75~9.5 mm 粗集料含量递减,混合料空隙率亦逐渐减小. 当 4.75~

9.5 mm 粗集料含量较大时,9.5 mm 以上粗集料分散于低一级集料之间,无法相互接触,因此其对于整个骨架形成的是干涉作用,结果是进一步将 4.75~9.5 mm 粗集料形成的骨架撑开,导致粗集料间隙率增大.在细集料、填料及沥青用量不变的情况下,混合料空隙率必然较大.相反的,当 9.5 mm 以上粗集料含量较大时,此档集料相互之间接触形成骨架,而相对较少的 4.75~9.5 mm 粗集料此时起到的是对上一档集料间隙的填充作用,因此粗集料间隙率减小,有了等量的细集料、填料和沥青的填充后,混合料空隙率呈现减小趋势.

当 9.5 mm 以上粗集料由 10%~60%以 10%为间隔递增,同时 4.75~9.5 mm 粗集料含量递减,混合料空隙率亦逐渐减小,空隙率变化规律与普通沥青 SAC 混合料空隙率变化规律基本相同.且两种沥青混合料的此种规律变化成因亦相同.对于橡胶沥青来说,其胶粉颗粒裹覆沥青后形状大小尚不足以对 4.75 mm 以上粗集料形成干涉作用,在控制住 2.36 mm 粒径的集料用量的前提下,胶粉颗粒在混合料结构中仅仅是起到填充作用,且当 9.5 mm 以上粗集料含量达到 40%后,随着其用量的进一步增加,混合料空隙率减小幅度开始变小.

4 细集料掺量变化对空隙率的影响

SAC-13 级配属于间断级配,而根据级配理论和间断级配的最新研究表明,2.36~4.75 mm 含量变化对于矿料骨架有关键的影响作用^[6].本节试验目的为观察此档集料含量变化对沥青混合料的空隙率影响情况.

4.1 调整两档细集料的相对用量比例

调整 4.75 mm 以下两档细集料的相对用量比例,试验所用级配见表 8,空隙率结果见表 9.

表 8 试验所用级配(细集料的相对用量变化)

Tab.8 Mixture grades (variation of relative content of fine aggregates) %

级配编号	筛孔尺寸/mm				矿粉
	10~13	5~10	3~5	0~3	
13	40	30	6	16	8
14	40	30	8	14	8
15	40	30	10	12	8
16	40	30	12	10	8
17	40	30	15	7	8

本节固定 4.75 mm 以上粗集料含量为 70%,改变 2.36~4.75 mm 集料含量(0.075~2.36 mm 集

表 9 细集料用量相对变化对空隙率的影响结果

Tab.9 Effect of variation of relative contents of fine aggregates on air voids content

级配编号	普通沥青 SAC 空隙率/%	橡胶沥青 SAC 空隙率/%
13	4.4	4.2
14	5.8	5.2
15	6.1	7.3
16	8.0	8.5
17	9.0	10.1

料随之变化),从表 9 可知,混合料空隙率随着 2.36~4.75 mm 集料含量的增加而增大,在油石比为 4.8%的条件下,此档料含量为 6%时,混合料空隙率为 4.4%,处于目标空隙率范围内.随着该档料含量增加,混合料空隙率超出目标空隙率,特别是当该档料含量超过 10%之后,空隙率增幅很大.在 2.36~4.75 mm 集料含量由 6%~10%的变化过程中,由于 0.075~2.36 mm 细集料含量减少,必然导致对粗集料形成的间隙填充不足,因此混合料的空隙率有所增加,只是增幅相对较小.而当此档料含量进一步增大至 10%以上后,2.36~4.75 mm 集料含量增多,对于粗集料形成的骨架结构起到了一定的干涉作用,粗集料骨架被撑开,另一方面,细集料含量进一步减小,最终导致沥青混合料的空隙率增幅加大.将表 9 做直观柱状图,可得图 2.

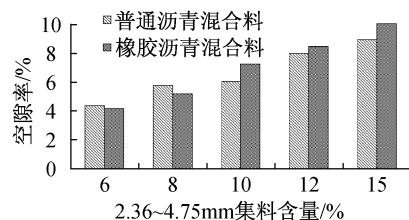


图 2 两档细集料用量比例对空隙率影响的结果

Fig.2 Results of air voids at 5 types of grades which have different fine aggregates content on 2.36~4.75 mm and 0.075~2.36 mm

由图 2 可知两种混合料的空隙率变化规律总体一致,空隙率均是随着 2.36~4.75 mm 集料含量的增加而增大.橡胶沥青混合料中当 2.36~4.75 mm 集料含量达到 8%以后,随着该档料用量的增加,空隙率增大幅度明显高于普通沥青混合料.形成此现象的原因为,橡胶沥青混合料中存在橡胶颗粒裹覆沥青后参与了 2.36~4.75 mm 一档集料的干涉作用,因而在橡胶沥青混合料中,该档集料对 4.75 mm 以上粗集料形成的骨架结构干涉作用更加明显,也进一步地说明,控制该档集料用量对于 SAC 混合料的空隙率至关重要.

4.2 调整两档细集料与矿粉的相对用量比例

试验所用级配见表 10,空隙率结果见表 11.

表 10 试验所用级配(细集料与矿粉的相对用量变化)

Tab.10 Mixture grades (variation of relative contents of mineral powder and fine aggregates) %

级配编号	筛孔尺寸/mm				矿粉
	10~13	5~10	3~5	0~3	
18	40	30	10	12	8
19	40	30	10	14	6
20	40	30	15	7	8
21	40	30	15	10	5

表 11 细集料与矿粉的相对用量变化对空隙率的影响结果

Tab.11 Effect of different relative contents of mineral powder and fine aggregates on air voids at different grades

级配编号	普通沥青 SAC 空隙率/%	橡胶沥青 SAC 空隙率/%
18	6.1	7.3
19	7.7	8.1
20	9.1	10.1
21	9.7	10.8

将表 11 的普通沥青 SAC 空隙率变化做直观柱状图,可得图 3.

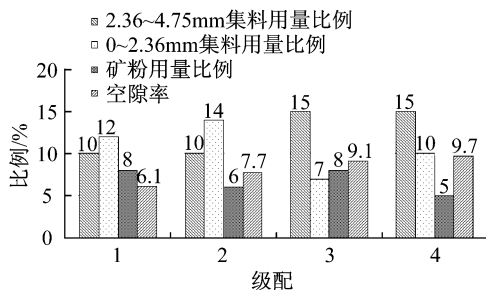


图 3 普通沥青 SAC 空隙率变化图

Fig.3 Variation of air voids of common SAC asphalt mixture

由图 3 可见,增多 2.36~4.75 mm 一档料的含量,特别是达到 10%以上,无论减少的是细料或是填料,空隙率都会明显增大,且若减少矿粉的含量,空隙率增大程度更大.由于矿粉在沥青混合料中吸收沥青形成沥青胶浆的能力更强,因此更能裹覆于粗料表面,去填充粗集料间隙,而细料此方面作用相对较差,因此,同等程度的减少含量,减少矿粉含量会导致沥青混合料的空隙率增大更多.

将表 11 的橡胶沥青 SAC 空隙率变化做直观柱状图,可得图 4.由图 4 可知,在 2.36 mm 以上集料含量保持不变的前提下,减少矿粉含量而增加细集料含量,橡胶沥青混合料的空隙率增大.由图 4 尚可以看出,若减少矿粉和细集料的含量,增加 2.36~4.75

mm 集料的含量,混合料空隙率也增大.这是由于级配中 2.36~4.75 mm 一档集料的含量增多,与沥青中存在的裹覆沥青的胶粉颗粒共同作用,对 4.75 mm 以上粗集料产生较强的骨架干涉作用,进一步撑开了粗集料骨架结构,同时,起填充作用的细集料和矿粉含量减少,导致混合料空隙率增大.这表明矿粉的填充作用是优于细集料的,但是由于矿粉吸收沥青形成沥青胶浆的能力强,必然导致橡胶沥青混合料中的沥青膜厚度降低,理论上并不利于保证橡胶沥青混合料的粘结性能.

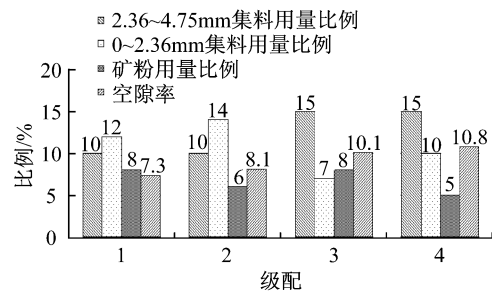


图 4 橡胶沥青 SAC 两档细集料与矿粉的用量比例对空隙率影响的结果

Fig.4 Results of the influence on air void caused by different contents of 2.36~4.75, 0.075~2.36 mm fine aggregates and mineral powder of asphalt rubber SAC

4.3 调整粗集料和 2.36~4.75 mm 集料的相对用量比例

试验所用级配见表 12,空隙率结果见表 13.

表 12 试验所用级配(粗集料和 2.36~4.75 mm 集料的相对用量变化)

Tab.12 Mixture grades (variation of relative contents of coarse and 2.36~4.75 mm aggregates)

级配编号	筛孔尺寸/mm				矿粉
	10~13	5~10	3~5	0~3	
22	40	30	12	10	8
23	35	30	12	15	8
24	32	30	15	15	8
25	25	35	10	22	8

由级配 1 和级配 2 的空隙率情况看,当粗集料含量减少 5%添加到细料上,空隙率明显减小,由 8%降低至 5%.这说明 2.36~4.75 mm 集料含量在 12%时,对矿料骨架的干涉作用还不是太强,影响空隙率的主要因素还是填充粗骨料间隙的细料、填料以及沥青的含量.级配 3 进一步减小粗集料含量,增加 2.36~4.75 mm 集料的含量,同级配 2 相比,沥青混合料的空隙率基本没变化.这说明 2.36~4.75

mm 集料含量增加,起到的不是填充作用,而是干涉作用,部分集料是作为骨架的一部分构成,因此,在相等含量的细料、填料和沥青的情况下,级配 2 与级配 3 空隙率无明显变化.而级配 4 则进一步说明,当 2.36~4.75 mm 集料含量在一定范围内,细料增多的填充作用是影响空隙率的关键.

表 13 粗集料和 2.36~4.75 mm 集料的相对用量变化对空隙率的影响结果

Tab.13 Results of the influence on air voids caused by relatively different content of 2.36~4.75 mm aggregates and coarse aggregates

级配编号	最大理论密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	毛体积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	空隙率/%
22	2.656	2.443	8.0
23	2.643	2.551	5.0
24	2.642	2.513	4.9
25	2.624	2.531	3.5

5 结论

本次研究针对橡胶沥青在 SAC 级配上的应用,以普通沥青 SAC 级配混合料空隙率变化为基础,再研究了橡胶沥青 SAC 混合料的空隙率变化情况,并对其进行比较,从而总结其空隙率变化的差异性分析,结论如下:

(1) 对于普通 SAC-13 沥青混合料,油石比每增加 0.5%,混合料空隙率减小 1%~1.5%;

(2) 对于普通 SAC-13 和橡胶沥青 SAC-13 混合料,随着 9.5~13.2 mm 粗集料含量增多,4.75~9.5 mm 粗集料含量减少,混合料粗集料间隙率都呈递减之势,且两种混合料递减趋势大致相同;在满足目标空隙率的前提下,与橡胶沥青 SAC-13 混合料相比,普通 SAC-13 沥青混合料的粗集料掺量可更高,级配骨架可更粗.因此,当应用 SAC-13 级配于橡胶沥青混合料时,粗集料掺量应略低于普通沥青混合料;

(3) 对于橡胶沥青 SAC-13 混合料,以 4%~6% 为目标空隙率,基于空隙率的要求,本文建议 9.5 mm 以上粗集料用量范围限定在 30%~45%之间,

4.75~9.5 mm 粗集料用量范围限定在 20%~40%之间,且 4.75 mm 以上粗集料总用量应达到 60%以上,并建议 2.36~4.75 mm 一档集料含量不宜高于 10%;

(4) 矿粉吸收沥青形成沥青胶浆对粗骨料形成裹覆和填充的作用是优于 2.36 mm 以下细集料的.但矿粉的使用会导致混合料沥青膜厚度的减小,影响混合料的性能,且生产成本必然提高,对于橡胶沥青混合料,不建议过多使用矿粉;

(5) 橡胶沥青 SAC-13 混合料中当 2.36~4.75 mm 集料含量达到 8%以后,随着该档料用量的增加,空隙率增大幅度明显高于普通沥青混合料.因此,对于橡胶沥青混合料,此档料的掺量控制要较普通沥青混合料更为严格.

参考文献:

- [1] 沙庆林. SAC 和其他粗集料断级配的矿料级配设计方法[J]. 公路, 2005, 1(1): 143.
SHA Qinglin. Design method of SAC and other coarse aggregate gap grade[J]. Highway, 2005, 1(1): 143.
- [2] Caltrans. State of California Departments of Transportation asphalt rubber usage guide[M]. Sacramento: Caltrans, 2003, 1: 126-130.
- [3] 彭勇, 孙立军. 空隙率对沥青混合料性能影响[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33(5): 826.
PENG Yong, SUN Lijun. Effects of air void content on asphalt mixture performance [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2009, 33(5): 826.
- [4] JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
JTG E42—2005 Test methods of aggregates for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [5] JTJ052—2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
JTJ052—2000 Standard test method of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [6] 张肖宁, 郭祖辛, 吴旷怀. 按体积法设计沥青混合料[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995, 28(2): 28.
ZHANG Xiaoning, GUO Zuxin, WU Kuanghuai. Volume method of bituminous mixture design[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture. 1995, 28(2): 28.