

沥青混合料高温性能评价指标研究

陈杰^{1,2,3}, 禚炜安^{1,2,3}, 熊剑平^{1,2,3}, 王彬^{1,2,3}

(1. 广西交通科学研究院有限公司, 广西 南宁 530007; 2. 广西道路结构与材料重点实验室;
3. 高等级公路建设与养护技术、材料及装备交通运输行业研发中心)

摘要:为研究常规的高温性能评价指标与混合料抗剪强度的相关性,引入骨架接触度 SSC 和骨架稳定度 S 指标来表征矿料级配的骨架结构特征,对 3 种不同矿料级配的 AC-13 沥青混合料进行了 60℃ 条件下的车辙试验、无侧限抗压试验及单轴贯入试验,分别采用动稳定度、永久变形量及抗剪强度来评价沥青混合料的高温强度性能,并对矿料骨架结构特征、动稳定度、永久变形与抗剪强度的相关性进行了分析。结果表明:① 骨架接触度 SSC 和骨架稳定度 S 与混合料的抗剪强度正相关,可用来进行混合料高温稳定性的初期设计,提高混合料高温性能设计的可靠度;② 动稳定度与抗剪强度具有很好的相关性,可较好地反映混合料的高温性能,但离散性较大,当两种沥青混合料的高温性能相差不大时,采用动稳定度指标来评价高温稳定性时敏感性和区分度均较低,可靠性不高,此情形下建议增加抗剪强度指标进行高温性能评价;③ 车辙试验的永久变形与混合料抗剪强度相关性较差,不适合用来直接评价混合料的高温性能。

关键词:沥青混合料; 高温性能; 单轴贯入试验; 抗剪强度; 动稳定度; 矿料骨架特征

1 前言

车辙是沥青路面典型的病害类型,在结构型、失稳型、压密型和磨耗型 4 类车辙病害中,最常见的是失稳型车辙,即荷载作用产生的剪应力超过沥青混合料的抗剪强度时出现的剪切流动变形。抗剪强度是沥青混合料高温稳定性最直接的评价指标,可直接反映混合料结构破坏时的力学特性。在对沥青混合料设计时通常采用稳定度和动稳定度两个参数进行沥青混合料的高温稳定性控制。稳定度和动稳定度作为混合料高温稳定性间接评价指标,能否真实反映其实际高温性能越来越受到广大学者的质疑,已有研究指出马歇尔稳定度及流值与混合料高温性能相关性很差,动稳定度仅考虑了压实沥青混合料后 15 min 的永久变形率,缺乏对全过程的累积变形量和最大永久变形量的考虑,在评价沥青混合料的高温稳定性时存在较大的局限性。单轴贯入试验方法能模拟路面的实际受力状态,采用单轴贯入试验计算得到的抗剪强度可以较真实地反映实际路面的应力情况。已有较多学者采用单轴贯入试验方法对沥青混合料高温性能进行了较深入的研

究。高振鑫等采用单轴贯入数值试验方法研究了矿料级配对混合料抗剪强度的影响规律,并验证了该方法的合理性,基于抗剪强度最大原则提出了 4.75、2.36、0.075 mm 关键筛孔通过率控制范围;汤文等对 4 种类型的沥青混合料在不同温度下分别采用 APA 车辙深度、单轴贯入强度及剪切模量对混合料高温性能进行评价,发现高温下抗剪性能好的沥青混合料低温下抗剪性能并不一定好,提出沥青混合料抗剪性能的评价应结合环境温度,并建立了 3 种指标间的回归关系式;朱昆等采用单轴贯入试验对大粒径沥青混合料进行级配设计,并验证了其合理性。

虽然对沥青混合料高温性能评价方法方面已有较多研究,但以混合料的矿料骨架特征来反映其高温性能方面的研究却少有报道。且常规的高温性能评价指标永久变形和动稳定度不能揭示混合料失稳破坏的本质,均是间接反映混合料的高温性能,与混合料的抗剪强度是否具有相关性值得探讨。为此,该文通过单轴贯入试验对矿料骨架结构特征、车辙试验的永久变形及动稳定度与抗剪强度的关系进行研究,提出基于矿料骨架特征的沥青混合料高温稳定性设计思想并以抗剪强度进行高温稳定性评价。

2 试验

试验用沥青胶结料为 SBS 改性沥青(Ⅰ—D),技术指标如表 1 所示。粗集料采用粒径 4.75 mm 以上的辉绿岩,细集料及矿粉为石灰岩,3 种矿料级配如表 2 所示。

表 1 改性沥青技术指标		
试验项目	单位	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	58
软化点(环球法)	℃	92.5
延度(5℃,5 cm/min)	cm	41
相对密度(25℃)		1.035

表 2 3 种矿料级配组成										
级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Ⅰ	100	95.3	64.6	38.0	28.5	20.6	14.7	10.8	8.1	6.4
Ⅱ	100	92.4	68.5	35.2	25.5	20.7	13.9	10.0	8.4	5.8
Ⅲ	100	95.2	64.0	31.0	20.0	17.4	12.8	9.8	8.2	6.0

3 种矿料级配均采用单粒径配料,分别进行马歇尔试验、车辙试验、无侧限抗压强度试验及单轴压缩试验。

无侧限抗压及单轴压缩试验用的试件均采用静压方式成型直径 100 mm、高 100 mm 的圆柱体,在室温条件下放置 48 h 后将试件放置在 60℃环境箱中保温 5 h,采用 MTS 对圆柱体试件进行无侧限抗压试验和单轴贯入试验,从而计算高温条件下混合料的抗剪强度及黏聚力 c 、内摩擦角 φ 值。

无侧限抗压试验加载速率为 2 mm/min;单轴贯

入试验压头尺寸为直径 28.5 mm、高 50 mm,加载速率为 1 mm/min。整个试验过程均在 60℃环境箱内完成。

3 试验结果及分析

3.1 马歇尔试验结果

对 3 种矿料级配采用马歇尔方法确定的最佳油石比均为 4.5%,最佳油石比下 3 种 AC—13 沥青混合料马歇尔试验结果如表 3 所示。

表 3 3 种 AC—13 沥青混合料马歇尔试验结果							
级配类型	理论最大相对密度	毛体积相对密度	空隙率 VV/%	沥青饱和度 VFA/%	间隙率 VMA/%	稳定度 MS/kN	流值 FL/mm
Ⅰ	2.709	2.606	3.8	72.9	14.0	13.8	5.2
Ⅱ	2.718	2.601	4.3	70.1	14.4	13.2	5.8
Ⅲ	2.731	2.602	4.7	68.2	14.8	11.6	5.6

3.2 矿料级配的骨架结构表征

采用骨架接触度 SSC、骨架稳定度 S 两个指标来表征混合料中矿料的骨架结构特征,其计算公式如下:

$$SSC=100\gamma_{cm}/\gamma \tag{1}$$

式中:SSC 为沥青混合料中矿料骨架接触度(%); γ_{cm} 为沥青混合料中粗集料毛体积相对密度; γ 为粗集料干捣实状态下的毛体积相对密度。

$$\gamma_{cm}=\frac{\gamma_{mb}}{1+P_a}\cdot P_{CA} \tag{2}$$

式中: γ_{mb} 为沥青混合料的毛体积相对密度; P_a 为沥青混合料的油石比(%); P_{CA} 为沥青混合料中粗集料

的质量占比(%).

$$S=100\gamma_{cm}/\gamma_{ma} \tag{3}$$

式中: S 为沥青混合料中矿料骨架稳定度(%); γ_{ma} 为粗集料松装毛体积相对密度。

3 种沥青混合料的骨架接触度 SSC 及骨架稳定度 S 计算结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出:从级配Ⅰ到级配Ⅱ,粗集料含量增加 2.8%,骨架接触度提高了 4.2%,骨架稳定度提高了 5.9%;从级配Ⅱ到级配Ⅲ,粗集料含量增加了 4.2%,骨架接触度提高了 5.9%,骨架稳定度提高了 4.6%。随着粗集料含量的增加,骨架接触度 SSC 和

表 4 3 种级配的矿料骨架结构特征

级配类型	粗集料	骨架接触度	骨架稳定度
	含量/%	SSC/%	S/%
I	61.8	85.6	87.2
II	64.6	89.2	92.8
III	68.8	94.5	97.1

骨架稳定度 S 均逐渐增大。可见,骨架接触度 SSC 和骨架稳定度 S 两个指标可以较敏感地反映矿料骨架结构的变化情况。

3.3 车辙试验结果及分析

3 种 AC—13 沥青混合料在 60℃ 条件下的试验结果如表 5 及图 1 所示。

表 5 车辙试验结果

级配 类型	试件 编号	变形量/mm		总变形均 值/mm	动稳定度			
		45 min	60 min		DS/	均值/	标准差/	变异系
					(次·mm ⁻¹)	(次·mm ⁻¹)	(次·mm ⁻¹)	数/%
I	1	2.231	2.352	2.178	5 206	5 944	938.5	15.8
	2	1.721	1.811		7 000			
	3	2.259	2.371		5 625			
II	1	1.771	1.837	1.765	9 545	10 442	959.6	9.2
	2	1.492	1.547		11 454			
	3	1.851	1.912		10 328			
III	1	1.750	1.810	2.095	10 500	10 962	800.2	7.3
	2	1.844	1.897		11 886			
	3	2.517	2.577		10 500			

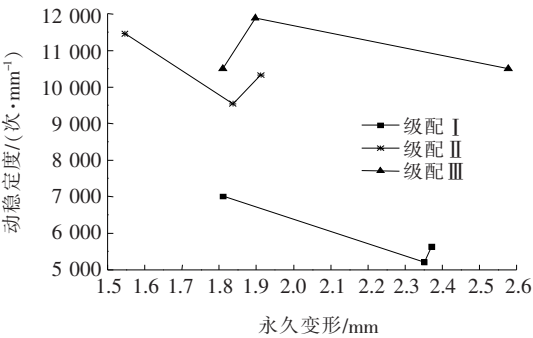


图 1 3 种沥青混合料永久变形与动稳定度关系

从表 5 可以看出:从级配 I 到级配 II,粗集料含量增加了 2.8%,动稳定度提高了 75.7%,从级配 II 到级配 III,粗集料含量增加了 4.2%,动稳定度仅提高了 5%。3 种矿料级配随着粗集料含量增大,动稳定度增大,但增加速率逐渐减小。表明当粗集料含量达到一定比例时,继续增加粗集料含量对高温稳定性贡献不大。

从表 5 和图 1 可以看出:① 无论是从每种级配的沥青混合料平行试验结果来看,还是从 3 种级配的沥青混合料对比结果来看,永久变形越小动稳定度并不一定就高,车辙试验的永久变形与动稳定度结果并不一致;② 从级配 II 和级配 III 动稳定度试验结果可以看

出:级配 II 和级配 III 沥青混合料平行试验结果的标准偏差甚至超过了两种沥青混合料动稳定度结果的差值,这表明当两种类型沥青混合料高温性能相差不大时,采用动稳定度评价其高温性能的区分度不高,可靠性相对较低,此种情况下采用动稳定度指标评价其高温性能可能造成评价结果与实际情况不符。

3.4 单轴贯入试验结果及分析

无侧限抗压及单轴贯入试验结果如表 6 所示。

表 6 无侧限抗压及单轴贯入试验结果

级配类型	单轴压缩破坏荷载/kN	单轴抗压强度/MPa	单轴贯入破坏荷载/kN	单轴贯入破坏强度/MPa
I	9.626	1.226	2.325	3.646
II	9.126	1.162	2.887	4.527
III	8.854	1.128	2.906	4.558

参考孙立军采用三维有限元进行力学分析得到的贯入强度为 1 MPa、泊松比为 0.35 时的强度参数,该文以此为基础利用单轴抗压试验和单轴贯入试验得到混合料抗剪强度 τ_{\max} 、黏聚力 c 及内摩擦角 φ ,结果如表 7 所示。

表 7 3 种 AC-13 沥青混合料抗剪强度结果

级配类型	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	τ_{\max} /MPa	$\varphi/(^\circ)$	c /MPa
I	2.789 2	0.317 9	1.236	41.5	0.276 5
II	3.463 2	0.394 8	1.535	45.0	0.240 6
III	3.486 9	0.397 5	1.545	45.4	0.231 5

从表 7 可以看出:随着混合料中粗集料含量增加,混合料抗剪强度逐渐增大,沥青胶浆的黏聚力逐渐减小,内摩擦角逐渐增大。从级配 I 到级配 II,粗集料含量增加 2.8%,抗剪强度提高了 24.2%,内摩擦角增大了 8.4%,黏聚力降低了 13%;从级配 II 到级配 III,粗集料含量增加了 4.2%,抗剪强度仅提高了 0.7%,内摩擦角仅增大 0.9%,黏聚力降低了 3.8%。结合表 4 可知:当粗集料含量小于 65%时,随着粗集料含量的增加,矿料骨架嵌锁程度增强,抗剪强度也有较大幅度的提升,当粗集料含量超过 65%时,继续增加粗集料含量依然能较明显地提升矿料骨架嵌锁程度,但对抗剪强度的提升作用不明显。这也表明并非矿料骨架结构嵌锁程度越高,混合料的抗剪强度就越好。分析原因认为:随着粗集料的增加,细集料含量减少,矿料比表面积减小,相同油石比下沥青膜厚度减小,结构沥青含量降低,造成沥青胶浆的黏聚力减小,这种减小的幅度相对于抗剪强度来说影响很小。但由于粗集料形成的骨架嵌锁结构需要沥青胶浆的黏聚力进行约束和稳定,当粗集料含量过多时,细集料和沥青形成的沥青砂浆体系的黏聚力降低,对粗集料骨架嵌锁结构的约束作用减弱,从而削弱了粗集料的骨架嵌锁结构对混合料抗剪强度的贡献;另一方面,细集料含量减少导致粗集料形成的矿料骨架空隙缺少足够的沥青砂浆进行填充,从而影响混合料的密实性。虽然沥青砂浆的黏聚力相对于抗剪强度的贡献率较小,但在混合料结构体系中,矿料骨架结构与沥青砂浆相互作用、相互制约,共同形成混合料的强度。因此当粗集料含量增加到一定比例后继续增加时,混合料的密实度降低,抗剪强度提升幅度很小甚至可能降低。对沥青混合料进行设计时,在保障混合料密实度前提下可通过提高矿料骨架嵌锁程度来有效提升混合料的抗剪强度。

3.5 各指标与抗剪强度相关性分析

骨架接触度 SSC、骨架稳定度 S 及车辙试验的永久变形、动稳定度与混合料抗剪强度关系如图 2~4 所示。

由图 2 可以看出:骨架接触度 SSC、骨架稳定度 S 与混合料抗剪强度具有较好的相关性,相关系数分别

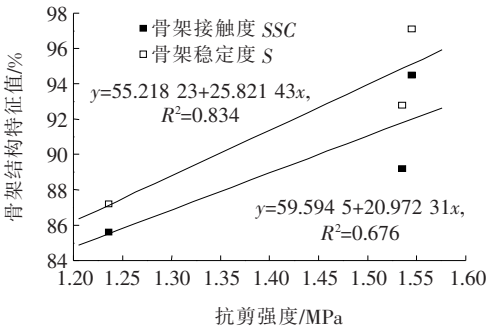


图 2 矿料骨架特征与抗剪强度关系

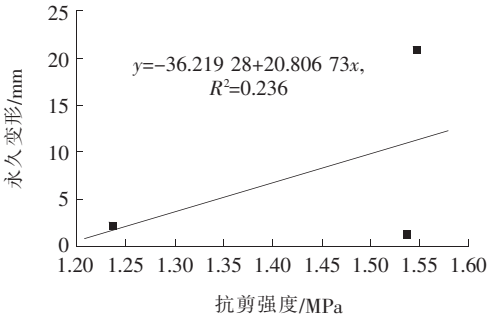


图 3 永久变形与抗剪强度关系

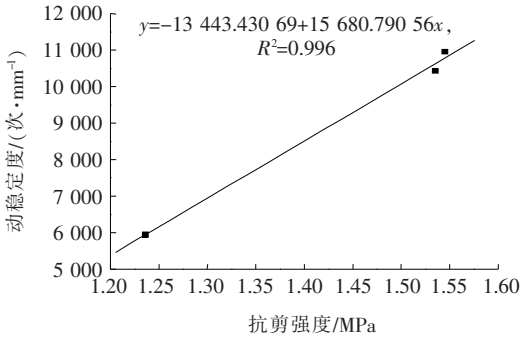


图 4 动稳定度与抗剪强度关系

达到 0.676、0.834。因此在对沥青混合料进行设计时可以采用骨架接触度和骨架稳定度对混合料中矿料骨架结构进行初步评价,实现对混合料高温稳定性设计的初期控制,而无需等到高温性能验证时才能得知结果,一旦不合格又得从头开始。既避免了初期设计的不确定性和盲目性,降低反复尝试的工作量,又可以实现初期对矿料级配的优化,提高混合料高温性能设计的可靠度。

由图 3 可以看出:永久变形与抗剪强度相关性很差,这也表明采用车辙试验的永久变形评价混合料的高温稳定性并不合理。这主要是因为室内车辙试验次数较少,永久变形仅反映了初期的压密变形。而在实际工程项目中,很多工程项目沥青路面的现场压实度已远超过现行 JTG F40—2017《公路沥青路面施工技

术规范》规定的 93% 的控制标准,开放交通后压密变形的空间较小,主要的车辙病害是高温重载下结构失稳所致,此时的路面变形包括前期的压密变形和沥青混合料失稳后的剪切流动变形两部分,而初期压密变形占比较小,可见,室内车辙永久变形并不能真实反映路面实际的车辙变形情况,因此不适合用来直接评价混合料的高温稳定性。

由图 4 可以看出:动稳定度与抗剪强度具有很好的相关性,相关系数高达 0.996,这也表明采用动稳定度评价混合料的高温稳定性在一定程度上是合理的。但由于动稳定度结果离散性很大,当两种沥青混合料的高温性能相差不大时,采用动稳定度指标来评价高温稳定性时敏感性和区分度均较低,可靠性不足。

4 结论

通过引入骨架接触度和骨架稳定度指标,对不同矿料级配下的沥青混合料的粗集料骨架结构特征进行量化,从而建立了矿料骨架结构特征与混合料抗剪强度的相关关系,分析了常规高温性能评价指标即车辙试验的永久变形和动稳定度与抗剪强度的相关性,得到以下结论:

(1) 骨架接触度 SSC 和骨架稳定度 S 与混合料的抗剪强度正相关,可采用这两个指标对混合料的高温稳定性进行初期设计,指导矿料级配的优化,避免矿料级配设计的不确定性和盲目性,从而提高混合料高温性能设计的可靠度。

(2) 车辙试验的永久变形与抗剪强度相关性较差,不适合用来直接评价混合料的高温稳定性。

(3) 动稳定度指标在评价沥青混合料的高温稳定性的总体趋势上与抗剪强度结果一致,且具有很好的相关性,但在评价两种高温性能相差不大的混合料时,动稳定度指标并不合适,此种情况下建议增加抗剪强度评价指标。

(4) 由于该文研究的矿料级配类型较少,粗集料变化的范围也较窄,样本数量有限,研究成果的适用性

还需大量后续试验验证。如粗集料含量不变时,粗集料级配、细集料级配对矿料骨架结构特征及抗剪强度的影响如何;继续增加粗集料含量时,骨架接触度、骨架稳定度与抗剪强度还是否正相关等。

参考文献:

- [1] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 张争奇,陶晶,杨博. 沥青混合料高温性能设计参数研究[J]. 中国公路学报,2009(1).
- [3] 陈忠达,袁万杰,薛航,等. 沥青混合料高温性能评价指标[J]. 长安大学学报(自然科学版),2006(5).
- [4] 王登忠,严恒. 沥青混合料高温性能试验方法探讨[J]. 石油沥青,2009(6).
- [5] 田卫群,周斌,丛菱,等. 改性沥青混合料高温性能及其评价方法[J]. 建筑材料学报,2009(3).
- [6] 孟书涛,黄晓明,范要武,等. 沥青混合料动稳定度试验的分析[J]. 公路交通科技,2005(11).
- [7] 岳学军,黄晓明. 沥青混合料高温稳定性评价指标的试验研究[J]. 公路交通科技,2006(10).
- [8] 毕玉峰,孙立军. 沥青混合料抗剪试验方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005(8).
- [9] 高振鑫,李强,蒋应军,等. 基于单轴贯入试验的 AC-20 级配优化[J]. 中国公路学报,2017(4).
- [10] 汤文,孙立军. 不同温度下沥青混合料的抗剪性能及其评价指标[J]. 公路,2012(3).
- [11] 朱昆,扈慧敏. 基于抗剪切性能的大粒径沥青混合料级配设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2013(8).
- [12] 周长红,袁强,李玉华. 压头尺寸对 HMA 单轴贯入试验性能影响的数值分析[J]. 公路交通科技,2016(2).
- [13] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [14] 邱颖峰. 骨架密实结构沥青混合料级配设计及路用性能研究[D]. 同济大学博士学位论文,2007.
- [15] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [16] 彭勇,孙立军,石永久,等. 沥青混合料抗剪强度的影响参数[J]. 东南大学学报(自然科学版),2007(2).
- [17] 葛冬冬. 沥青混合料单轴贯入试验的细观分析[D]. 湖南大学硕士学位论文,2014.