

集料颗粒形状对骨架结构体积指标及 SGC 压实特性影响研究

何昌轩, 陆 阳, 黄晚清

(西南交通大学土木工程学院 成都市 610031)

摘 要:以棱角状碎石和圆角状卵石(后者又分为球体和椭球体)为粗集料,测试了集料颗粒形状对骨架结构 VCA_{DRC} 的影响。结果证实,棱角状碎石的 VCA_{DRC} 明显大于圆角状卵石的 VCA_{DRC} ,圆角状卵石中又以椭球体颗粒的 VCA_{DRC} 大于球体颗粒的 VCA_{DRC} 。在此基础上,对 SMA-20 等 3 种典型配比的混合料分别采用马歇尔及 SGC 成型。通过混合料体积指标的测定及对比分析,发现相对于圆角状卵石而言,由棱角状碎石颗粒构成的混合料具有较大的 VV 、 VMA 、 VCA_{mix} ,而且混合料的抗变形能力及稳定性均较优。

关键词:集料颗粒形状;骨架结构;体积指标;SGC 压实特性

沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)具有三多一少的特点,即粗集料多、矿粉多、沥青结合料多、细集料少^[1]。由于粗集料相对用量大,其级配、集料的形状和表面纹理、空隙率等会直接影响到沥青混合料的性能。而压实试件的体积参数:空隙率(VV)、矿料空隙率(VMA)和粗集料骨架空隙率(VCA_{mix})是 SMA 骨架结构能否形成的关键指标。

通过旋转压实能够了解室内压实试件在压实过程中高度的精确变化;进而得到试件的密实过程。而密实曲线可反映沥青混合料在施工期间的压实特性和开放交通后的交通荷载作用下的密实度变化特性^[2]。

笔者选取了 3 种集料颗粒形状,通过若干组级配的体积指标和 SGC 压实特性评价了集料颗粒形状对沥青混合料体积指标和压实特性的影响。

1 考虑集料级配和颗粒形状的 VCA_{DRC} 试验研究

鉴于本文以 SMA20 作为研究对象,故定义 VCA (Voids in Coarse Aggregate)为 4.75 mm 以上的粗集料骨架之间的松装空隙率。 VCA 的大小与粗集料粒径大小、级配组成、几何形状、表面微观纹理、颗粒间排列组合方式、外在约束条件(即容器大小、边界约束条件和铺筑层厚度等)有关。捣实状态下粗

集料的松装空隙率 VCA_{DRC} 是检验 SMA 骨架能否形成的关键指标。与压实后的沥青混合料的粗集料骨架空隙率 VCA_{mix} (粗集料骨架部分以外的体积占试件总体积的百分率)比较,如果 $VCA_{mix} \leq VCA_{DRC}$,则 SMA 形成了以粗集料为骨架的结构。

研究中根据颗粒表面情况,将集料颗粒形状分为两大类,即圆角状和棱角状;进而根据圆角状颗粒的三维尺度 a 、 b 、 c ($a < b < c$) 间的比例关系将其分为球体 ($a \approx b \approx c$) 和椭球体 ($a/c \leq 2.5$ 且 $b/c \leq 1.5$)。

1.1 单一级粒径粗集料组成的骨架结构 VCA_{DRC} 研究

把圆角状卵石(球体和椭球体)和棱角状碎石分为 4.75 mm~95 mm、9.5 mm~13.2 mm、13.2 mm~16 mm、16 mm~19 mm、19 mm~26.5 mm 等 5 个粒径组合,对 3 种颗粒形状的每个粒级集料分别进行干插捣堆积密度和空隙率试验,试验容器容积为 10 L,容器高 235 mm,直径为 233 mm,试验依据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005) T0309—2005 进行,其结果汇总于表 1 及图 1。

分析表 1 和图 1 发现,对相同颗粒形状的粗集料,除 4.75~9.5 mm 粒径组外,分组粒径对 VCA_{DRC} 的影响并不十分显著。但颗粒形状对 VCA_{DRC} 的影响

表 1 棱角状颗粒(碎石)试验结果

颗粒粒径/mm	毛体积密度/(g/cm ³)			捣实密度/(g/cm ³)			VCA _{DRC} /%		
	棱角状碎石颗粒	圆角状球体颗粒	圆角状椭球体颗粒	棱角状碎石颗粒	圆角状球体颗粒	圆角状椭球体颗粒	棱角状碎石颗粒	圆角状球体颗粒	圆角状椭球体颗粒
4.75~9.5(第1组)	2.822	2.657	2.737	1.634	1.715	1.708	42.09	35.47	37.60
9.5~13.2(第2组)	2.838	2.720	2.722	1.677	1.757	1.753	40.90	35.42	35.62
13.2~16(第3组)	2.792	2.696	2.698	1.648	1.759	1.761	40.97	34.78	34.73
16~19(第4组)	2.796	2.735	2.737	1.654	1.790	1.772	40.85	34.57	35.25
19~26.5(第5组)	2.793	2.733	2.738	1.678	1.794	1.785	39.94	34.37	34.81

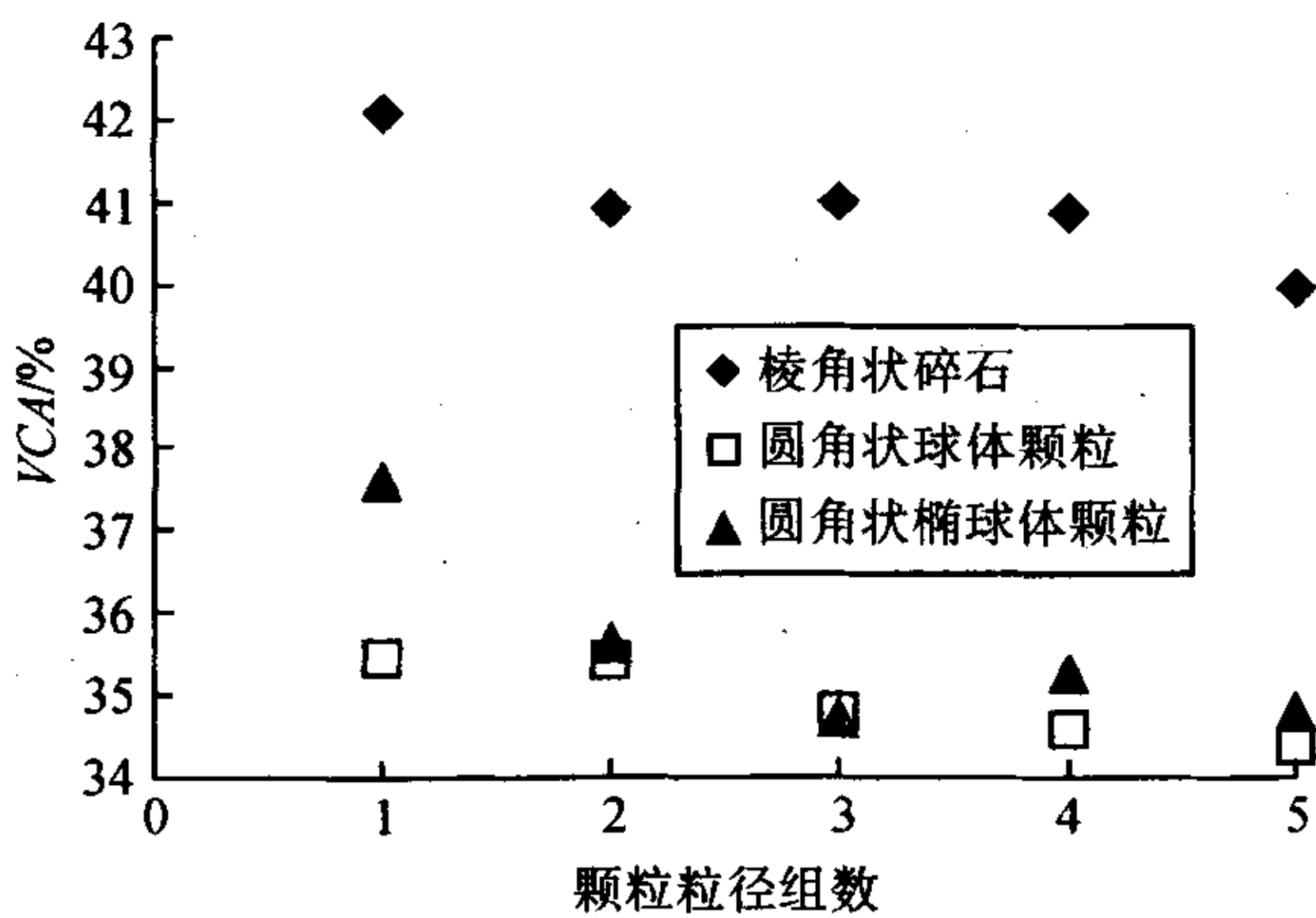


图 1 均匀粒径粗集料试验的VCA 数值图解

却非常显著,取同一形状的 5 组粒径集料 VCA_{DRC} 的平均值,分别得到棱角状的碎石的 VCA_{DRC} 为

40.95%、圆角状椭球体卵石的为35.60%、圆角状球体卵石的为34.92%。棱角状颗粒比圆角状颗粒堆积要松散得多,就圆角状卵石而言,三维尺度越是接近,堆积越密实。所以现行规范要求骨架密实结构的混合料(SMA)粗集料选取时要求颗粒形状尽量接近于立方体,以获得更加密实的骨架结构。

1.2 典型级配骨架结构 VCA_{DRC} 试验研究

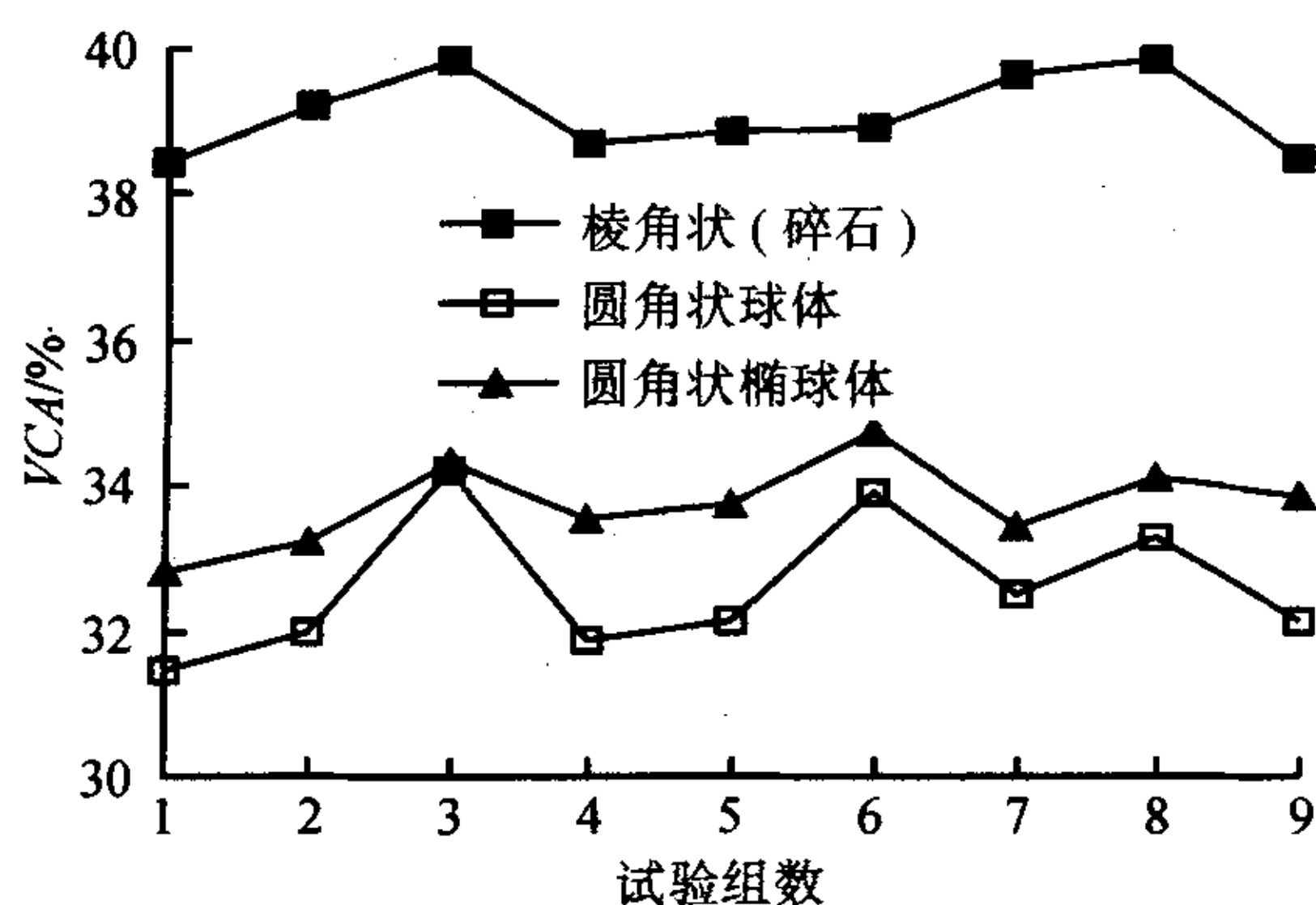
依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)设计SMA-20 以及AM-20,并测试粗集料骨架结构的VCA_{DRC}(表2 和表3)。分析VCA_{DRC}的变化趋势(图2)可知,两种圆角状颗粒形状粗集料骨架结构的VCA_{DRC}随级配的变化趋势基本相同,但棱角状碎石则不然。

表 2 粗集料级配组成

颗粒粒径 mm	SMA-20					AM-20			
	上限/%	中值/%	下限/%	Coarse/%	Fine/%	上限/%	中值/%	下限/%	修改/%
4.75~9.5	26.83	30.90	35.71	14.92	41.10	29.4	34.5	41.67	36.8
9.5~13.2	26.83	32.22	38.57	19.63	35.34	11.8	13.8	16.67	10.5
13.2~16	12.20	13.17	14.29	28.80	13.09	11.8	13.8	16.67	10.5
16~19	21.95	17.12	11.43	23.56	10.47	35.3	31.0	25.00	31.6
19~26.5	12.20	6.59	0.00	13.10	0.00	11.8	6.9	0.00	10.5

表 3 典型级配 3 种颗粒形状 VCA_{DRC} 试验结果

试验组数	棱角状(碎石)		圆角状球体		圆角状椭球体	
	捣实密度/(g/cm ³)	VCA _{DRC} /%	捣实密度/(g/cm ³)	VCA _{DRC} /%	捣实密度/(g/cm ³)	VCA _{DRC} /%
第1组 SMA-20 上限	1.732	38.43	1.854	31.45	1.834	32.79
第2组 SMA-20 中值	1.713	39.20	1.837	31.97	1.820	33.25
第3组 SMA-20 下限	1.697	39.83	1.773	34.24	1.790	34.32
第4组 AM-20 上值	1.721	38.72	1.842	31.90	1.815	33.53
第5组 AM-20 中值	1.718	38.87	1.832	32.14	1.809	33.73
第6组 AM-20 下值	1.696	38.89	1.779	33.93	1.781	34.72
第7组 SMA-20Coarse	1.693	39.65	1.828	32.49	1.812	33.46
第8组 SMA-20Fine	1.697	39.83	1.796	33.27	1.796	34.12
第9组 AM-20 修改	1.727	38.51	1.832	32.14	1.807	33.83
均值		39.19		32.61		33.75

图2 典型级配骨架结构 VCA_{DRC} 测试结果

无论哪种颗粒形状,以规范推荐的SMA 下限为配比的 VCA_{DRC} 最小,以 SMA 上限为配比的 VCA_{DRC} 最大,若分别对这两组级配 3 种颗粒形状的粗集料的 VCA_{DRC} 取均值,发现 SMA 下限级配和 SMA 上限级配的 VCA_{DRC} 相差 2 个百分点。由此认为:集料颗粒形状对 VCA_{DRC} 有决定性的影响,级配对 VCA_{DRC} 的影响次之。

对 SMA-20 和 AM-20 的级配上限、中值、下限而言,3 种颗粒形状对应的 VCA_{DRC} 大小排列次序均为:级配上限 < 级配中值 < 级配下限,即就本文的试验条件而言,在规范要求的级配范围内,颗粒越细 VCA_{DRC} 值越大,但是圆角状卵石 VCA_{DRC} 随着级配的变化比棱角状碎石随级配的变化要显著一些,第 7 组和第 8 组的结果也显示出同样的变化规律。

2.3 同一级配颗粒形状组合 VCA_{DRC} 试验研究

为了较深入研究颗粒形状对 VCA_{DRC} 的影响,现考虑两个影响水平(球体和椭球体两种颗粒形状)和 4.75~9.5 mm、9.5~13.2 mm、13.2~16 mm、16~19 mm、19~26.5 mm 等 5 个因素,分为 A、B、C 3 种级配(表 4)进行正交试验,为了增加试验结果的可比性,特增加了第 9 组,试验组合见表 5。

表4 级配组成

级配类型	4.75~ 9.5 mm	9.5~ 13.2 mm	13.2~ 16 mm	16~ 19 mm	19~ 26.5 mm
A/%	26.8	26.8	12.2	22.0	12.2
B/%	30.5	31.8	13.0	16.9	6.5
C/%	36.8	10.5	10.5	31.6	10.5

从表 6 和图 3 的正交试验结果可以看出,级配 A、B、C 最大的 VCA_{DRC} 分别出现在第 7 组、第 7 组、第 8 组,最小的 VCA_{DRC} 分别出现在第 1 组、第 4 组、第 4 组。级配 A、B、C 的 VCA_{DRC} 最大值与最小值的极差分

表5 正交试验组合

	4.75~ 9.5 mm	9.5~ 13.2 mm	13.2~ 16 mm	16~ 19 mm	19~ 26.5 mm
第 1 组	球	球	球	球	球
第 2 组	球	球	球	椭球	椭球
第 3 组	球	椭球	椭球	椭球	椭球
第 4 组	球	椭球	椭球	球	球
第 5 组	椭球	球	椭球	球	椭球
第 6 组	椭球	球	椭球	椭球	球
第 7 组	椭球	椭球	球	球	椭球
第 8 组	椭球	椭球	球	椭球	球
第 9 组	椭球	椭球	椭球	椭球	椭球

别是 2.49、1.49、2.19。所有颗粒形状的 VCA_{DRC} 极大峰值并不是出现在颗粒形状全部为椭球体的第 9 组,说明颗粒形状的组合对 VCA_{DRC} 有一定影响,但是随着级配的不同,其影响程度也不同。随着颗粒形状组合的不同,级配 A、B、C 的 VCA_{DRC} 大小变化次序也不同,第 1 组、第 2 组、第 4 组、第 5 组、第 9 组:级配 C > 级配 B > 级配 A;第 6 组、第 8 组:级配 C > 级配 A > 级配 B;第 3 组:级配 B > 级配 C > 级配 A;第 7 组:级配 C > 级配 A > 级配 B,也即不同颗粒形状的组合会导致 3 种同样级配的 VCA_{DRC} 的相对大小关系发生变化。

表6 正交试验 VCA_{DRC} 试验测试结果

	级配 A		级配 B		级配 C	
	捣实密度	VCA_{DRC}	捣实密度	VCA_{DRC}	捣实密度	VCA_{DRC}
	g/cm ³	%	g/cm ³	%	g/cm ³	%
第 1 组	1.854	31.45	1.837	31.99	1.832	32.14
第 2 组	1.854	31.48	1.827	32.36	1.805	33.19
第 3 组	1.830	32.39	1.816	32.81	1.816	32.78
第 4 组	1.850	31.62	1.842	31.80	1.836	32.00
第 5 组	1.841	32.48	1.821	33.19	1.800	34.09
第 6 组	1.817	33.39	1.842	32.41	1.814	33.56
第 7 组	1.802	33.94	1.818	33.29	1.802	34.00
第 8 组	1.822	33.19	1.830	32.87	1.793	34.33
第 9 组	1.834	32.79	1.820	33.25	1.807	33.83

采用直观分析法(或极差分析法)考察同一因素的不同水平对 VCA_{DRC} 的影响,对 4.75~9.5 mm 这一因素,球体颗粒的结果取第 1 组、第 2 组、第 3 组和第 4 组的 VCA_{DRC} 的平均值,椭球体颗粒的结果取第 5

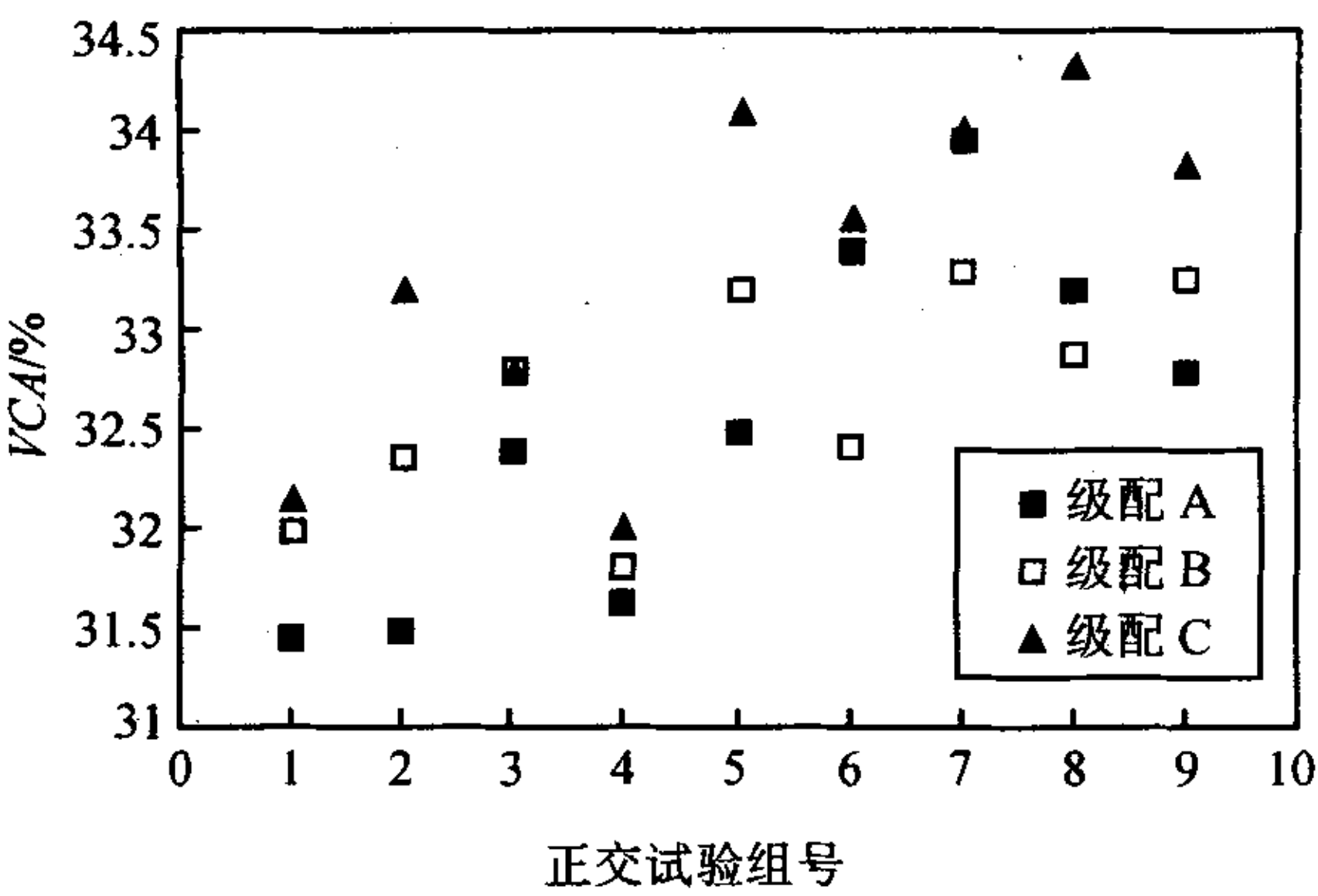


图3 正交试验VCA_{DRC}测试结果

组、第6组、第7组和第8组的VCA_{DRC}的平均值。类似地可以对其他因素的结果进行同样的处理,得到表7。除了13.2~16 mm这个因素外,3种级配的椭球体水平可以获得比球体水平更大的VCA_{DRC},尤其级配A和级配C的4.75~9.5 mm粒径这一因素更为明显。

2 骨架密实结构混合料体积指标

2.1 级配选取

试验选取细集料组成不变,变化粗集料组成的3种典型级配,分别命名为SMA粗、SMA中和SMA细。具体级配组成可见表8。

表7 各因素颗粒形状对VCA_{DRC}影响计算

级配类型		4.75~9.5 mm	9.5~13.2 mm	13.2~16 mm	16~19 mm	19~26.5mm
级配A	球体/%	31.735	32.200	32.515	32.373	32.413
	椭球体/%	33.250	32.785	32.470	32.613	32.573
级配B	球体/%	32.240	32.488	32.628	32.568	33.008
	椭球体/%	32.940	32.693	32.553	32.613	33.515
级配C	球体/%	32.528	33.245	33.415	33.058	33.008
	椭球体/%	33.995	33.278	33.108	33.465	33.515

表8 骨架结构混合料组合配合比

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
SMA中级配/%	100	95	82	72	47.5	23.4	18.9	14.9	12.6	11.9	11.2	9.5
SMA细级配/%	100	100	92	82	55	23.4	18.9	14.9	12.6	11.9	11.2	9.5
SMA粗级配/%	100	90	72	50	35	23.4	18.9	14.9	12.6	11.9	11.2	9.5

2.2 马歇尔试验结果评价

试验用70号SBS I-C改性沥青,油石比为5.5%,德兰尼特ASⅡ型沥青混凝土专用增强纤维,纤维含

量为0.4%。拌和温度为170℃,击实温度为160℃,双面击实30次成型试件,体积指标计算结果列于表9。

表9 变化粗集料组成的马歇尔试件体积参数

粗集料颗粒形状	级配类型	毛体积密度/(g/cm ³)	VV/%	VA/%	VMA/%	VFA/%	VCA/%	VCA _{DRC} /%
圆角状球体卵石 +5.5%油石比	SMA粗	2.458	2.7	11.0	13.7	80.1	30.67	32.49
	SMA中	2.409	4.5	10.7	15.2	70.6	31.83	31.99
	SMA细	2.398	4.8	10.6	15.4	69.1	31.95	33.27
圆角状椭球体卵石 +5.5%油石比	SMA粗	2.462	2.9	11.0	13.9	79.0	30.92	33.46
	SMA中	2.434	4.1	10.9	15.0	72.5	31.80	33.25
	SMA细	2.400	5.5	10.7	16.2	66.2	32.75	34.12
棱角状碎石 +5.5%油石比	SMA粗	2.446	5.6	10.8	16.4	65.9	33.41	39.65
	SMA中	2.387	8.3	10.3	18.6	55.5	35.25	39.20
	SMA细	2.383	8.7	10.2	18.9	54.1	35.46	39.83

表9的结果显示,相同级配、油石比的骨架结构混合料,棱角状碎石的空隙率远大于圆角状卵石的

空隙率,极差在2.7~4.2之间;而圆角状卵石两种形状混合料的空隙率差别相对较小,且两者相对大

小关系随级配的变化而改变, SMA 粗级配和细级配: 椭球体 > 球体; SMA 中级配: 球体 > 椭球体。说明集料颗粒形状, 尤其是棱角状碎石相对圆角状卵石, 对骨架密实结构混合料的空隙率影响非常显著, 棱角状的颗粒会导致粗集料堆积产生较大的 VCA, 相同的细集料及沥青用量条件下, 必然导致较大的空隙率。

VMA 由混合料的空隙率 VV 和沥青的体积百分率 VA 两部分组成, 单从沥青的体积百分率 VA 看, 棱角状碎石小于圆角状卵石, 但由于棱角状碎石空隙率远大于圆角状卵石, 最终导致棱角状碎石的 VMA 远大于圆角状卵石。圆角状卵石的两种颗粒形状 VMA 的变化规律也由 VV 的变化控制。说明集料颗粒形状对 VV 的影响非常显著, 而对 VA 的影响相对很小。

相同颗粒形状和油石比条件下, 本文所研究的 SMA 粗级配的压实试件的毛体积密度最大, 孔隙率、矿料间隙率和粗集料间隙率最小; SMA 细级配的压实试件的毛体积密度最小, 空隙率、矿料间隙率和粗集料间隙率最大; SMA 中级配的各项体积指标居中。以空隙率为例, 考察颗粒形状对 3 种级配体

积指标的变化幅度, 棱角状碎石的变化幅度最大, 最大值与最小值相差 3.1; 圆角状椭球体卵石次之, 为 2.6; 圆角状球体卵石最小, 为 2.1。

3 SGC 压实特性研究

根据表 8 和表 9 的级配及用油量进行混合料配比, 并采用 Superpave 旋转压实仪成型, 得到了图 4 的旋转压实密实曲线 (由于篇幅的关系只列出了 SMA 中级配 3 种颗粒形状的压实曲线)。通过对密实曲线压实特性的分析, 得到了表 10 和表 11。

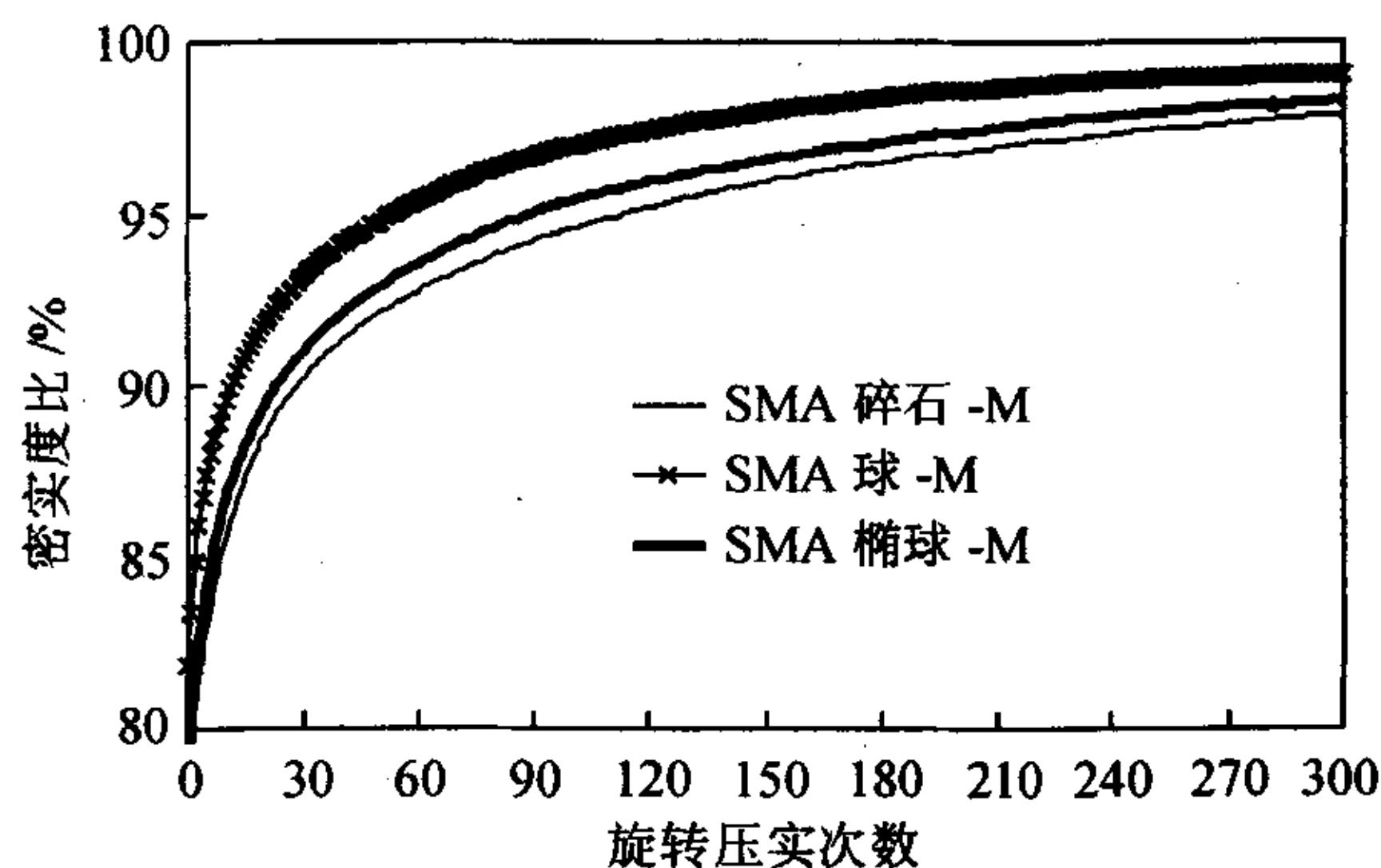


图 4 SMA-20 中值级配旋转压实密实曲线

表 10 骨架结构混合料密实特性及能量特性参数

级配类型		密实特性参数				能量特性参数		
		半对数坐标系下 $N_{ini}-N_{des}$ 平均斜率	自然坐标系下的斜率		然坐标系下 $N_{des}-N_{max}$ 平均斜率	CEI	TDI96	TDI98
			N_{ini}	N_{des}				
SMA 粗	圆角状球体卵石	3.87	0.449 1	0.047 5	0.030 3	51.551	81.113	29.966
	圆角状椭球体卵石	3.89	0.378 8	0.035 5	0.018 2	64.265	112.799	82.661
	棱角状碎石	3.95	0.384 1	0.026 8	0.012 8	148.148	189.252	204.304
SMA 中	圆角状球体卵石	3.2	0.384 9	0.039 2	0.025 3	29.087	99.953	56.563
	圆角状椭球体卵石	3.68	0.369 1	0.030 3	0.014 9	98.615	157.346	153.203
	棱角状碎石	3.77	0.345 9	0.025 6	0.013 4	140.969	202.139	173.394
SMA 细	圆角状球体卵石	3.73	0.456 1	0.045 3	0.029 4	51.636	98.534	47.859
	圆角状椭球体卵石	3.7	0.366 8	0.029 4	0.012 9	102.871	155.051	186.41
	棱角状碎石	3.37	0.304 2	0.018 9	<0.011 6	106.341	282.003	324.216

3.1 密实度斜率及密实度能量指数 CEI 与交通密实指数 TDI 比较

考察表 10 的密实特性参数, SMA 粗级配和 SMA 中级配, 棱角状碎石的 $N_{ini}-N_{des}$ 平均斜率最小, 圆角状球体卵石的 $N_{ini}-N_{des}$ 平均斜率最大, 说明棱角状碎石混合料的压实速率最小、可压实性较差, 圆角状球体卵石混合料的可压实性较好; 而 SMA 细级配则得到圆角状球体卵石的可压实性最差。3 种级配 $N_{des}-N_{max}$ 之间的密实度斜率表明圆角

状球体卵石最容易压实到密实极限状态, 说明棱角状碎石相比较而言具有最好的抗变形能力。比较同样颗粒形状的 3 种级配, 在含油量相同的情况下, 对棱角状碎石而言, $N_{ini}-N_{des}$ 平均斜率和两个定点斜率的变化规律为 SMA 粗 > SMA 中 > SMA 细, 也即 SMA 粗级配具有最大的压实速率, SMA 细级配的压实速率最小。对圆角状的卵石颗粒, 大小顺序则变为 SMA 粗 > SMA 细 > SMA 中。

从表 10 的能量特性参数可看出, 对于相同级配

表 11 混合料压实次数及骨架结构混合料 LP 值分析情况

级配类型		稳定性参数			骨架特性参数			
		N_5	N_2	压实 次数比	LP	LP 下 空隙率	$(LP+50)$ 次 下空隙率	以上两者 之差
SMA 细	圆角状球体卵石	55	138	2.51	98	96.6	97.9	1.3
	圆角状椭球体卵石	70	203	2.9	105	95.5	96.6	1.1
	棱角状碎石	99	300	3.03	110	94.9	96.2	1.3
SMA 中	圆角状球体卵石	53	150	2.83	104	97.2	98.2	1
	圆角状椭球体卵石	88	255	2.9	105	96.3	97.4	1.1
	棱角状碎石	113	300	2.65	105	95.1	96.2	1.1
SMA 粗	圆角状球体卵石	57	145	2.54	113	97.3	98.3	1
	圆角状椭球体卵石	92	279	3.03	114	95.7	96.7	1
	棱角状碎石	116	>300	3.44	103	94.7	95.6	0.9

的混合料,在施工过程中圆角状球体卵石消耗的压实功最小,棱角状碎石消耗的压实功最大。交通密实度指数也显示出同样的变化顺序,说明棱角状碎石可以承受更多的交通荷载,圆角状球体很容易达到设计空隙率以及塑性破坏区。同一颗粒形状,不同级配的能量参数,棱角状碎石颗粒:棱角状碎石施工过程的密实能量指数 $CEI_{SMA粗} > CEI_{SMA中} > CEI_{SMA细}$,说明 SMA 粗级配可压实性最差;圆角状椭球体卵石: $CEI_{SMA细} > CEI_{SMA中} > CEI_{SMA粗}$,说明 SMA 细级配可压实性最差;圆角状球体卵石:SMA 粗级配和 SMA 细级配的 CEI 相差不大,均大于 SMA 中级配,表明 SMA 粗级配和 SMA 细级配具有相当的可压实性。路面服务早期的交通密实度指数,棱角状碎石: $TDI96_{SMA粗} > TDI96_{SMA中} > TDI96_{SMA细}$;圆角状卵石, SMA 细级配和 SMA 中级配的 CEI 相差不大,均大于 SMA 粗级配。路面达到极限密实程度过程的交通密实度指数,棱角状碎石和圆角状椭球体卵石: $TDI98_{SMA细} > TDI98_{SMA粗} > TDI98_{SMA中}$;圆角状球体卵石: $TDI98_{SMA中} > TDI98_{SMA细} > TDI98_{SMA粗}$ 。

同时结果还显示,棱角状碎石 3 组级配的几个能量指数的变化幅度比圆角状卵石要大得多,如棱角状碎石 SMA 中级配、SMA 粗级配、SMA 细级配的 $TDI96$ 分别为202.139、189.252和282.003;而球体卵石3个值分别为99.953、81.113和98.534,变化幅度要小得多。

3.2 压实次数比以及集料骨架点 LP 比较

表 11 的压实次数比表明,对于 SMA 粗级配和 SMA 细级配,棱角状碎石颗粒组成的混合料具有最好的稳定性,圆角状球体卵石的稳定性相对最差;而对于 SMA 粗级配,椭球体卵石的稳定性最好,棱角状

碎石的稳定性反而最差。考察同一颗粒形状,3 种级配的压实次数比,发现随着颗粒形状的不同,3 种级配的压实次数比的大小顺序同样在发生着变化,圆角状球体卵石:SMA 中级配>SMA 细级配>SMA 粗级配;圆角状椭球体卵石:SMA 中级配=SMA 粗级配<SMA 细级配;棱角状碎石:SMA 细级配>SMA 粗级配>SMA 中级配。SMA 3 种级配的稳定性随着集料颗粒形状的不同,其相对大小发生了变化。

由表 11 的骨架特性参数可知,对同一级配不同颗粒形状而言, SMA 中级配的 3 种颗粒形状的 LP 值相差不多,但骨架点空隙率是不同的,圆角状球体卵石的最大,棱角状碎石的最小,在 LP 之后再压实 50 次的空隙率与 LP 时的空隙率之差基本相当,由此可推断 3 种颗粒形状在抵抗进一步压实方面性能相当。SMA 粗级配的 LP 值,碎石>椭球体>球体,骨架点空隙率同样是圆角状球体卵石的最大,棱角状碎石的最小,在抵抗进一步压实性能方面椭球体卵石是最好的。SMA 细级配 LP 值,卵石大于碎石,骨架点空隙率的大小次序与前两种级配变化规律相同,在抵抗进一步的压实方面,3 种颗粒形状大致相当。考察同一颗粒形状不同级配的 LP 值,对圆角状球体卵石,有 SMA 粗级配<SMA 中级配<SMA 细级配。 LP 下的空隙率,球体:SMA 细级配>SMA 中级配>SMA 粗级配,椭球体:SMA 中级配>SMA 细级配>SMA 粗级配。棱角状碎石的 3 种级配的 LP 值有 SMA 粗级配>SMA 中级配>SMA 细级配, SMA 中级配 LP 下的空隙率最大, SMA 细级配在抵抗进一步的压实方面效果最好。

4 结论

对 3 种颗粒形状集料多种级配组合下的 VCA_{DRC}

进行了测定,并选用了 3 种典型的 SMA 级配,对其体积指标及压实特性进行了评价,主要结论如下。

(1)集料颗粒形状对 VCA 的影响非常大,棱角状颗粒的 VCA 大于圆角状颗粒的 VCA,椭球体颗粒的 VCA 大于球体颗粒的 VCA。

(2)单一粒径集料的 VCA 较大。

(3)对 VCA 的大小取决定性作用的是集料本身的性质,如本文所研究颗粒形状,级配对 VCA 的影响相对要弱一些。

(4)在相同颗粒形状,相同击实功和油石比的情况下,SMA 粗级配的压实试件的毛体积密度最大,空隙率、矿料间隙率和粗集料间隙率最小;SMA 细级配的压实试件的毛体积密度最小,空隙率、矿料间隙率和粗集料间隙率最大;SMA 中级配的各项体积指标居中。但集料颗粒形状不同,体积指标的变化幅度也不同。

(5)相同级配不同颗粒形状的混合料,棱角状碎石的空隙率、矿料间隙率和粗集料间隙率最大;圆角状颗粒随着级配的不同,球体和椭球体体积指标的相对大小在变化。

(6)通过对 SGC 压实特性的分析,得知棱角状碎石颗粒比圆角状卵石颗粒的抗变形能力要大,棱角状碎石组成的混合料具有较好的稳定性,随着集料颗粒形状的不同,粗型级配骨架结构沥青混合料

抗变形能力未必优于细型级配沥青混合料。

参考文献:

- [1] 沈金安. 改性沥青与 SMA 路面[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 张争奇,袁迎捷,王秉纲. 沥青混合料旋转压实密实曲线信息及其应用[J]. 中国公路学报,2005,18(3).
- [3] JTG E42—2005,公路工程集料试验规程[S].
- [4] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [5] 卢永贵,张登良. 粗集料间隙率试验研究[J]. 西安公路交通大学学报,2001,22(1).
- [6] 卢永贵,赵可,张登良. SMA 骨架标准研究[J]. 长安大学学报(自然科学版),2002,20(1).
- [7] 林绣贤,柔性路面设计[M]. 北京:人民交通出版社,1988.
- [8] 侯化国. 正交试验法[M]. 长春:吉林人民出版社,1985.
- [9] JTJ 052—2000,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [10] 陆阳,周永江,张蓉. SMA 粗集料结构的数值模拟[J]. 中国公路学报. 2006,19(1).
- [11] Mallick R B. Use of superpave gyratory compactor to characterize hot-mix asphalt [J]. Transportation Research Record. 1999,1681.
- [12] Vavrik W R, Ping, W J, Carpenter S H. Aggregate blending for asphalt mix design Bailey method[J]. Transportation Research Record,2001,1789.

Research on Influence of Particle Shape of Coarse Aggregate on Volume Index of Skeleton Structure and SGC Compacting Characteristics

HE Chang-xuan, LU Yang, HUANG Wan-qing

(School of Civil Engineering, South West of Jiao Tong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Angularity-shaped crushed stone and well-rounded cobble are used for coarse aggregate, the cobble can be described by sphere-shaped and ellipsoid-shaped. The influence of particle shape on VCA_{DRC} for skeleton structure is tested. Results confirm that VCA_{DRC} formed by crushed stone is obviously higher than VCA_{DRC} formed by cobble. Among cobble, VCA_{DRC} formed by ellipsoid is higher than VCA_{DRC} formed by sphere. On the basis of the results above, three typical proportioning mixtures of SMA-20 are chosen for Marshall and SGC forming. By determination and contrastive analysis in the volume index of asphalt mixture, it can be found that compared with mixture composed by well-rounded cobble, VV , VMA and VCA_{mix} of mixture formed by angularity-shaped crushed stone are greater. Further more, resistance to deformation and stability of angularity-shaped crushed stone are higher.

Key words: particle shape of aggregate; skeleton structure; volume index; SGC compacting characteristics