

## 集料针片状颗粒含量指标试验研究

刘良玉<sup>1</sup>, 周涛<sup>1</sup>, 宁范波<sup>2</sup>

(1.长沙市城投基础设施建设项目管理有限公司, 湖南 长沙 410000;

2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为探讨集料的针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响,设计由不同岩性、不同针片状颗粒含量集料组成的 AC-13 和 SMA-13 沥青混合料,采用旋转压实法(SGC)制作试件进行体积指标、高温稳定性、水稳定性、抗疲劳性能试验。结果表明,AC-13 沥青混合料矿料中 3:1 型针片状颗粒含量 $\leq 30\%$ 、SMA-13 沥青混合料矿料中 3:1 型针片状颗粒含量 $\leq 20\%$ 时,对沥青混合料体积指标、高温稳定性、水稳定性及抗疲劳性能的影响不显著,建议对集料针片状颗粒含量提出 AC 类混合料 $\leq 30\%$ 、SMA 类混合料 $\leq 20\%$ 的控制要求。

**关键词:**公路;沥青混合料;针片状颗粒含量;体积指标;高温稳定性;水稳定性;抗疲劳性能

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2019)06-0058-05

集料针片状颗粒是指用游标卡尺测量的粗集料颗粒最大长度方向(或宽度)与最小厚度方向(或直径)尺寸比大于 3:1 的颗粒,它在施工和使用过程中容易破碎,一直以来被认为是不良材料。NCAT 和 FHWA 的 SMA 设计规范要求 3:1 型和 5:1 型针片状颗粒含量分别小于 20%和 5%;JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》要求高速公路及一级公路表面层 3:1 型针片状颗粒含量不大于 15%、其他层次不大于 18%,其他等级公路 3:1 型针片状颗粒含量不大于 20%;SHC F40-01-2002《公路沥青玛蹄脂碎石路面技术指南》中规定 3:1 型针片状颗粒含量不大于 15%。肖赵谦认为针片状颗粒含量超过 18%会显著影响混合料的体积指标,毕林昌、谢兆星、余志凯等认为针片状颗粒含量超 14%对沥青混合料高温稳定性的影响较大。但国外有研究表明超过 40%的针片状颗粒含量能被接受。鉴于性能好的集料不断减少,同时为解决控制针片状颗粒含量带来的成本增加问题,有必要探讨超过中国规范要求的针片状颗粒含量集料对沥青混合料路用性能的影响。而国内对这方面的研究较少,且国内关于针片状颗粒对沥青混合料性能影响的研究均采用人为地将针片状颗粒从各档集料中挑出再按一定比例回配得到试验所需针片状颗粒含量的矿料的方法进行,在一定程度上改变了集料的原样性,对矿料级配也有影响。矿料作为沥青混合料中的重要组成部分,其各方面性质相互影响。为排除人为因素的影响,尽可能地保证矿料的原样性,该

文采用自然状态下不同针片状颗粒含量的各档集料配制的混合料进行试验研究,评价针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响。

## 1 原材料的选用及混合料级配设计

通过圆锥破碎机整形后获得的集料中针片状含量少,颗粒形状较好。为保证集料的原样性,采用圆锥破碎机在不同转速(0、50、65 m/s)下破碎整形所得不同针片状颗粒含量的石灰岩、花岗岩各档粗集料配制 AC-13,所得粗集料的针片状颗粒含量见表 1,矿料级配见表 2,按矿料级配混合所得混合料的针片状颗粒含量见表 3。

采用 A、B、C、D、E 5 个不同料场生产的不同针片状颗粒含量的 SMA 集料和非标 SMA 集料(针片状颗粒含量符合中国规范要求的为 SMA 集料,否

**表 1 石灰岩、花岗岩各档粗集料的针片状颗粒含量**

集料种类	下列筛孔(mm)的通过率/%		
	13.2	9.5	4.75
普通石灰岩	25.6	27.7	30.7
石灰岩 1	25.6	17.7	22.7
石灰岩 2	17.6	15.8	16.7
普通花岗岩	16.0	43.2	67.2
花岗岩 1	16.0	12.4	14.8
花岗岩 2	16.0	0.7	0.6

注:普通石灰岩、石灰岩 1、石灰岩 2 分别表示圆锥破碎机转速为 0、50、65 m/s 所产生出来的集料;普通花岗岩、花岗岩 1、花岗岩 2 分别表示圆锥破碎机转速为 0、50、65 m/s 所生产出来的集料。下同。

表 2 AC-13 矿质混合料的级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16.00	100	1.180	21
13.20	95	0.600	15
9.50	83	0.300	11
4.75	47	0.150	8
2.36	32	0.075	5

表 3 AC-13 混合料的针片状颗粒含量

集料种类	针片状颗粒 含量/%	集料种类	针片状颗粒 含量/%
普通石灰岩	29.5	普通花岗岩	57.0
石灰岩 1	21.8	花岗岩 1	14.5
石灰岩 2	16.2	花岗岩 2	2.0

则为非标 SMA 集料)分别配制 SMA-13,其中 A、B、C 3 个料场既有满足规范要求的 SMA 粗集料,也有不满足规范要求的非标 SMA 粗集料,D、E 2 个料

场粗集料针片状含量均大于规范要求(中国规范要求 SMA 用粗集料针片状颗粒含量不大于 15%),即 D、E 2 个料场粗集料均为非标 SMA 粗集料。5 个料场各档集料的针片状颗粒含量见表 4,SMA 和 非标 SMA 的矿料级配见表 5,按矿料级配混合所得混合料的针片状颗粒含量见表 6。

表 4 5 个料场各档粗集料的针片状颗粒含量

料场编号	集料种类	下列筛孔(mm)的通过率/%		
		13.2	9.5	4.75
A	SMA 集料	8.4	13.1	12.5
	非标 SMA 集料	17.3	16.2	12.5
B	SMA 集料	6.8	7.0	10.7
	非标 SMA 集料	16.5	17.2	10.7
C	SMA 集料	9.1	13.7	14.3
	非标 SMA 集料	15.7	17.8	14.3
D	非标 SMA 集料	26.5	20.9	17.4
E	非标 SMA 集料	31.5	16.8	16.5

表 5 SMA-13 矿质混合料的级配

料场 编号	混合料 类型	下列筛孔(mm)的通过率/%									
		16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
A	SMA	100	98	57	25	21	18	17	15	13	10.1
	非标 SMA	100	94	54	25	20	17	16	15	13	10.2
B	SMA	100	87	54	24	18	16	14	13	12	10.1
	非标 SMA	100	91	61	25	19	16	15	14	12	10.6
C	SMA	100	96	66	23	16	14	13	12	11	9.5
	非标 SMA	100	97	70	23	16	14	13	12	11	9.5
D	非标 SMA	100	95	64	28	20	16	14	13	12	10.8
E	非标 SMA	100	96	69	24	16	14	13	12	11	8.4

注:非标 SMA 指混合料中针片状颗粒含量超过 15%的 SMA-13 混合料。下同。

表 6 SMA-13 混合料的针片状颗粒含量

料场编号	混合料类型	针片状颗粒含量/%
A	SMA	14.6
	非标 SMA	20.0
B	SMA	13.9
	非标 SMA	15.9
C	SMA	14.2
	非标 SMA	19.5
D	非标 SMA	28.2
E	非标 SMA	36.0

AC-13、SMA-13 粘结剂分别为 70# A 级沥青和 SBS 改性沥青,采用矿物纤维作为 SMA 的纤维稳定剂,细集料均采用机制砂,矿粉均为石灰岩矿

粉。采用 superpave 设计方法、旋转压实法(SGC)成型试件,对比不同集料针片状颗粒含量下 AC-13、SMA-13 的体积指标、高温稳定性、水稳定性、抗疲劳性能和集料破碎率,分析集料中针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响。

2 试验结果与分析

2.1 针片状颗粒含量对混合料体积指标的影响

采用 SGC 设计法得到采用不同针片状颗粒含量集料配制的 AC-13、SMA-13 混合料的体积指标(见表 7、表 8),设计空隙率均为 4%。

从表 7 可以看出:1)当石灰岩针片状颗粒含量为 16.2%~29.5%时,混合料的体积指标无明显差

表7 AC-13 混合料配合比设计结果

集料种类	油石比/%	矿料间隙率/%	饱和度/%	粉胶比	压实度/%
普通石灰岩	4.2	13.7	70.7	1.20	88.1
石灰岩 1	4.3	13.8	71.3	1.19	88.4
石灰岩 2	4.2	13.7	70.8	1.24	88.1
普通花岗岩	5.0	14.2	71.7	1.28	87.8
花岗岩 1	4.6	13.4	70.2	1.25	88.4
花岗岩 2	4.5	13.4	70.2	1.22	88.7

表8 SMA-13 混合料配合比设计结果

料场编号	集料种类	油石比/%	矿料间隙率/%	饱和度/%	粉胶比	压实度/%
A	SMA	6.4	18.4	78.1	1.66	85.3
	非标 SMA	6.2	18.1	77.8	1.75	84.7
B	SMA	6.5	18.4	78.1	1.64	85.1
	非标 SMA	6.2	18.1	77.7	1.86	84.2
C	SMA	6.6	18.7	78.6	1.55	85.9
	非标 SMA	6.6	18.6	78.4	1.53	86.2
D	非标 SMA	7.1	19.7	79.8	1.60	84.3
E	非标 SMA	8.3	22.7	82.5	1.05	85.6

异;针片状颗粒含量为 29.5% 时,矿料间隙率均大于 13%,饱和度为 65%~75%,粉胶比相差不大,指标能满足中国规范要求,同时相同压实次数下的压实度相差很小,说明针片状颗粒含量小于 30% 不会显著影响混合料的体积指标。这与文献[5]、[11]、[12]中结论不一致,这些文献指出针片状颗粒含量超过 15%、20% 时沥青混合料的空隙率明显增大。究其原因,文献[5]、[11]、[12]都采用先将针片状颗粒从粗集料中挑选出来再按一定比例回配的方法获得含不同百分数的针片状颗粒的粗集料,在一定程度上改变了粗集料的原样性,而该文直接采用从料场取回的不同针片状颗粒含量粗集料进行试验,更接近现场实际情况;文献[5]、[11]、[12]采用马歇尔试验法成型试件,而该文 AC-13 采用旋转压实法成型试件,更接近工程实际。2) 普通花岗岩混合料的油石比、矿料间隙率和饱和度比花岗岩 1 及花岗岩 2 混合料的大,花岗岩 1 及花岗岩 2 混合料的油石比、矿料间隙率和饱和度非常接近,满足中国规范要求。普通花岗岩矿料的针片状含量高达 57%,而花岗岩 1 及花岗岩 2 混合料的针片状含量相对较低,分别为 14.5% 和 2.0%,普通花岗岩混合料的最佳油石比最大,这是因为普通花岗岩混合料

中针片状颗粒含量高,比表面积大,需要的沥青用量更多,这也说明针片状含量高时沥青用量会增多。同时可推测出必有一个拐点值位于 14.5%~57% 之间导致普通花岗岩混合料的体积指标发生显著变化。由于花岗岩集料的韧性比石灰岩集料大,针片状颗粒的影响不会比石灰岩大,参考石灰岩针片状颗粒含量为 16.2%~29.5% 时混合料的体积指标并无明显差异的结果,将石灰岩、花岗岩集料针片状颗粒含量拐点值设为 30% 偏于安全。

由表 8 可知:用 A、B、C 料场矿料配制的 SMA-13 混合料及非标 SMA-13 混合料的体积指标无明显差异,均满足中国规范对 SMA 的技术要求。A、B、C 料场的标准 SMA 矿料和非标 SMA 矿料混合料的针片状含量为 13.9%~20%,符合 NCAT 和 FHWA 的 SMA 设计规范中 3:1 型针片状颗粒含量小于 20% 的要求,说明了在 SMA 中针片状颗粒含量小于 20% 对混合料体积指标的影响不大。而 D、E 料场非标 SMA 矿料混合料的针片状颗粒含量分别高达 28.2%、36%,所得沥青混合料试样的体积指标明显比 A、B、C 料场的非标 SMA 的体积指标大,同时随着针片状颗粒含量的增大,油石比、矿料间隙率、饱和度均增大,说明随着针片状颗粒含量的增大,油石比和体积指标增大。结合表 8 中数据及 NCAT 和 FHWA 的 SMA 设计规范,将导致 SMA 体积指标增大的针片状颗粒含量的拐点设为 20% 较合适。

## 2.2 针片状颗粒含量对混合料高温稳定性的影响

沥青路面分析仪 (APA) 是美国评定沥青混合料高温稳定性的设备,具有精确的加载、温度控制和数据采集系统,其通过压在试件顶的充气硬橡胶管施加垂直荷载,能更好地模拟路面的实际受力状况,且与国标车辙仪测试结果有很好的相关性。因此,采用 APA 评价混合料的高温稳定性,试验轮载为 445 N,橡胶管气压为 700 kPa,试验温度为 60 ℃,经 8 000 次循环后测量车辙深度。采用由旋转压实法制作的直径为 150 mm、高为 75 mm 的圆柱形试件,空隙率为 4%。每种混合料制作 6 个试样,2 个为一组进行平行试验,取 3 个车辙深度的平均值作为试验结果(见表 9、表 10)。

表9 AC-13 混合料 APA 车辙试验结果

集料种类	车辙深度/mm	集料种类	车辙深度/mm
普通石灰岩	5.900	普通花岗岩	9.169
石灰岩 1	6.638	花岗岩 1	6.248
石灰岩 2	6.197	花岗岩 2	6.058

表 10 SMA-13 及非标 SMA-13 混合料车辙试验结果

料场编号	混合料类型	车辙深度/mm
A	SMA	2.032
	非标 SMA	2.595
B	SMA	2.120
	非标 SMA	2.320
C	SMA	2.100
	非标 SMA	2.390
D	非标 SMA	3.020
E	非标 SMA	3.290

由表 9 可知:1) 普通石灰岩混合料、石灰岩 1 混合料及石灰岩 2 混合料经 8 000 次循环后车辙深度相差不大,针片状颗粒含量增加对混合料抗车辙性能的影响不大,其原因是试验所用石灰岩集料的针片状颗粒含量范围较窄(16.2%~29.5%),在该针片状颗粒含量下粗骨料之间还能形成较好的石-石嵌挤结构,抗车辙性能较好,说明针片状颗粒含量达 30%时 AC-13 石灰岩混合料仍具有较好的抗车辙性能。2) 花岗岩 1 及花岗岩 2 混合料经 8 000 次循环后车辙深度相差也不大,均具有较好的抗车辙性能,但普通花岗岩混合料车辙深度比花岗岩 1 及花岗岩 2 混合料大很多,这是因为普通花岗岩针片状含量高达 57%,粗骨料之间不能有效形成石-石嵌挤结构,且在荷载作用下针片状颗粒容易断裂,因而抗车辙性能差。这与上述体积参数分析中针片状颗粒含量不超过 30%的要求一致,超过 30%会导致混合料抗车辙性能降低。

由表 10 可知:经 8 000 次循环后 A、B、C 料场中非标 SMA 混合料的车辙深度比 SMA 稍大,这是因为集料加工方式不同导致非标 SMA 集料的针片状颗粒含量比 SMA 集料稍大,非标 SMA 的抗车辙性能没有 SMA 的好;D、E 料场非标 SMA 集料的针片状含量分别高达 28.2%、36%,但车辙深度最大仅为 3.290 mm,满足工程技术人员认可的 5 mm 内的要求。针片状颗粒含量对抗车辙性能有一定影响,随着针片状颗粒含量的增加,SMA-13 抗车辙性能减弱。尽管 SMA 体积指标确定的针片状含量应不超过 20%,但试验结果表明针片状颗粒含量小于 36%时,SMA-13 混合料的抗车辙性能仍然能满足要求。

2.3 针片状颗粒含量对混合料抗疲劳性能的影响

根据 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,采用四点弯曲疲劳试验测试各种矿

料配制的 AC-13、SMA-13 混合料的抗疲劳性能,试验温度为 15℃±0.5℃,采用恒应变控制的连续偏正弦加载模式,加载频率为 10 Hz±0.1 Hz。测试中梁试件先加载 50 个循环并记录试件初始弯曲劲度模量,之后继续进行测试,直到试件弯曲劲度模量降低到初始弯曲劲度模量的 50%,此时的加载循环次数即为破坏循环次数。随着破坏循环次数的增加,混合料的疲劳寿命增加。每种 AC-13、SMA-13 混合料分别制作 3 个长 380 mm±5 mm、高 50 mm±6 mm、宽度 63 mm±6 mm 的试样进行平行试验,取平均值作为试验结果。AC-13、SMA-13 混合料疲劳寿命与针片状颗粒含量的关系分别见图 1、图 2。

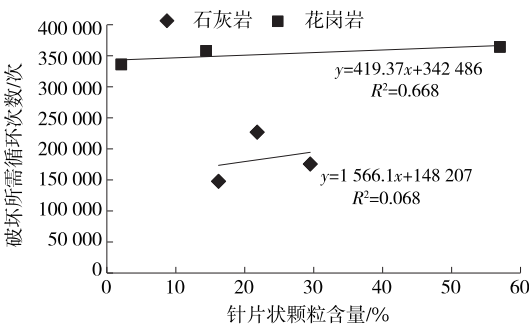


图 1 针片状颗粒含量与 AC-13 混合料破坏循环次数的关系

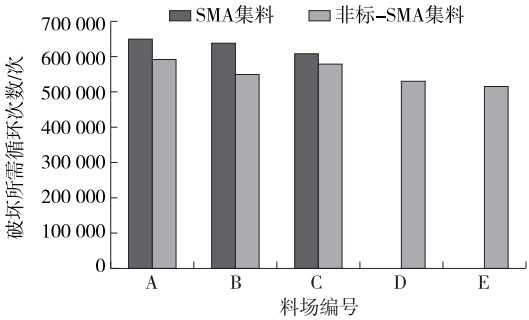


图 2 各料场集料与 SMA-13 混合料破坏循环次数的关系

由图 1 可知:花岗岩混合料的抗疲劳性能比石灰岩混合料强,花岗岩混合料的破坏循环次数约为 35 000 次,石灰岩混合料的破坏循环次数最大为 22 000 次、最小为 15 000 次;除岩性不同外,花岗岩混合料的最佳沥青用量比石灰岩混合料大,其有效沥青含量比石灰岩混合料大,因而其抗疲劳性能更好。从针片状颗粒含量与破坏循环次数的相关系数来看,花岗岩混合料( $R^2=0.668$ )和石灰岩混合料( $R^2=0.068$ )的抗疲劳性能与针片状颗粒含量关系

不大。

由图2可知:A、B、C料场矿料配制的SMA-13的破坏循环次数比非标SMA-13的稍大,最大差值为4.8%,5个料场配制的非标SMA-13混合料的抗疲劳性能均在50 000次以上。沥青混合料抗疲劳性能的主要影响因素是结合料的种类,由于SMA-13及非标SMA-13采用的结合料均为SBS改性沥青,5个料场矿料配制的SMA均表现出较好的抗疲劳性能,针片状颗粒含量在试验集料范围内对混合料抗疲劳性能的影响不显著。根据SMA-13混合料破坏循环次数与针片状颗粒含量的关系,针片状颗粒含量 $\leq 36\%$ 对抗疲劳性能的影响不大。

## 2.4 针片状颗粒含量对混合料水稳定性的影响

根据JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,以冻融劈裂试验分析针片状颗粒含量对AC-13、SMA-13沥青混合料水稳定性的影响,试验结果见表11、表12。

表11 AC-13混合料冻融劈裂试验结果

集料种类	经冻融循环后强度/MPa	未经冻融循环的强度/MPa	冻融劈裂残留强度比 TSR/%
普通石灰岩	0.635	0.714	88.9
石灰岩1	0.657	0.701	87.8
石灰岩2	0.625	0.709	88.1
普通花岗岩	0.360	0.517	69.6
花岗岩1	0.650	0.725	89.6
花岗岩2	0.625	0.718	87.1

表12 SMA-13混合料冻融劈裂试验结果

料场编号	混合料类型	经冻融循环后强度/MPa	未经冻融循环的强度/MPa	冻融劈裂残留强度比 TSR/%
A	SMA	0.609	0.704	86.5
	非标 SMA	0.620	0.723	85.8
B	SMA	0.540	0.500	108.0
	非标 SMA	0.638	0.646	98.8
C	SMA	0.587	0.543	108.0
	非标 SMA	0.584	0.535	109.1
D	非标-SMA	0.527	0.587	89.6
E	非标 SMA	0.532	0.596	89.3

根据JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》,TSR不小于80%。由表11可知:石灰岩混合料的TSR $>80\%$ ,且不同针片状颗粒含量的石灰岩混合料的TSR相差不大,这是由于石灰岩混合

料的针片状颗粒含量范围较窄,不足以影响混合料的水稳定性,针片状颗粒含量高达30%时石灰岩混合料仍具有较好的水稳定性。普通花岗岩的TSR为69.6%,小于规范规定的80%;花岗岩1及花岗岩2的TSR $>80\%$ ,与高温稳定性表现出一致的趋势。说明针片状颗粒含量在14.5%~57%之间存在一个值使TSR急剧下降,AC类混合料的针片状颗粒含量控制在30%以内偏于安全。

由表12可知:各料场中SMA矿料和非标SMA矿料配制的SMA-13混合料的TSR $>80\%$ ,满足中国规范的要求,且各料场的SMA与非标SMA混合料的TSR相差不大,配制的SMA混合料具有较好的水稳定性。SMA中针片状颗粒含量高达36%仍具有较好的水稳定性,说明根据体积参数和油石比确定的SMA类混合料针片状颗粒含量控制在20%偏于安全。

## 3 结论

(1) 由体积参数和油石比确定的石灰岩、花岗岩矿料的针片状颗粒含量 $\leq 30\%$ 的要求,能控制AC-13混合料的体积指标、高温稳定性、水稳定性、抗疲劳性能满足规范要求;由体积参数和油石比确定的矿料针片状颗粒含量 $\leq 20\%$ 的要求,能控制SMA-13沥青混合料的体积指标、高温稳定性、水稳定性、抗疲劳性能满足规范要求。

(2) 综合室内集料针片状颗粒含量对沥青混合料体积指标、高温稳定性、水稳定性、抗疲劳性能的影响程度,建议室内试验中对集料针片状颗粒含量提出以下控制要求:AC类混合料 $\leq 30\%$ ,SMA类混合料 $\leq 20\%$ 。

## 参考文献:

- [1] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [2] SHC F40-01-2002,公路沥青玛蹄脂碎石路面技术指南[S].
- [3] 肖赵谦.集料针片状含量对沥青混合料性能影响研究[J].北方交通,2014(增刊).
- [4] 毕林昌,申爱琴,郭寅川.针片状颗粒含量对沥青混合料高温稳定性的影响[J].公路,2011(7).
- [5] 谢兆星,李鼎乐,韩森,等.针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响[J].建筑材料学报,2007,10(6).
- [6] 余志凯,黄刚,胥吉.针片状颗粒含量对沥青混合料路用性能的影响[J].北方交通,2010(6).

(下转第122页)

### 3 结语

跨孔透射与平斜测综合方法采用的声测管的电缆上有2个声波换能器,其具有发射和接收双重作用;每个深度位置的射线路径有4条,既有平行射线又有倾斜射线,可实现基桩缺陷体在深度和水平方向的准确定位。采用超声波检测基桩完整性三维成像技术,基于双声波换能器自发自收功能对基桩实行跨孔透射与平斜测综合测试,可对基桩声波速度和低速缺陷体进行三维立体成像,实现基桩缺陷体在深度和水平方向的准确定位,客观判定基桩的完整性。

### 参考文献:

- [1] JTG/T F81-01-2004,公路工程基桩动测技术规程[S].
- [2] JGJ 106-2014,建筑基桩检测技术规范[S].

- [3] 吴桂林,刘宗明,赵宾.公路工程基桩的声波透射检测应用研究[J].公路,2014(6).
- [4] 邓国文,王齐仁,化得钧,等.声波透射法在基桩检测中的应用[J].工程勘察,2013(6).
- [5] 李廷,徐振华,罗俊.基桩声波透射法检测数据评判体系研究[J].岩土力学,2010,31(10).
- [6] 马深.超声波透射法在桥梁桩基完整性检测中的应用[J].公路与汽运,2014(6).
- [7] 彭汉杰.灰色聚类在基桩超声波检测中的评估研究[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(10).
- [8] 陈向阳,王志鑫.模糊数学在超声波检测桩基完整性中的应用[J].公路与汽运,2016(2).
- [9] 苗熹,惠冰,彭汉杰.超声波透射法测桩异常结果的研判[J].山东交通科技,2017(4).
- [10] 惠冰,张立,苗熹.声波透射法检测桩身完整性非缺陷因素的敏感性分析[J].公路,2017(9).

收稿日期:2019-02-17

\*\*\*\*\*

(上接第62页)

- [7] Prowell B D, Zhang J, Brown E R. Aggregate properties and the performance of superpave-designed hot mix asphalt[R]. NCHRP Report, 2005.
- [8] P K Oduroh, K C Mahboub, R M Anderson. Flat and elongated aggregates in superpave regime[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2).
- [9] 沈小俊,石飞,李铁军,等.沥青路面集料标准化加工技术和工艺探讨[J].公路与汽运,2014(2).
- [10] 卢亮,王端宜,詹小丽.针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响及其降低途径[J].公路,2007(5).
- [11] 何静,宋涛,黄维蓉,等.针片状含量与沥青混合料性能的关系分析[J].公路与汽运,2014(2).
- [12] 程平均,朱建秋.针片状颗粒含量对路面沥青混合料的性能影响研究[J].广东科技,2014(24).
- [13] 贾娟,张肖宁.沥青混合料车辙试验方法的比较分析[J].公路,2004(11).

- [14] 沈佳,王慧.APA车辙试验方法的研究进展[J].中外公路,2016,36(2).
- [15] 李卫勇,张雷,杨建华,等.圆柱形试件用于国标车辙动稳定度试验的可行性分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2017,36(12).
- [16] 王慧.使用APA评价场道沥青混合料抗车辙性能[J].中外公路,2013,33(5).
- [17] 陈祥义,吴剑.国外沥青混合料抗车辙性能试验方法评价[J].中外公路,2007,27(1).
- [18] JTG E20-2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [19] 刘占良,郝景贤.粗集料性能对沥青混合料性能的影响[J].公路,2015(7).
- [20] 马士宾,袁文瑞,王清洲,等.集料棱角对沥青混合料性能影响研究[J].中外公路,2015,35(2).

收稿日期:2019-03-11

\*\*\*\*\*

(上接第118页)

- 阶段初拉索力[J].公路与汽运,2017(6).
- [4] 邵旭东.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [5] 徐达,王定文,王华,等.MIDAS/Civil桥梁结构分析技巧与实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [6] 周水兴,王小松,田维锋.桥梁结构电算—有限元分析方法及其在MIDAS/Civil中的应用[M].北京:人民交通出版社,2013.

- [7] 周国玲,丁少凌,顾双春.无应力索长控制法在斜拉桥调索中的应用[J].公路与汽运,2012(4).
- [8] 陈俊城.悬臂现浇拱桥施工索力优化研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [9] 蒋陈陈.无背索斜拉桥成桥索力优化研究[D].西安:长安大学,2012.

收稿日期:2019-02-21