

基于加速加载试验的沥青混合料抗滑特性研究

魏彩旺, 苏毅, 孙熔正, 王兆民, 谢道隆

(云南省曲靖市交通建设投资集团有限公司, 云南 曲靖 655000)

摘要: 为了研究级配类型、油石比与荷载大小对沥青混合料的抗滑性能影响及其衰变规律, 基于室内试验制备了 AC-13C 沥青混合料车辙板试件, 采用小型加速加载设备对其进行加速磨光, 然后利用铺砂法和摆式摩擦系数测试仪分析其构造深度和摆值, 最后基于灰关联法分析了 3 种不同因素对沥青混合料抗滑性能的影响程度。结果表明: 沥青混合料的摆值与构造深度均随着加速加载次数的增加呈现出先急剧下降, 后缓慢下降, 最终趋于稳定。油石比与荷载值越大, 对抗滑性能越不利。基于灰关联分析结果, 级配类型对沥青混合料的抗滑性能影响程度最为显著。

关键词: 沥青混合料; 抗滑性能; 加速加载; 灰关联分析; 影响程度

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)03-0204-05

0 引言

随着“交通强国”战略的实施, 我国高速公路沥青路面的通车里程已居世界第一, 至 2021 年底已经达到 16.91 万 km^[1]。高速公路的快速发展对于沥青路面表面功能层的要求日益严苛, 功能层的表面磨耗及抗滑性能严重影响驾驶人员的行车安全及舒适性^[2-4]。因此, 研究沥青路面表面磨耗层的抗滑性能及其衰变特性具有重要意义。

近年来, 高速公路超薄沥青磨耗层的应用逐步频繁, 对磨耗层抗滑性不断提出更高的目标和期望, 越来越多的道路工作者致力于沥青路面表面层的抗滑性能研究。马健萍^[5]等人研究了生产工艺对 SMA-13 沥青混合料抗滑性能的影响, 他们发现采用半整形工艺能够显著提高沥青混合料的摆值。覃金寿^[6]基于不同级配的细集料颗粒制备了 GAC-13 抗滑表层沥青混合料, 并对其进行了抗滑性能试验。研究发现, 采用精品机制砂细集料颗粒可以明显提升 GAC-13 沥青混合料的抗滑能力。宗有杰等^[7]将高抗滑集料煅烧铝矾土加入到沥青混合料当中, 研究其在不同磨光次数下的摩擦系数变化。结果表明, 煅烧铝矾土可以很好地提升沥青混合料抗滑性能, 最佳掺量为 25%~50%。刘连国^[8]研究了集料特性对 SMA-13 及

AC-13 两种沥青混合料的抗滑能力, 发现当集料颗粒中的针片状含量越高时, 混合料抗滑性能越差。周兴林等^[9]对比研究了四种沥青混合料体积指标对路面抗滑能力的影响, 他们认为, 在实际沥青混凝土路面铺筑时, 可以通过适当提高混合料的密实状态来提高沥青路面抗滑性能。王元元等^[10]将石灰岩与玄武岩这两种不同集料进行分异处理, 研究不同分异对比对沥青混合料抗滑能力的影响。结果表明, 将集料进行分异处理成不同配比可以显著降低沥青混合料的抗滑衰减速率。

综上所述, 目前对于沥青混合料抗滑特性研究的相关成果偏于定性评估, 级配、荷载及油石比对沥青混合料的抗滑性能衰变规律有待系统研究, 且不同因素对抗滑性能影响程度如何亦有待探讨。此外, 对沥青路面磨耗层抗滑性的评价研究大多局限于初期通车阶段, 缺乏对整个服役周期的抗滑性能评估。而加速加载试验可以通过轮载的连续重复作用模拟路面在设计使用期内受到实际交通荷载作用的状态。

基于以上原因, 现采用小型加速加载设备对 AC-13C 沥青混合料进行加速磨光, 考虑混合料油石比、荷载大小及关键筛孔通过率三个不同因素, 利用铺砂法和摆式摩擦系数测试仪分析加速加载后的沥青混合料构造深度和摆值, 以期研究 AC-13C 沥青混合料的抗滑性能及其衰变特性, 并建立不同因素与抗滑性能之间的相关关系, 采用灰关联理论分析不同因素对抗滑性能的影响程度。本文研究的成果为深入研

收稿日期: 2023-04-06

基金项目: 湖南省交通运输厅科技项目(201904)

作者简介: 魏彩旺(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 从事公路桥梁施工与养护工作。

究超薄沥青混合料磨耗层沥青路面的抗滑性提供了借鉴价值。

1 原材料及试验方案

1.1 沥青

沥青选用广东省东莞市生产的 SBS(I-D)改性沥青,基本技术指标见表 1。

表 1 SBS(I-D)改性沥青基本技术指标一览表

试验项目	试验结果	技术要求
针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm	55	40~60
软化点(环球法)/℃	81.0	≥60
延度(5℃,5 cm/min)/cm	27	≥20
相对密度(25℃)	1.036	实测记录
沥青与粗集料黏附性	5	≥5
质量损失 /%	-0.054	≤±0.6
残留延度(5℃)/cm	17	≥15

1.2 集料

沥青试验所用的粗集料为曲靖市沾益区远鹏石料有限公司生产的石灰岩粗集料,细集料为罗平县阿岗镇吉利采石厂生产的石灰岩细集料,填料为石灰岩矿粉。该项试验的热料配比分别 1#(11~16)mm,2#(6~11)mm,3#(4~6)mm,4#(0~4)mm,热料吸水率及密度试验结果见表 2 所列。

表 2 热料吸水率及密度试验结果一览表

热矿料	吸水率	表观相对密度	毛体积相对密度
1# 粗集料(11~16)mm	0.88	2.978	2.902
2# 粗集料(6~11)mm	0.94	2.977	2.896
3# 粗集料(4~6)mm	0.99	2.962	2.878
4# 细集料(0~4)mm	0.90	2.721	2.656
矿粉	-	2.712	-

1.3 配合比

由于此次试验考虑关键筛孔通过率对沥青混合料抗滑性能的影响,因此,在设计沥青混合料配合比时,控制关键筛孔 9.5 mm 的通过率,成型了 3 种不同级配的 AC-13C 沥青混合料,如图 1 所示。

考虑到油石比的不同对抗滑性能的影响,按照沥青混合料级配 2 类型制备 3 种不同的油石比,分别为 4.6%、4.9%、5.2%,三种不同油石比的马歇尔击实试验结果见表 3 所列,经计算确定最佳油石比为 4.9%。

1.4 试验方案

按照上述原材料成型 3 种油石比、3 种级配的

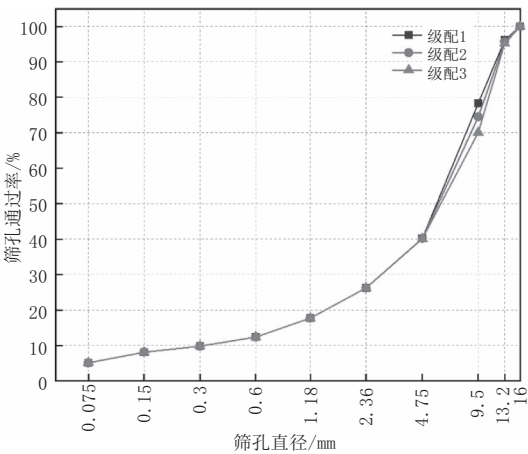


图 1 不同级配 AC-13C 沥青混合料的筛孔通过率曲线图

表 3 不同油石比下马歇尔击实试验结果一览表

油石比 /%	最大理论相对密度	毛体积相对密度	空隙率 VV/%	沥青饱和度 VFA/%	间隙率 VMA/%	稳定度 /kN	流值 /mm
4.6	2.664	2.534	4.8	65.7	14.2	11.95	3.0
4.9	2.652	2.543	4.1	70.9	14.1	13.25	3.2
5.2	2.641	2.538	3.9	73.1	14.5	11.54	3.6
技术要求	-	-	3~5	65~75	≥14.1	≥8	2~4

AC-13C 沥青混合料车辙板试件,每块试验的车辙板尺寸为 300 mm×150 mm×50 mm,采用 PAVEMSL11 小型加速加载设备对车辙板试件进行加速加载磨光试验,PAVEMSL11 设备见图 2 所示。



图 2 PAVEMSL11 设备之实景

考虑到荷载大小对抗滑性能的影响,加速加载橡胶轮胎的胎压取 3 种,分别为 0.7 MPa、0.725 MPa、0.75 MPa,加载速度设置为 7 200 次/h,温度选取为室温 20℃。当磨光试验次数达到 60 万次时,停止试验,然后用铺砂法和摆式摩擦系数测试仪对混合料进行构造深度以及摆值的测定。

2 试验结果与分析

2.1 级配类型对沥青混合料抗滑性能的影响

利用铺砂法和摆式摩擦系数测试仪对控制不同

9.5 mm 关键筛孔通过率的 3 种沥青混合料级配类型进行构造深度和摆值的测定,3 种级配的沥青混合料油石比均为最佳油石比 4.9%,磨光试验次数分别为 0 次、1 万次、2 万次、5 万次、10 万次、20 万次、30 万次、40 万次、50 万次、60 万次时的结果见图 3 所示。

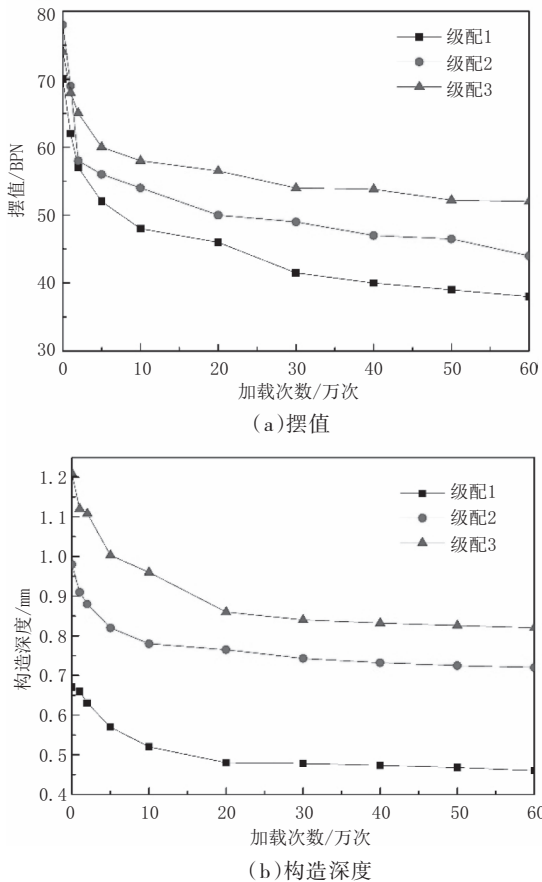


图 3 不同级配类型的 AC-13C 摆值与构造深度测试结果曲线图

从图 3 可以看出,3 种不同级配类型的 AC-13C 沥青混合料的摆值随着加载次数的逐渐增大,摆值逐渐下降。加载次数在 0 到 5 万次,摆值急剧下降;5 万次到 30 万次之间,摆值下降趋势变缓;在加载 30 万次之后,摆值变化逐渐趋于平稳。级配 1 类型的沥青混合料在加速加载 60 万次后的摆值下降最大,从 70BPN 下降到了 38BPN,这是由于级配 1 类型的 9.5 mm 关键筛孔通过率较大,级配较细。

沥青混合料构造深度随加载次数的变化趋势同摆值类似,均是呈现出先急剧下降,再缓慢下降,最后趋于稳定。可以看出级配 3 的构造深度值较大,级配 1 的构造深度值明显低于级配 3 类型。分析原因,级配 3 的 9.5 mm 关键筛孔通过率较小,级配更粗,粗级配承担混合料的骨架作用,在不断地加速磨光过程中,由于纹理构造更加明显,更能够作为沥青混合料抗滑的“主力”。

综合分析 3 种沥青混合料的摆值与构造深度变

化,可以看出,级配 3 类型即当 9.5 mm 筛孔通过率更小时,沥青混合料在加速磨光过程中的抗滑性能更好,级配 2 次之。9.5 mm 筛孔通过率更大,级配更偏细时,沥青混合料抗滑性能下降较为明显。

2.2 油石比对沥青混合料抗滑性能的影响

油石比对沥青混合料的性能变化具有明显影响。当油石比较大时,沥青路面泛油更加明显,此时的沥青混合料表面空隙严重堵塞;当油石比较小时,沥青路面由于用量较低,在车辆荷载以及大气雨水等环境的耦合作用下集料更容易产生剥落,加速沥青路面的破坏。采用级配 2 类型,成型 3 种不同油石比的沥青混合料(4.6%、4.9%、5.2%),分别对其进行 60 万次的加速加载磨光试验,摆值与构造深度随加载次数变化的试验结果如图 4 所示。

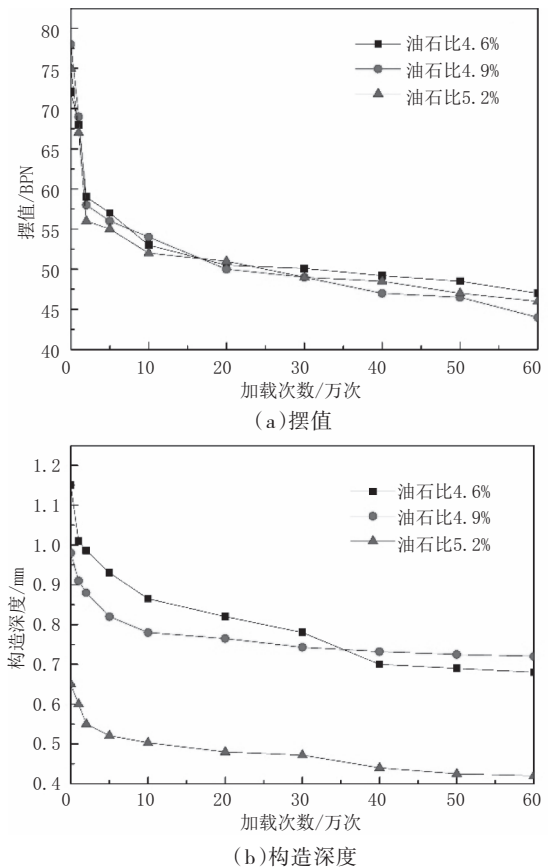


图 4 不同油石比的 AC-13C 摆值与构造深度测试结果曲线图

从图 4 可以看出,随着加载次数的增加,不同油石比的沥青混合料摆值逐渐降低。当油石比为最佳油石比 4.9%时,混合料的初始摆值最大。加载 60 万次后,4.6%油石比的沥青混合料摆值最大,可见油石比影响沥青混合料的摆值测定。

从构造深度结果发现,4.6%油石比的沥青混合料初始构造深度最大,为 1.15 mm;最佳油石比 4.9%的初始构造深度次之;而油石比为 5.2%时,初始油

石比最小,为 0.65 mm。随着加载次数的增加,构造深度呈现出先急剧下降,最后趋于平稳。当加载次数为 60 万次时,最佳油石比 4.9% 的沥青混合料构造深度最大,而较大油石比 5.2% 的混合料构造深度最小。分析原因,是由于,当油石比较大时,沥青混合料的油膜较厚,表面的纹理构造被油膜覆盖,因此对抗滑性能带来不利影响。

2.3 荷载对沥青混合料抗滑性能的影响

荷载的大小对沥青混合料的抗滑性能具有影响,图 5 为油石比采用最佳油石比 4.9%,级配 2 类型时的 3 种荷载作用下 AC-13C 沥青混合料的摆值与构造深度测试结果。其中,荷载 1、荷载 2、荷载 3 分别为 0.7 MPa、0.725 MPa、0.75 MPa。

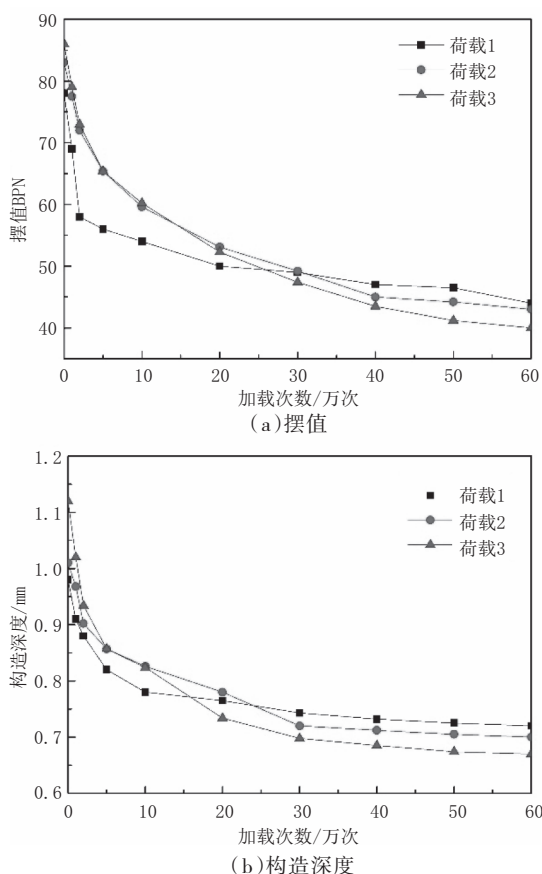


图 5 不同荷载大小的 AC-13C 摆值与构造深度测试结果曲线图

由图 5 发现,随着加速加载磨光次数的增加,3 种荷载下的沥青混合料摆值逐渐降低。在摆值初期,随着荷载大小的增加,沥青混合料的初始摆值逐渐增大,分别为 78BPN、83BPN、86BPN。当加速加载次数为 60 万次时,3 种荷载下的沥青混合料最终摆值差异较小,但从初始摆值与最终摆值的下降幅度来看,当荷载最大为 0.75 MPa 时,沥青混合料的摆值下降最大。可见,路面载重越大,对沥青路面的抗滑性能越不利。

从构造深度随加载次数变化趋势可以看出,随着荷载值的增大,沥青混合料的初始构造深度越大,荷载 2 与荷载 3 相较于荷载 1 (标准轴载 0.7 MPa) 的初始构造深度分别增加 0.03 mm、0.14 mm。随着加载次数的增加,AC-13C 沥青混合料的构造深度不断降低,在 0 到 5 万次,构造深度急剧下降;在 5 万次到 30 万次,下降趋于缓慢;加载 30 万次到 60 万次,逐渐趋于平稳。荷载 3 的最终构造深度最低,与初始构造深度相比下降了 0.45 mm,可见路面载重越大,对路面的抗滑性能越不利,在实际沥青路面运营中,应该限制车辆的超限超载,确保沥青路面的耐久性。

2.4 基于灰关联分析法的抗滑性能影响因素分析

根据以上分析,可以看出级配类型、油石比、荷载大小均会影响 AC-13C 沥青混合料的抗滑性能。为了更加直观地分析 3 种因素对沥青混合料抗滑性能的变化趋势,绘制摆值及构造深度初始值与加速加载 60 万次后最终值两者之间的差值,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,当沥青混合料级配类型不同时,级配 1 与级配 2 差值变化幅度不大,当选择级配 3 时,沥青混合料的构造深度变化降低幅值最大,摆值降低幅值最小。当级配类型相同,油石比选择不同时,油石比 1 的摆值与构造深度两者的降低幅度差值均较大。对于荷载大小的选择,荷载逐渐增大,沥青混合料的摆值与构造深度降低幅值均逐渐增大。

通过上述差值的分析,可见级配类型、油石比及荷载均对沥青混合料的抗滑性能具有影响,但影响程度的大小尚不清楚。灰关联分析方法能够通过通过对不同影响因素产生的结果进行量纲归一化处理,通过计算灰关联系数来求解灰关联度,从而更加直观地分析各因素影响程度。灰色关联度越大,影响程度越显著。本文采用灰关联分析法来评价 3 种因素对沥青混合料抗滑性能的影响程度,计算公式如下,灰色关联系数如表 4 所列,灰色关联度结果见图 7 所示。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i [\min_k (|M_{0k} - M_{ik}|)] + \alpha \max_i [\max_k (|M_{0k} - M_{ik}|)]}{|M_{0k} - M_{ik}| + \alpha \max_i [\max_k (|M_{0k} - M_{ik}|)]} \quad (1)$$

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (2)$$

式中: $\xi_i(k)$ 代表第 i 个因素在第 k 个点的比较数列 M_i 分量 M_{ik} 与结果数列 M_0 分量 M_{0k} 的相对差值; k 取 1, 2, $\dots$, m ; i 取 1, 2, $\dots$, n ; α 代表分辨系数,取值 0.5; r_i 代表第 i 个因素的 m 个灰关联系数的平均值。

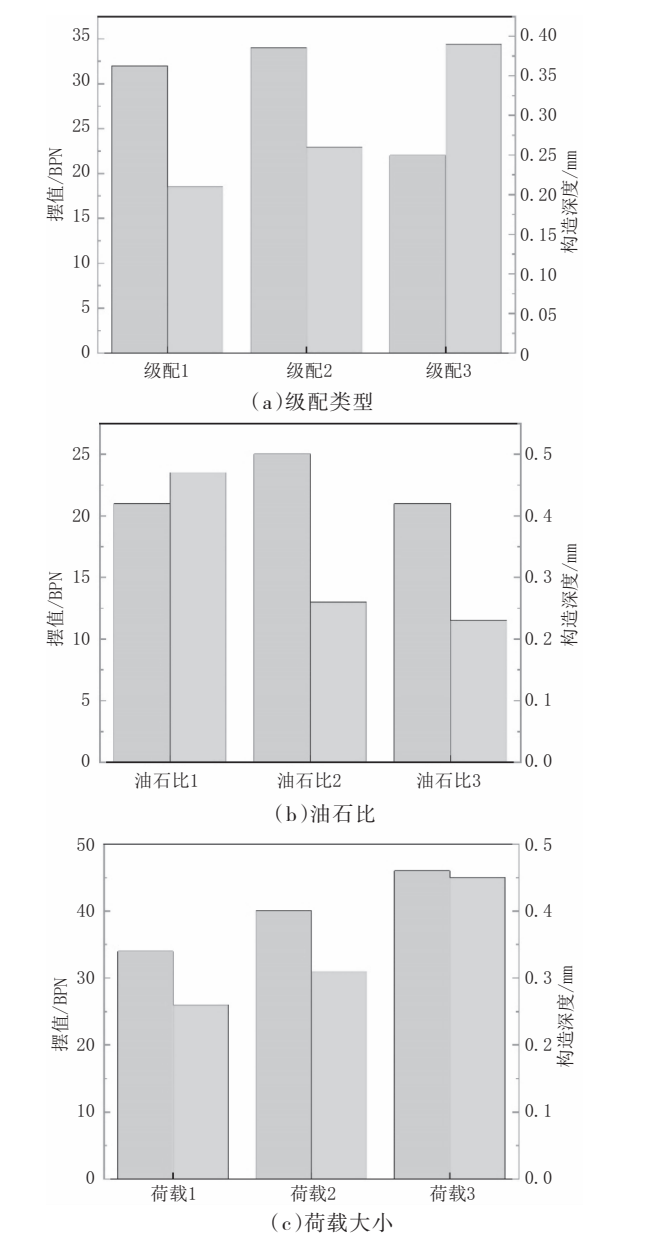


图6 不同影响因素的摆值及构造深度差值计算结果柱状图

表4 各影响因素的灰色关联系数

指标	摆值		构造深度	
	抗滑初值	抗滑减幅	抗滑初值	抗滑减幅
级配类型	0.61	0.67	0.59	0.53
油石比	0.60	0.63	0.36	0.50
荷载大小	0.58	0.53	0.47	0.48

从图7看出,级配类型、油石比、荷载大小对沥青混合料抗滑性能的影响程度不同。从摆值的灰关联结果看出,不论是抗滑初值还是抗滑衰减幅度,级配类型这一因素的灰色关联度最大,即级配类型对沥青混合料摆值影响程度最为显著。从构造深度灰关联结果来看,3种因素的抗滑初值灰关联度排序为:级配类型>荷载大小>油石比,抗滑衰减幅值灰

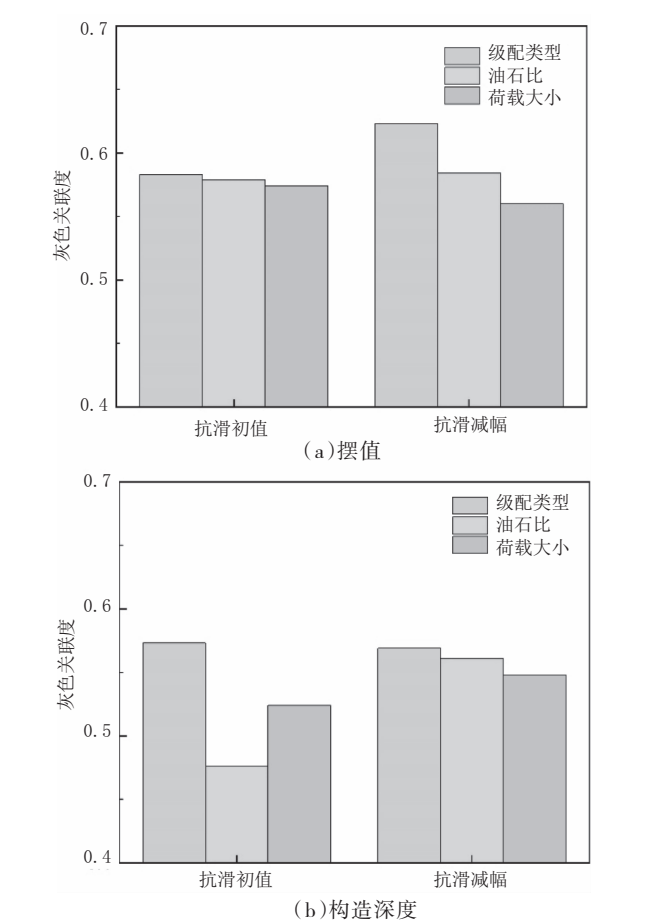


图7 不同因素与抗滑性能之间的灰色关联度结果柱状图
关联度排序为级配类型>油石比>荷载大小,级配类型对混合料构造深度影响程度最为显著。

3 结 语

- (1)沥青混合料的摆值与构造深度均随着加速加载磨光次数的增加呈现出先急剧下降,后缓慢下降,最终趋于稳定的变化趋势。
- (2)粗级配的沥青混合料类型对抗滑性能有利;油石比越大,荷载值越大,对沥青混合料抗滑性能越不利。
- (3)基于灰关联分析结果,级配类型、油石比、荷载大小对沥青混合料抗滑性能的影响程度均不同,其中级配类型影响程度最为显著。

参考文献:

[1] 交通运输部.2021年交通运输行业发展统计公报[N].中国交通报,2022(1):1-23.

[2] 吴建涛,马鑫源,曹云刚,等.湿度-尾气共同作用对沥青混合料抗滑性能的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(7):1017-1025.

[3] 吴颖峰,汪海年,屈鑫.基于分子动力学模拟的寒区新型耐久沥青混合料抗滑机理研究[J].化工新型材料,2022,50(4):235-240,246.

[4] 武建民,覃仲,徐长春,等.基于加速磨耗试验的钢渣-橡胶沥青混合料抗滑性能[J].科学技术与工程,2022,22(9):3735-3743.

(下转第219页)

位压力, kPa; 10 500 为贯入量 2.5 mm 时的标准压力, kPa。

轴向压力与贯入量之间关系见图 10, 8%CCA 复合固化剂固化土进行承载比试验。最大轴向压力达到 4 000 kPa, 通过 CBR 曲线图计算 CBR 值, $CBR_{2.5}$ 大于 $CBR_{5.0}$, 取 $CBR_{2.5}$ 的值 49.34 作为 8% 固化剂含量固化土 CBR 值。根据《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013) 规定, 城市主干路路基填料 CBR 值为 3~8, CCA 复合固化土的 CBR 值远远大于规范对路基填料的要求, 可以作为路基填料使用。

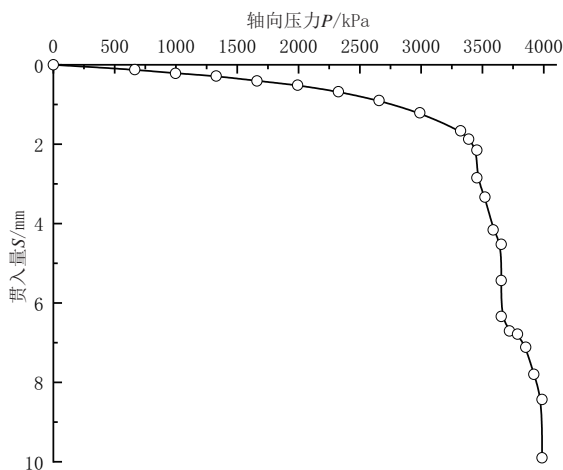


图 10 固化土 CBR 曲线

4 结 论

(1)CCA 复合固化剂相对水泥等传统固化剂而言, 快速降低了固化土的含水率, 增大固化土颗粒粒

径, 改善固化土的级配组成, 显著提高固化盾构渣土的抗压强度。

(2)CCA 复合固化剂固化土的抗压强度随固化剂掺量的增加而有所增加, 较相同剂量的水泥固化剂提高明显, 但随龄期的增长, 抗压强度增加幅度不理想。

(3)CCA 复合固化剂固化土的粘聚力和摩擦角都随固化剂掺量的增加而增加, 当掺入固化剂由 0 变为 4% 过程中摩擦角和粘聚力增长速率最快, 随着固化剂掺量的增加, 两者增长斜率逐渐变缓。

(4)试验表明, 经 CCA 复合固化剂改良后的盾构渣土, 具有较高的强度, 力学性能较好, CBR 值远大于规范要求值, 可以作为路基填料使用, 具有非常广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张华. 富水地层盾构渣土用作路基填料的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(1): 75-78, 128.
- [2] 张建勇. 聚丙烯纤维改性盾构渣土强度特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 400-409.
- [3] 李杰, 陈儀涛, 董毅萌, 等. 盾构渣土免烧陶粒的制备及其性能[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(3): 250-254.
- [4] 王树英, 占永杰, 杨秀竹, 等. 淤泥质粉质黏土地层盾构渣土免烧空心砖固化机理与质量评价[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(7): 710-718.
- [5] 习智琴, 李水生. 碱激发废渣固化原状盾构渣土力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S2): 611-618.

(上接第 208 页)

- [5] 马健萍, 许新权, 范倩, 等. 基于加速加载试验的 SMA-13 沥青混合料抗滑性能研究[J]. 公路, 2022, 67(7): 388-394.
- [6] 覃金寿. 抗滑表层沥青混合料 GAC-13 组成及性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- [7] 宗有杰, 熊锐, 吕红莉, 等. 基于煅烧铝矾土集料的沥青混合料抗滑性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 116-

123.

- [8] 刘连国. 沥青路面抗滑衰变特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [9] 周兴林, 刘万康, 肖旺新, 等. 沥青混合料体积指标对沥青路面抗滑性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 1-9.
- [10] 王元元, 何亮, 孙璐. 矿料分异处理对沥青混合料抗滑性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1216-1220.