

基于级配设计的沥青路面抗滑性能影响因素研究

植豪文

(佛山市公路桥梁工程监测站, 广东 佛山 528041)

摘要: 通过测定不同级配 AC-13C 型沥青混合料的横向力系数, 采用统计学分析法研究了不同粒径集料对沥青路面抗滑性能的综合影响; 采用“逐步法”的多元线性回归分析结果表明 13.2 mm 粒径集料对沥青路面抗滑性能的影响最大, 但由于不同集料之间具有一定的相关性, 多元线性回归无法准确判别其他粒径集料对沥青路面抗滑性能的影响; 采用主成分分析法对不同粒径集料提取主成分以消除各粒径集料间的线性相关性, 并以获取的主成分为自变量、横向力系数 SFC 为因变量进行一元线性回归分析, 结果表明提取的主成分与横向力系数具有优良的线性关系, 说明利用主成分分析法结合线性回归分析可探索不同粒径集料对沥青路面抗滑性能的综合影响。

关键词: 公路; 沥青路面; 级配设计; 抗滑性能; 横向力系数; 线性回归; 主成分分析

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)03-0073-03

大量调查结果表明大部分高等级公路所发生的交通事故与路面抗滑性能不足有关。沥青路面的抗滑性能主要受路面微观形貌的影响, 包括微观纹理与宏观纹理两部分。在车辆低速运行时, 路面的微观纹理对沥青路面抗滑性能起到主要作用, 在雨天或高速行驶过程中则是路面的宏观纹理对抗滑性能起到主要作用。考虑到佛山地区处于中国南方, 雨天较多, 同时试验路段设计为快车道, 该文针对 5 种不同级配 AC-13C 型沥青路面试验路段进行横向力系数检测, 研究不同沥青路面宏观纹理对其抗滑性能的影响, 为沥青混合料级配设计提供科学依据。

1 试验原材料与方法

1.1 原材料

考虑到该文主要研究不同级配沥青路面的宏观纹理对其抗滑性能的影响, 不同试验段均采用相同的沥青与集料。沥青采用佛山高富 SBS 改性沥青, 其基本技术指标见表 1。集料采用花岗岩。

1.2 试验方法

所有试验段沥青路面均采用 AC-13C 型沥青混合料, 2.36 mm 及以上粒径集料在混合料内起骨架作用, 2.36 mm 以下粒径集料主要起填充作用。

为保证 AC-13C 型沥青混合料具有良好的骨架, 2.36 mm 粒径集料通过率一般控制在 28%。有关试验结果表明 2.36 mm 颗粒集料对骨架变化具有较大影响, 同时大量 AC-13C 型沥青混合料级配表明 2.36 mm 粒径集料的通过率一般控制在 12%

表 1 佛山高富 SBS 改性沥青的检测结果

| 试验项目 | 技术要求 | 检测结果 |
|---------------------------------|------|-------|
| 针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm) | ≥50 | 75 |
| 延度(5 °C, 5 cm/min)/cm | ≥20 | >100 |
| 软化点(环与球法)/°C | ≥60 | 82 |
| 密度(15 °C)/(g·cm ⁻³) | 实测值 | 1.037 |
| 闪点(开口法)/°C | ≥230 | 297 |
| 48 h 离析/°C | ≤2.5 | 0.28 |
| 弹性恢复(25 °C)/% | ≥70 | 92.48 |
| 布氏粘度(135 °C)/(Pa·s) | ≤3 | 1.629 |
| 测力延度比(4 °C, 5 cm)/min | ≥0.3 | 0.674 |
| RTFOT 后 质量损失/% | ≤1.0 | 0.03 |
| 残留物 软化点/°C | — | 71.2 |
| (163 °C, 延度(5 °C, 5 cm/min)/cm | ≥15 | 31 |
| 85 min) 针入度比(25 °C)/% | ≥60 | 78.1 |

左右, 且 2.36 mm 粒径集料颗粒小, 对沥青抗滑性能的影响较弱, 这里主要通过分析不同 4.75 mm 及以上粒径集料通过率时沥青路面抗滑系数的变化研究不同宏观构造对路面抗滑性能的影响。为探究不同粒径集料通过率对抗滑性能的影响程度, 确保不同级配沥青路面抗滑性能不受空隙率等体积因素的影响, 控制所有级配的 4.75 mm 及以上粒径集料通过率为 60%, 其余粒径集料的通过率保持一致, 保证不同混合料内参与宏观纹理构造的集料含量相同, 同时兼顾离析及方便施工等。最终确定的不同试验段设计级配见表 2。

表2 不同试验段沥青混合料的级配

| 级配 编号 | 通过下列筛孔(mm)的百分率/% | | | | | | | | | |
|----------|------------------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-------|
| | 16 | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| A | 0 | 1.4 | 27.9 | 30.7 | 12.0 | 7.2 | 5.3 | 4.1 | 2.6 | 2.1 |
| B | 0 | 1.8 | 27.7 | 30.5 | 12.0 | 7.2 | 5.3 | 4.1 | 2.6 | 2.1 |
| C | 0 | 2.1 | 28.4 | 29.5 | 12.0 | 7.2 | 5.3 | 4.1 | 2.6 | 2.1 |
| D | 0 | 2.7 | 28.6 | 28.7 | 12.0 | 7.2 | 5.3 | 4.1 | 2.6 | 2.1 |
| E | 0 | 3.1 | 28.7 | 28.2 | 12.0 | 7.2 | 5.3 | 4.1 | 2.6 | 2.1 |

2 试验结果分析

2.1 最佳油石比的确定及验证

以估计沥青混合料的最佳油石比5.0%为中值,按0.5%间隔变化,取5个不同油石比,分别对5种不同配合比沥青混合料制作试件进行马歇尔试验,计算空隙率、饱和度、流值等指标。根据马歇尔试验结果,A、B、C、D、E 5种配合比沥青混合料的最佳油石比分别为5.0%、4.9%、5.0%、4.9%、4.9%。

根据最佳油石比制备试件检验配合比设计,结果见表3。检验结果表明5种配合比沥青混合料均可保证沥青路面结构的稳定性并满足规范所要求的路用性能,可应用于沥青路面试验段。

表3 沥青混合料配合比设计的检验结果

| 级配 编号 | 60℃动稳 | 冻融劈 | 级配 编号 | 60℃动稳 | 冻融劈 |
|----------|------------------------------|------------|----------|------------------------------|------------|
| | 定度/(次· mm ⁻¹) | 裂强度 比/% | | 定度/(次· mm ⁻¹) | 裂强度 比/% |
| A | >6 000 | 85.3 | D | >6 000 | 86.9 |
| B | >6 000 | 87.1 | E | >6 000 | 87.9 |
| C | >6 000 | 86.5 | | | |

2.2 横向力系数测定

对交工后的试验段进行横向力系数测定,每段检测100个点,横向力系数测试车速度为(50±5)km/h。各试验段横向力系数检测结果见表4。

表4 各设计级配沥青路面试验段的横向力系数

| 级配编号 | 横向力系数 | |
|------|-------|-----|
| | 平均值 | 标准差 |
| A | 58.4 | 2.7 |
| B | 59.8 | 2.9 |
| C | 63.5 | 3.4 |
| D | 66.7 | 3.1 |
| E | 72.3 | 3.3 |

2.3 统计分析

2.3.1 多元线性回归分析

以不同级配沥青路面的横向力系数为因变量、

不同粒径集料含量为自变量,采用“逐步法”进行多元线性拟合以保证影响最大的变量首先进入模型之中,然后重复该过程。如果新引入的变量会使先前变量丧失统计意义,则剔除。定义13.2、9.5及4.75mm粒径集料分别为 x 、 y 、 z 。多元线性分析结果见表5、表6。

表5 回归系数

| 模型 | 非标准化系数 | | 显著性水平 Sig |
|-----|--------|------|-------------|
| | B | 标准误差 | |
| 常量 | 46.29 | 2.09 | 0.01 |
| x | 8.04 | 0.91 | 0.03 |

表6 排除变量

| 变量 | 显著性 |
|-----|------|
| y | 0.64 |
| z | 0.64 |

多元线性分析结果表明13.2mm粒径集料对横向力系数的影响最大,9.5与4.75mm粒径集料对横向力系数的影响由于会造成先前变量失去统计意义而被排除,无法利用多元线性分析法进行判别。

2.3.2 主成分分析

沥青路面抗滑系数受多种粒径集料的共同影响,虽然多元线性分析结果表明13.2mm粒径集料对横向力系数的影响最大,但无法探究整体影响,同时不同粒径集料之间的相关性分析结果(见表7)表明集料之间具有明显的相关性。为此,采用主成分分析法以消除不同粒径集料之间的线性相关性并提取线性无关的主成分分析不同级配沥青路面的宏观纹理对其抗滑性能的影响。

表7 不同粒径集料之间的相关性分析

| 集料 | 相关性 | x | y | z |
|-----|-------|--------|--------|--------|
| x | 相关性系数 | 1.000 | 0.886 | -0.982 |
| | 显著性 | — | 0.045 | 0.003 |
| y | 相关性系数 | 0.886 | 1.000 | -0.957 |
| | 显著性 | 0.045 | — | 0.010 |
| z | 相关性系数 | -0.982 | -0.957 | 1.000 |
| | 显著性 | 0.003 | 0.010 | — |

采用SPSS统计分析软件对5种不同级配的3种粒径集料进行因子分析,获取特征值与方差贡献率(见表8),从而确定主成分数量。

表8 特征值与方差贡献率

| 成分 | 特征值 | 方差贡献率/% | 累计方差贡献率/% |
|----|-------------------------|------------------------|-----------|
| 1 | 2.88 | 96.14 | 96.14 |
| 2 | 0.12 | 3.86 | 100.00 |
| 3 | -1.34×10^{-16} | -4.4×10^{-15} | 100.00 |

表8表明只有一个成分的特征值大于1,且其已解释了总方差的96.14%。以特征值是否大于1作为确定主成分数量的标准,选取第一个成分作为主成分进行分析,定义为主成分 n ,其未旋转的因子荷载见表9。

表9 未旋转的因子荷载和标准化正交特征向量

| 集料 | 未旋转的因子荷载 | 特征向量 |
|-----|----------|--------|
| x | 0.976 | 0.575 |
| y | 0.966 | 0.569 |
| z | -0.999 | -0.589 |

利用主成分分析法对表9中未旋转的因子荷载进行标准化,提取主因子的荷载值,获取标准化正交特征向量(见表9)。

根据表9所示特征向量,主成分 n 与4.75、9.5、13.2 mm 粒径集料的关系式为:

$$n = 0.575x + 0.569y - 0.589z \quad (1)$$

对表2中4.75、9.5与13.2 mm 粒径集料的通过率进行标准化,并利用式(1)计算各级配的主成分值,结果见表10。

表10 各级配的主成分值

| 级配编号 | 主成分值 n | 级配编号 | 主成分值 n |
|------|----------|------|----------|
| A | -1.793 | D | 1.287 |
| B | -1.607 | E | 2.022 |
| C | 0.091 | | |

结果表明通过主成分分析可对线性相关的不同粒径集料提取主成分,消除线性相关性并获取线性无关的主成分,为线性回归分析建立基础。

2.3.3 一元线性回归分析

以不同级配沥青路面的横向力系数 SFC 为因变量,以提取的主成分为自变量进行一元线性回归分析,结果见图1。

从图1可以看出:横向力系数 SFC 与主成分具有良好的线性关系,其随着主成分的增加而线性增加,相关系数 R^2 达到 0.927,关系式为 $SFC = 3.204n + 64.14$ 。一元线性回归分析结果表明主成分分析法提出的主成分可用于分析不同粒径集料对

沥青路面抗滑性能的综合影响。

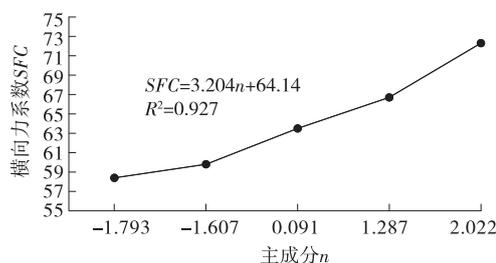


图1 线性拟合回归分析结果

3 结论

(1) 采用“逐步法”的多元线性回归分析结果表明 13.2 mm 粒径集料对沥青路面抗滑性能的影响最大。

(2) 采用主成分分析法对不同粒径集料提取主成分,可消除各粒径集料间的线性相关性,为回归分析建立基础。

(3) 一元线性回归分析结果表明提取的主成分与横向力系数具有优良的线性关系,说明利用主成分分析法结合线性回归分析法可分析不同粒径集料对沥青路面抗滑性能的综合影响。

(4) 在保证沥青混合料结构稳定性及施工不发生离析的情况下,AC-13C 型沥青混合料可适当提高 13.2 mm 粒径集料的通过率以提高沥青路面的抗滑性能,为车辆提供更安全的行驶环境。

参考文献:

- [1] 周磊.影响沥青路面抗滑性能因素的研究[J].公路与汽运,2016(2).
- [2] 孙杨勇.粗集料表面微观构造分形性质探讨与沥青路面抗滑性能关系研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [3] 孙杨勇,陈树滔,尹昌宇.改性树脂抗滑层在中山光明桥钢桥面抗滑改造中的应用[J].公路与汽运,2014(5).
- [4] 刘军.高等级公路沥青路面抗滑性能分析及抗滑措施[J].公路与汽运,2007(4).
- [5] 邱志雄.基于宏观轮廓的沥青路面抗滑性能试验研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [6] 初秀民,李永,严新平,等.基于微观形貌特征的沥青路面抗滑性能评价研究进展[J].交通与计算机,2007,25(1).
- [7] 宫秀青.沥青路面宏观纹理磨损与抗滑性能衰变行为研究[D].北京:北京工业大学,2014.
- [8] 彭成坝.沥青混凝土路面纹理构造表征技术研究[D].西安:长安大学,2011.

(下转第 79 页)

对于沥青这样的粘弹性材料,如果弹性比例增大,则其相位角 δ 减小、复数模量 G^* 增大。由图2、图3可知:与老化沥青相比,当再生剂掺量为6%时,掺入不同配方再生剂的再生沥青的复数模量 G^* 均不同程度地降低,相位角 δ 均不同程度地增大;掺入再生剂B和D的再生沥青的这两个指标较接近于基质沥青,说明再生剂B和D对老化沥青的粘性恢复效果较好。

沥青老化后,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 增大,意味着抗车辙能力增强,但并不表示老化后沥青路面的整体性能变好。老化沥青处于较低温度时,其柔性和韧性会降低,在车辆载荷作用下其比基质沥青更容易开裂。由图4可知:掺入不同再生剂的再生沥青的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 比老化沥青的小,抗车辙能力有所减弱,但从另一个角度来说,再生沥青的粘度增大,不再像老化沥青那样硬脆。

由图5可知:掺入不同再生剂的再生沥青的疲劳因子 $G^*\sin\delta$ 比老化沥青的小,说明再生沥青的耐疲劳性能更好,低温下不易开裂。

综合分析,掺入再生剂B和D的再生沥青的4个动态剪切流变性能指标与基质沥青非常接近,再生效果最好。

3 结论

(1) 掺入渗透型再生剂的再生沥青的各项指标都优于老化沥青及掺入普通再生剂的再生沥青,渗透型再生剂能有效渗透进入旧集料表面包裹的老化沥青薄膜中改善老化沥青的性能。

(2) 再生剂使旧沥青由凝胶状态向溶胶状态转变,弹性程度增大,抗低温开裂能力提高,且当废机油与邻苯二甲酸二丁酯的比例为7:3时,对老化沥青的综合改善效果较好。

(3) 当渗透型再生剂中加入邻苯二甲酸二丁酯时,对老化沥青的改善效果比纯废机油好,可能是因

为邻苯二甲酸二丁酯分子分散到沥青质之间,其极性基团与极性沥青质团有相互吸引的作用,将网状结构上的大分子极性基团遮盖起来,削弱了沥青质之间的作用力,使聚结的沥青质分散开来;其次,由于邻苯二甲酸二丁酯小分子具有良好的流动性,增大了沥青质间的距离,一定的油分得以进入沥青质大分子之间,提高了沥青质分子间的流动性能,进而恢复沥青的塑性。

参考文献:

- [1] 魏荣梅.道路沥青的老化与再生研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
- [2] 耿九光.沥青老化机理及再生技术研究[D].西安:长安大学,2009.
- [3] 查旭东,杨胜丰,侯英,等.再生剂选择及其对旧沥青性能影响分析[J].公路与汽运,2013(3).
- [4] 况栋梁.渗透型再生剂的制备及其对再生沥青及混合料性能的影响[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [5] JTG E20-2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [6] 丁录玲,黄晓明.沥青再生剂扩散机理与扩散模拟试验研究[J].交通科技,2009(5).
- [7] 周庆华,沙爱民.沥青高温流变评价指标对比[J].交通运输工程学报,2008,8(1).
- [8] Karlsson R, Isacson U, Ekblad J. Rheological characterisation of bitumen diffusion[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(1).
- [9] 蹇金桥,徐燕.就地热再生沥青混合料SYS再生剂最佳掺量确定[J].公路与汽运,2015(2).
- [10] 吴桂金.厂拌热再生沥青混合料马歇尔配合比设计方法探讨[J].公路,2011(5).
- [11] 王海燕,王延海.沥青及沥青混合料的二次再生性能研究[J].公路与汽运,2016(5).
- [12] 于玲,刁家栋,杨彦海,等.沥青路面厂拌热再生技术的使用性能评价与研究[J].中外公路,2014,34(2).

收稿日期:2016-10-25

(上接第75页)

- [9] 李天祥.沥青路面抗滑性能衰减试验研究[D].西安:长安大学,2009.
- [10] 张璐军.GAC-13与AC-13沥青混合料抗滑性能对比分析[J].公路与汽运,2015(5).
- [11] 舒春建.基于胎-路相互作用的沥青道路表面纹理损伤研究[D].南京:东南大学,2015.
- [12] 文斌,曹东伟.高速公路路面抗滑力与交通事故的统

计分析[J].公路交通科技,2006,23(8).

- [13] 亚森·肉孜,陈光亮.环保安全型沥青路面的抗滑性能分析[J].公路与汽运,2015(4).
- [14] 马旭,李植淮,杨涛,等.ASPS对AC-13沥青混合料抗滑性能的影响[J].交通科学与工程,2015,31(4).

收稿日期:2017-02-10