

基于灰关联理论的沥青路面车辙影响因素分析

林广华

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041)

摘要: 选用 5 种不同级配组成的 AC-13C 型沥青混合料并铺筑于同一路线上以保证所受荷载与环境一致,应用灰关联理论分析不同粒径集料含量、沥青用量和空隙率对沥青路面车辙形成的影响,同时采用熵关联度进行对比分析。结果表明各因素对沥青路面车辙的影响程度排序为空隙率>最佳油石比>2.36 mm 矿料含量>0.075 mm 以下矿料含量(矿粉)>4.75 mm 矿料含量>9.5 mm 矿料含量>13.2 mm 矿料含量。

关键词: 公路;沥青路面;车辙;矿料含量;沥青用量;空隙率;灰关联度

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)04-0081-04

沥青路面车辙是多种因素共同作用的结果。由于沥青混合料存在一定的空隙率,在车辆荷载作用下产生局部压实,同时在高温情况下路面经荷载反复作用,其内部沥青及胶浆产生流动,集料骨架承受荷载,加上内部组成结构的破坏,形成大规模车辙。目前多针对车辙进行单一控制变量研究,对不同影响因素的综合定量分析较少,同时大多数研究采用室内动稳定度试验,与实际路面车辙形成存在一定差异。该文对 5 种级配 AC-13C 型沥青混合料试验路段在竣工验收时进行车辙检测,采用灰关联法分析沥青混合料不同因素对路面使用初期车辙形成的影响。

1 试验原材料与方法

1.1 原材料

5 种级配 AC-13C 型沥青混合料均采用花岗岩、佛山高富 SBS 改性沥青,沥青的基本技术指标

见表 1,混合料级配见表 2。

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℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	≥50	78	
延度(5℃,5 cm/min)/cm	≥20	>100	
软化点(环与球法)/℃	≥60	84	
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	实测值	1.104	
闪点(开口法)/℃	≥230	283	
48 h 离析/℃	≤2.5	0.37	
弹性恢复(25℃)/%	≥70	91.54	
布氏粘度(135℃)/(Pa·s)	≤3	1.427	
测力延度比(4℃,5 cm)/min	≥0.3	0.746	
RTFOT 后残 留物(163℃, 85 min)	质量损失/%	≤1.0	0.05
	软化点/℃	—	73.8
	延度(5℃,5 cm/ min)/cm	≥15	36
	针入度比 (25℃)/%	≥60	76.9

表 2 AC-13C 型沥青混合料级配

级配编号	下列筛孔(mm)的通过率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
A	0	92.0	72.7	40.6	27.5	21.1	15.8	11.9	8.9	5.3
B	0	94.0	78.3	41.2	29.4	23.5	17.8	13.9	10.4	7.3
C	0	97.2	65.3	40.1	28.1	19.6	12.2	9.3	7.3	6.2
D	0	99.2	72.8	39.9	27.4	21.9	16.0	12.2	9.1	6.4
E	0	99.7	73.7	40.3	28.3	21.3	15.0	10.9	8.3	6.2

1.2 灰关联法

灰关联法是一种系统性分析方法,通过灰关联分析可探究不同影响因素与事件发展趋势的关系,

寻找出主要影响因素与次要影响因素,其适用于样本数据有限且对规律要求不严的统计分析。考虑到试验路段较少,无法进行大规模控制变量对比分析,

采用灰关联法分析不同因素对沥青路面车辙形成的影响程度。

车辙形成机理表明其主要受到矿料性质、矿料级配、沥青混合料空隙率、沥青用量、沥青性质及交通气候条件等的影响。针对5条试验路段,通过马歇尔试验确定最佳油石比及沥青混合料空隙率。AC-13C型沥青混合料中2.36 mm及以上粒径集料构成混合料骨架以抵抗车辆荷载,0.075 mm以下粒径集料(矿粉)的加入可提高结构沥青含量,但过多的矿粉会导致沥青混合料易产生较大塑性变形。下面主要分析<0.075、2.36、4.75、9.5、13.2 mm粒径集料含量及沥青用量、空隙率对路面车辙的影响。灰关联度计算步骤:

(1) 确定参考序列(评价标准)与比较序列(评价对象)。设评价对象有 m 个,评价指标有 n 个,则参考序列 $x_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$,比较序列 $x_i = \{x_i(k) | k=1, 2, \dots, n\} (i=1, 2, \dots, m)$ 。

(2) 由于各因素数据量纲不同,无法统一对比分析,按式(1)对数据进行无量纲化处理。

$$y_0 = \frac{x_0(k)}{x_0(1)}, y_i = \frac{x_i(k)}{x_i(1)} \quad (1)$$

(3) 按式(2)计算灰关联系数。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_t |y_0(t) - y_1(t)| + \rho \max_t |y_0(t) - y_1(t)|}{|y_0(k) - y_1(k)| + \rho \max_t |y_0(t) - y_1(t)|} \quad (2)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为比较序列对参考序列在第 k 个指标上的关联系数; $t=1, 2, \dots, n$; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$,通常取0.5。

(4) 按式(3)计算灰色加权关联度。

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_i \xi_i(k) \quad (3)$$

式中: w_i 为第 i 个评价对象对参考对象的加权关联度,这里各影响因素的权重相同。

以上采用逐点关联度平均值的方法确定关联度,会导致局部点关联倾向(在点关联测度分布离散的情况下由点关联测度值大的点决定总关联度的倾向)和信息损失(平均值淹没了许多点关联测度值的个性,而采用加权平均则需确定加权系数,使关联度存在很大的主观性)。为此,采用灰色关联熵分析法计算比较序列的熵关联度。主要步骤:

(1) 按式(4)计算灰关联系数分布映射,即分布的密度值。

$$P_h = \frac{R_h}{\sum_{h=1}^n R_h}, P_h \in P_i, h=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

(2) 计算灰熵。设灰内函数 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$,对于任何 i ,若 $X_i \gg 0$,且 $\sum X_i = 1$,则称函数

$H \oplus = -\sum_{i=1}^n X_i \ln X_i$ 为序列 X 的灰熵。为消除随机性与不确定性,灰熵具有最大值,为 $H_m(X) = \ln(n)$ 。

(3) 按式(5)计算灰关联熵。当序列 X_i 的灰关联熵最大时, X_i 各点对参考序列的影响均衡,表明 X_i 与参考序列各点的距离均衡,即 X_i 与参考序列集合形状更接近, X_i 为最强关联列。

$$H(R_i) = -\sum_{h=1}^n P_h \ln(P_h) \quad (5)$$

(4) 按式(6)计算熵关联度。比较序列的熵关联度越大,其与参考序列的关联性越强。

$$E_j(X_i) = \frac{H(R_i)}{H_m} \quad (6)$$

2 试验结果

2.1 最佳油石比的确定

以估计最佳油石比5.0%为中值,按0.5%间隔变化,取5种不同油石比制作马歇尔试件进行马歇尔试验,分别计算空隙率、饱和度、流值等指标。根据马歇尔试验结果,A、B、C、D、E配合比的最佳油石比分别为4.9%、5.1%、4.8%、4.9%、5.0%,空隙率分别为4.2%、4.5%、4.4%、4.2%与4.6%。

2.2 车辙检测

为确保所有试验路段所受环境影响及车辆荷载一致,5条试验路均铺筑在同一条路线上。采用3 m尺测量路面车辙,结果见表3。

表3 路面车辙测量结果

试验路段	车辙/mm	试验路段	车辙/mm
A	4.79	D	4.14
B	5.25	E	6.02
C	5.81		

3 灰关联分析及讨论

以车辙为参考序列,以<0.075、2.36、4.75、9.5和13.2 mm粒径集料含量及沥青用量和空隙率作为比较序列(见表4)。

表 4 沥青混合料的车辙和参数

级配编号	车辙/mm	$P_{13.2}/\%$	$P_{9.5}/\%$	$P_{4.75}/\%$	$P_{2.36}/\%$	$P_{<0.075}/\%$	油石比/%	空隙率/%
A	4.79	8.0	19.3	32.1	13.1	5.3	4.9	4.2
B	5.25	6.0	15.7	37.1	11.8	7.3	5.1	4.5
C	5.81	2.8	31.9	25.2	12.0	6.2	4.8	4.4
D	4.14	0.8	26.4	32.9	12.5	6.4	4.9	4.2
E	6.02	0.3	26.0	33.4	12.0	6.2	5.0	4.6

对表 4 进行初值化处理并计算各比较序列与参考序列的求差序列,计算结果见表 5、表 6。按式 (2)、式(3)计算各因素的灰关联系数与灰色加权关联度,结果见表 7。

表 5 初值化结果

级配编号	车辙	$P_{13.2}$	$P_{9.5}$	$P_{4.75}$	$P_{2.36}$	$P_{<0.075}$	油石比	空隙率
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
B	1.096 0	0.750 0	0.813 5	1.155 8	0.900 8	1.377 4	1.040 8	1.071 4
C	1.212 9	0.350 0	1.652 8	0.785 0	0.916 0	1.169 8	0.979 6	1.047 6
D	0.864 3	0.100 0	1.367 9	1.024 9	0.954 2	1.207 5	1.000 0	1.000 0
E	1.256 8	0.037 5	1.347 2	1.040 5	0.916 0	1.169 8	1.020 4	1.095 2

表 6 求差序列

级配编号	车辙	$P_{13.2}$	$P_{9.5}$	$P_{4.75}$	$P_{2.36}$	$P_{<0.075}$	油石比
A	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
B	0.346 0	0.282 6	0.059 7	0.195 3	0.281 3	0.055 2	0.024 6
C	0.862 9	0.439 9	0.427 9	0.296 9	0.043 1	0.233 4	0.165 3
D	0.764 3	0.503 6	0.160 6	0.089 9	0.343 2	0.135 7	0.135 7
E	1.219 3	0.090 4	0.216 3	0.340 8	0.087 0	0.236 4	0.161 5

表 7 各影响因素的灰关联系数及关联度

级配编号	各因素的灰相关性系数						
	$P_{13.2}$	$P_{9.5}$	$P_{4.75}$	$P_{2.36}$	$P_{<0.075}$	油石比	空隙率
A	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
B	0.637 9	0.683 3	0.910 8	0.757 4	0.684 2	0.916 9	0.961 2
C	0.414 0	0.580 9	0.587 6	0.672 5	0.933 9	0.723 2	0.786 7
D	0.443 7	0.547 6	0.791 5	0.871 5	0.639 8	0.817 9	0.817 9
E	0.333 3	0.870 9	0.738 1	0.641 5	0.875 1	0.720 6	0.790 5
灰关联度	0.565 8	0.736 5	0.805 6	0.788 6	0.826 6	0.835 7	0.871 3

由表 7 可知:各因素对车辙性能的灰关联度均大于 0.5,表明各因素对车辙的影响程度都显著;各因素对 AC-13C 型沥青混合料路面车辙影响程度大小顺序为空隙率>最佳油石比>0.075 mm 以下矿料(矿粉)含量>4.75 mm 矿料含量>2.36 mm 矿料含量>9.5 mm 矿料含量>13.2 mm 矿料含量。

为避免出现局部点关联倾向与信息损失,确保各因素对车辙影响程度分析的准确性,按式(4)~(6)计算各因素的分布密度、灰关联熵及熵关联度,结果见表 8。

相对于灰关联度分析,灰熵分析中各因素对车辙的影响发生一定变化,2.36 mm 矿料含量与矿粉含量对其影响程度对调,影响程度大小顺序为空隙率>最佳油石比>2.36 mm 矿料含量>0.075 mm 以下矿料含量>4.75 mm 矿料含量>9.5 mm 矿料含量>13.2 mm 矿料含量。差异的产生原因主要是两者计算方法不同,2.36 mm 矿料含量的方差比矿粉含量的方差小,分布更均衡,采用灰熵法更合理,其结果更具说服力。

两种方法的分析结果均表明沥青混合料空隙率

表 8 各影响因素的分布密度、灰关联熵及熵关联度

级配编号	各因素的分布密度					油石比	空隙率
	$P_{13.2}$	$P_{9.5}$	$P_{4.75}$	$P_{2.36}$	$P_{<0.075}$		
A	0.353 5	0.271 6	0.248 3	0.253 6	0.242 0	0.239 3	0.229 5
B	0.225 5	0.185 6	0.226 1	0.192 1	0.165 5	0.219 4	0.220 6
C	0.146 3	0.157 7	0.145 9	0.170 6	0.226 0	0.173 1	0.180 6
D	0.156 8	0.148 7	0.196 5	0.221 0	0.154 8	0.195 7	0.187 7
E	0.117 8	0.236 5	0.183 2	0.162 7	0.211 7	0.172 5	0.181 5
灰关联熵	1.527 2	1.582 3	1.593 6	1.595 6	1.594 7	1.601 0	1.604 1
熵关联度	0.948 9	0.983 1	0.990 1	0.991 4	0.990 8	0.994 7	0.996 7

对车辙性能的影响最大,表明路面在竣工验收时所产生的车辙主要受空隙率的影响。这是由于在车辙形成前期,空隙率较大的沥青混合料在车辆荷载作用下容易产生竖向压实变形,形成车辙病害。油石比对沥青混合料高温性能具有明显影响,原因是沥青用量越大,自由沥青越多,导致矿料间的嵌挤力下降,抗车辙能力降低;沥青用量过低又会导致沥青混合料难以压实,同样影响路面的抗车辙能力。矿粉用量对沥青路面车辙性能的影响较大,这是由于矿粉比表面积大,产生大量的结构沥青,可有效提高沥青路面的高温稳定性,然而过多的矿粉用量会影响沥青混合料骨架的形成。熵关联度表明在 AC—13C 型沥青路面车辙形成初期,13.2 mm 粒径矿料对其影响程度最低,而 2.36 mm 粒径矿料的影响程度较高。

4 结论

(1) <0.075 、2.36、4.75、9.5 和 13.2 mm 粒径集料含量及沥青用量和空隙率与路面车辙的灰关联度均大于 0.5,其对沥青路面初期车辙的影响均显著。

(2) 对沥青路面初期车辙的影响程度排序为空隙率 $>$ 最佳油石比 $>$ 2.36 mm 矿料含量 $>$ 0.075 mm 以下矿料(矿粉)含量 $>$ 4.75 mm 矿料含量 $>$

9.5 mm 矿料含量 $>$ 13.2 mm 矿料含量,空隙率与油石比对初期车辙的影响大。

参考文献:

- [1] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [2] 张岐山,郭喜江,邓聚龙.灰关联熵分析方法[J].系统工程理论与实践,1996,16(8).
- [3] 陈建民.基于灰色理论的沥青混合料高温稳定性分析[D].长沙:湖南大学,2004.
- [4] 黄一晨.基于面层材料与结构的沥青路面抗车辙性能研究[D].北京:北京工业大学,2014.
- [5] 张敏,邹桂莲,胡金龙,等.沥青混合料抗车辙性能影响因素分析[J].科学技术与工程,2012,12(12).
- [6] 陈振富,吴旦,全锋,等.沥青路面车辙主要影响因素综述[J].中外公路,2016,36(4).
- [7] 曾凡奇.重载交通沥青关键指标研究[D].南京:东南大学,2005.
- [8] 张肖宁.沥青路面施工质量控制与保证[M].北京:人民交通出版社,2009.
- [9] 吴喜荣.基于灰关联熵分析法的沥青混合料抗裂性能影响因素分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2).

收稿日期:2018—03—09

(上接第 80 页)

- 查[J].人民长江,2009,40(8).
- [3] 唐红梅,陈洪凯.公路泥沙流研究综述(I)[J].重庆交通学院学报,2004,21(4).
- [4] 熊传祥,王涛,鲁晓兵.降雨作用下崩岗形成细观机理模拟[J].山地学报,2013,31(6).
- [5] 倪化勇.人工降雨条件下冲沟型泥石流起动试验研究[J].工程地质学报,2015,23(1).
- [6] 谢小康,范国雄.广东五华乌陂河流域崩岗发育规律及

其治理:以迎龙山为例[J].山地学报,2010,28(3).

- [7] 陈志彪,朱鹤健,刘强,等.根溪河小流域的崩岗特征及其治理措施[J].自然灾害学报,2006,15(5).
- [8] 巫南祥.梅县崩岗治理实践[J].中国水土保持,2011(1).
- [9] 马媛,丁树文,何溢钧,等.崩岗“五位一体”系统性治理措施探讨[J].中国水土保持,2016(4).

收稿日期:2017—11—10