

乳化沥青混合料强度影响因素的灰关联熵分析

熊锐¹, 陈拴发¹, 关博文¹, 涂帅¹, 杨发²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘 要:在修正的高温马歇尔试验基础上,运用灰关联熵分析法对影响乳化沥青混合料强度的各主要因素:水泥掺量、集料级配(采用分形维数表征)、沥青用量、乳化沥青混合料空隙率、密度和沥青饱和度等进行了分析.研究表明,水泥掺量、空隙率对乳化沥青混合料强度有重要影响.在乳化沥青混合料配合比设计和施工时,应对这两个因素进行严格控制.

关键词:道路工程;乳化沥青;乳化沥青混合料;强度;灰关联熵

中图分类号:U414.75 **文献标识码:**A

0 引言

乳化沥青作为一种节约、安全、环保、有效且通用的道路建筑材料,正得到日渐广泛的应用^[1-3].乳化沥青混合料则是针对乳化沥青具有流动性较大的特征进行研究的一种既经济又具有良好路面力学性能的筑路材料,目前已开始尝试其在农村公路上应用,并取得了良好的经济效益和社会效益^[4].乳化沥青混合料在行车荷载和周围环境的作用下,其强度承受巨大考验,很大程度上影响着路面的使用性能和服务质量.因此,分析各影响因素对乳化沥青混合料强度的相对显著程度,对其配合比设计及科学施工具有一定的指导意义.基于乳化沥青混合料强度是一个典型的“灰色系统”,因此笔者尝试运用改进的灰关联熵分析法进行系统分析.

1 灰关联熵分析法

邓聚龙^[5]提出的灰色理论能在“小样本、贫信息”条件下对系统进行分析,从而找出各种因素与系统发展态势之间的关系,分辨出主要因素和次要因素,对系统的发展作出积极有效的引导,因此,具有很强的实用性.作者采用具有较高可靠度的灰关联熵分析法^[6-7]来研究各影响因素的显著性.

1.1 灰关联系数

X 为灰关联因子集, $x_0(x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ 为参考列, $x_i(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 为比较列,则比较列与参考列间的灰关联系数为

$$\xi_i[x_0(k), x_i(k)] = \left| \frac{\min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)} \right| \quad (1)$$

式中: $\min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k)$ 为两极最小差; $\max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)$ 为两极最大差; ρ 为分辨系数,一般取 0.5.

1.2 灰关联熵与灰熵关联度

X 为离散数列, $x_0 \in x$ 为参考列, $x_i \in x$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 为比较列, $R_i = \xi[x_0(k), x_i(k)]$ ($k = 1, 2, \dots, n$), 则

$$P_h \triangleq \frac{\xi[x_0(h), x_i(h)]}{\sum_{k=1}^n \xi[x_0(h), x_i(h)]}, \\ P_h \in P_i, (h = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: P_h 为分布的密度值.

X_i 的灰关联熵表示为

$$H(R_i) \triangleq - \sum_{h=1}^n P_h \ln P_h \quad (3)$$

序列 x_i 的灰熵关联度为

$$E(x_i) \triangleq H(R_i) / H_{\max} \quad (4)$$

式中: $H_{\max} = \ln n$, 代表由 n 个元素构成的差异信息列的最大值.

收稿日期:2010-07-08;修订日期:2010-08-12

基金项目:长安大学基础研究计划专项基金(CHD2010ZYD14)

作者简介:熊锐(1982-),男,河南罗山人,长安大学博士研究生,从事路面结构与材料研究, E-mail: xiongr61@126.com.

2 乳化沥青混合料强度影响因素分析

影响乳化沥青混合料强度的内因主要有水泥沥青、矿料和混合料的性质.下文列出了研究涉及到的试验原材料及性能.

2.1 试验原材料及性能

2.1.1 乳化沥青

试验采用韩国 SK. AH-70#基质沥青,乳化后根据文献[8]中相关试验方法进行沥青材料的性能测定,其主要技术指标见表 1.

2.1.2 集料和填料

采用的粗、细集料均产自重庆歌乐山,属石灰岩.集料洁净、表面粗糙,质地坚硬,形状多为方形和菱形,针片状较少,没有风化现象,无夹层泥土混入.填料为石灰岩矿粉.经检测,各主要技术性

2.1.3 矿料的级配

选用两种级配进行试验,见表 2.

表 1 慢裂快凝型阳离子乳化沥青技术指标
Tab.1 Technical specifications of slow-breaking and rapid-setting cationic emulsified asphalt

检测项目	规范要求	测试值
破乳速度	慢裂	慢裂
粒子电荷	+	+
1.18 mm 筛上剩余量/%	≤0.1	0.05
标准黏度/s	10~60	20
蒸发残留物含量/%	≥55	59.8
蒸发残留物针入度 (25℃)/0.1 mm	45~150	62
蒸发残留物 15℃延度/cm	≥40	101
溶解度(三氯乙烯)/%	≥97.5	98.7
与粗集料的粘附性,裹附 面积不小于	2/3	4/5

表 2 AC-13 试验级配
Tab.2 AC-13 aggregate gradations %

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	100	96.7	71.8	44.0	30.2	21.6	16.3	12.3	8.5	5.0
GAC-13	100	91.8	71.1	35.5	26.0	21.9	18.2	14.3	10.5	6.5

其中,GAC-13 级配采用了“MSSF 矿料级配设计方法”^[9],通过理论计算,并对细料级配进行适当调整,曲线呈 S 型.该级配接近 AC-13 级配的下限和 SMA-13 级配的上限,属骨架密实型.

2.1.4 水泥

普通水泥早期强度高、力学性能好,乳化沥青与之混合后能延缓其初期的水化反应,弥补了普通水泥初凝时间较短造成施工操作不便的缺陷.试验采用重庆水泥厂生产的 P.032.5 水泥,其技术性能试验符合规范要求.

2.2 主要影响因素分析

2.2.1 水泥

普通乳化沥青混合料在乳液破乳后内部结构疏松,空隙率较大;而水泥-乳化沥青混合料强度是乳化沥青、矿粉、水泥和水共同作用的结果,水泥掺入后,纤维状的水泥水化产物纵横交织,并向四周发展,与沥青膜和集料相互贯穿,形成空间网状结构,使整个结构均匀、密实,很大程度上改变了普通乳化沥青混合料的性质,即由原来的柔性材料变为半柔性材料,这对提高混合料的强度是

十分有利的.基于此,将其掺量作为一个因素进行考察.

2.2.2 乳化沥青

乳化沥青破乳后,其粘结性能逐渐恢复,混合料的强度开始增大,直至达到理论上与热拌沥青混合料几乎相当的效果.乳化沥青的用量应控制在合理的范围内,若乳化沥青用量过高,将会在混合料中形成游离的自由沥青,高温时,这部分沥青在荷载作用下发生流动变形,形成车辙病害;若乳化沥青用量过低,则矿料间缺乏足够的粘结力,乳化沥青混合料难以压实.可见,乳液用量的过高或过低均会劣化混合料的强度和稳定性.为方便起见,将乳化沥青破乳后的沥青用量作为混合料强度影响因素之一.

2.2.3 集料级配

集料级配对乳化沥青混合料强度有重要影响,它决定了集料颗粒间嵌挤力的大小及混合料的密实程度.良好的集料级配,有利于改善沥青混合料的路用性能.由于矿料的级配具有分形特征,因此,笔者运用分形理论,以分形维数表征乳化沥

青混合料级配特征,并将级配分形维数与乳化沥青混合料的强度建立联系。

(1) 集料级配分形模型的建立^[10]

分形理论中,以 D 作为分维数值,表征研究对象的复杂程度;令 $P(r)$ 为粒径是 r 的集料颗粒通过筛孔的质量百分率,经推导出

$$P(r) = \frac{r_{\min}^{(3-D)} - r_{\max}^{(3-D)}}{r_{\min}^{(3-D)} - r_{\max}^{(3-D)}} \quad (5)$$

式中: r_{\max} 为最大颗粒粒径; r_{\min} 为最小颗粒粒径。

一般情况下,当颗粒粒径 r 相对于 r_{\min} 较大时, r_{\min} 可以忽略,式(5)化为

$$P(r) = \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

当颗粒粒径 r 与 0.075 mm 比较接近时,其质量通过率已经不符合分形规律。因此,针对混合料级配的分形维数 D ,应选取筛孔为 0.3 mm 以上的数据进行计算^[11]。

(2) 按式(6)及文献[11]计算试验级配的分形维数,见表3。

表3 集料级配分形维数

Tab.3 Fractal dimension of aggregate gradations

级配	分形维数 D	相关系数 r
AC-13	2.456 3	0.993 6
GAC-13	2.501 6	0.970 3

计算结果也说明了集料的级配具有明显的分形特征,采用分形维数表征集料级配来研究其对乳化沥青混合料强度的影响是合理的。

2.2.4 空隙率

由于乳化沥青中含有水分,在混合料成型和养生过程中,随着水分的蒸发,空隙率不断增大,必将对乳化沥青混合料的强度产生影响。因此,须将空隙率控制在一定范围内,防止其值过大导致混合料易被压密变形,保证混合料的强度。

2.2.5 混合料密度

乳化沥青混合料的密度与其结构密切相关。随着乳液中水分的蒸发,在混合料中会留下较多的空隙,导致结构疏松,混合料强度降低;水泥掺入后,其水化反应和填充作用在一定程度上改善了乳化沥青混合料的结构,使混合料强度提高。

2.2.6 沥青饱和度

沥青饱和度与沥青用量和混合料空隙率有密切关系,密实的级配和水泥改善结构的作用使乳化沥青混合料空隙率变小,乳液破乳后的沥青用量制约了沥青饱和度的大小。合理的沥青饱和

度对乳化沥青混合料强度的提高是有利的。

3 实例计算与分析

3.1 乳化沥青混合料高温马歇尔试验结果

3.1.1 水泥用量

水泥的掺入,提高了乳化沥青混合料的强度,但其用量以适度为宜。研究表明:随着水泥用量的增加,混合料的强度和刚度增加,但疲劳性能下降。此外,还需考虑经济性,因此试验选取1%,2%,3%和4%。

3.1.2 试验方法及结果

乳化沥青混合料高温马歇尔稳定度能够反映其后期强度,笔者拟采用该指标来评价乳化沥青混合料的强度。普通乳化沥青混合料需经比热拌沥青混合料成型时间长得多的时间才能形成一定的强度,而掺入水泥后的乳化沥青混合料在水泥水化作用下其强度形成时间有所缩短,为合理模拟混合料强度逐渐形成的过程并考虑水泥水化对温度的敏感性(水泥在60℃条件下水化1d相当于常温下7d;但当温度超过60℃后,水泥的水化速度会迅速降低甚至停止^[12]),故需要对传统的马歇尔试验方法进行修正。

针对普通乳化沥青混合料提出的修正马歇尔稳定度试验方法如下:

①每组试件上下两面各击实50次,分两次击实。首先在试件拌制入模的时候,上下两面各击实25次,经规定条件的模内养生后,再于试件上下两面各击实25次,然后冷却脱模。②一组试件采用6个,其中3个试件置于室温条件下分别在试模内和试模外养生24h;另外3个试件在110℃烘箱中于试模内养生24h。

针对水泥-乳化沥青混合料提出的再修正马歇尔稳定度试验方法如下:

①每组试件上下两面各击实75次,分两次击实。首先在试件拌制入模的时候,第二次击实在水泥初凝时进行(本试验中,室温养生条件下为水泥的初凝时间3h,60℃恒温恒湿养生条件下为1h)。第一次击实次数为35次,第二次为40次,秉承先轻后重的原则。二次击实后将试件脱模养生。②1组试件采用12个,其中6个试件置于室温条件下分别在试模内、试模外分别养生3h、45h,另外6个试件在60℃的烘箱中养生48h(其中模内养生1h,模外养生47h)。试验结果见表4。

3.2 各影响因素灰关联熵分析

按照前述计算方法,得到乳化沥青混合料强度影响因素的灰熵关联度,见表5。

表 4 乳化沥青混合料高温马歇尔试验结果
Tab. 4 High - temperature Marshall test results of emulsified asphalt mixture

混合料	x_0 稳定度/ kN	x_1 沥青 用量/%	x_2 集料级配 分形维数	x_3 水泥 用量/%	x_4 密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	x_5 空隙 率/%	x_6 沥青饱 和度/%
GAC - 13	4.92	3.6	2.501 6	0	2.288	8.96	47.02
GAC - 13	5.43	4.2	2.501 6	0	2.302	7.42	55.57
GAC - 13	6.26	4.8	2.501 6	0	2.313	6.79	60.94
GAC - 13	5.72	5.4	2.501 6	0	2.321	5.88	66.91
AC - 13	5.12	3.6	2.456 3	0	2.275	9.93	46.96
AC - 13	6.02	4.2	2.456 3	0	2.293	8.63	54.78
AC - 13	5.93	4.8	2.456 3	0	2.308	7.87	60.61
AC - 13	5.36	5.4	2.456 3	0	2.311	5.90	67.16
GAC - 13	8.30	3.6	2.501 6	1	2.292	7.00	50.21
GAC - 13	7.44	4.2	2.501 6	1	2.286	8.19	53.56
AC - 13	5.74	4.8	2.456 3	1	2.262	8.50	58.30
AC - 13	4.35	5.4	2.456 3	1	2.234	9.27	56.41
AC - 13	9.46	3.6	2.456 3	2	2.307	8.25	55.07
AC - 13	8.26	4.2	2.456 3	2	2.261	9.49	51.71
GAC - 13	9.83	4.8	2.501 6	2	2.257	8.55	55.95
GAC - 13	9.35	5.4	2.501 6	2	2.218	9.88	53.15
GAC - 13	15.88	3.6	2.501 6	3	2.312	8.22	57.45
GAC - 13	14.24	4.2	2.501 6	3	2.297	8.09	58.40
AC - 13	13.25	4.8	2.456 3	3	2.271	8.30	57.91
AC - 13	9.37	5.4	2.456 3	3	2.239	9.15	55.59
AC - 13	17.32	3.6	2.456 3	4	2.294	9.10	50.71
AC - 13	15.98	4.2	2.456 3	4	2.278	9.09	52.19
GAC - 13	14.66	4.8	2.501 6	4	2.270	8.74	56.49
GAC - 13	13.54	5.4	2.501 6	4	2.254	8.66	58.37

表 5 灰熵关联度
Tab. 5 Grey entropy correlation

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
灰熵关联度	0.988 1	0.988 4	0.992 3	0.988 7	0.989 1	0.986 0

由表 5 可以看出:各影响因素对乳化沥青混合料高温马歇尔稳定度的影响大小依次为:水泥用量 > 混合料空隙率 > 混合料密度 > 集料级配分形维数 > 沥青用量 > 沥青饱和度. 即,就乳化沥青混合料强度而言,水泥用量和混合料空隙率是最重要的两个影响因素.

3.3 结果分析

掺入水泥后的乳化沥青混合料中同时含有水泥(无机结合料)和沥青(有机结合料)2 种结合料,这就赋予了混合料刚柔兼济的性质,强度提高显著,是普通乳化沥青混合料的近 4 倍,说明了水泥 - 乳化沥青混合料性能的优越性.

在乳化沥青混合料成型和养生的过程中,乳液中的水分不断蒸发,在混合料中留下空隙,过大

的空隙率会导致结构疏松;而水泥的掺入改善了混合料的内部结构,其水化作用和填充作用使乳化沥青混合料的强度得到提高. 此外,混合料空隙率与集料级配关系密切,要提高乳化沥青混合料的强度,应改善集料级配,并合理控制水泥和沥青用量,使混合料嵌挤密实.

4 结论

就“小样本”、“贫信息”的系统而言,灰关联熵分析法是一种简单实用且结果比较准确的方法. 笔者研究的乳化沥青混合料就是一个大的灰体,影响该混合料强度的因素有很多. 通过灰熵分析,对影响乳化沥青混合料强度的因素的相对显著程度进行了排序,其中两个最主要的因素是水泥用量和乳化沥青混合料空隙率. 在乳化沥青混合料配合比设计和施工时,应将这两个因素作为主要控制点,并进一步考虑各因素的可控制程度和经济成本等,以改善和提高乳化沥青混合料的整体强度.

参考文献:

- [1] 交通部阳离子乳化沥青课题协作组. 阳离子乳化沥青路面[M]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [2] 蔡敏. 钢纤维乳化沥青混凝土路面材料的实验研究[C]//第七届全国纤维水泥与纤维混凝土学术会议论文集. 北京:中国铁道出版社,1998.
- [3] 虎增福. 乳化沥青及稀浆封层技术[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [4] 熊锐. 农村公路乳化沥青混合料路用性能试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学土木建筑学院,2009.
- [5] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1990.
- [6] 熊锐,杨锡武,杨发,等. 纤维沥青混合料高温稳定性影响因素的灰关联熵分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(5):743-747.
- [7] 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(8):7-11.
- [8] JTJ 052—2000,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [9] 王立久,刘慧. 骨架密实型沥青混合料集料级配设计方法[J]. 中国公路学报,2008,21(5):6-9.
- [10] 彭勇,孙力军. 基于分形理论沥青混合料均匀性评价方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(10):1656-1659.
- [11] 杨群,郭忠印,陈立平,等. 级配碎石分形特征分析及其在路面工程中的应用[J]. 建筑材料学报,2006,9(4):418-422.
- [12] 凌天青,李昌铸,雷俊卿. 中国西部地区公路自然气候特征与筑路材料产品技术标准[M]. 北京:人民交通出版社,2006.

Grey Correlation Entropy Analysis of Influence Factors on the Strength of Emulsified Asphalt Mixture

XIONG Rui¹, CHEN Shuan-fa¹, GUAN Bo-wen¹, TU Shuai¹, YANG Fa²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the modified Marshall test method, grey correlation entropy is applied to analyze the main factors such as cement content, aggregate gradation characterized by fractal dimension, asphalt content, volume of air voids in emulsified asphalt mixture, density of emulsified asphalt mixture and asphalt saturation influencing the strength of emulsified asphalt mixture. The results show that cement content and volume of air voids in emulsified asphalt mixture have a great effect on the strength of emulsified asphalt mixture. In the mix design and construction of emulsified asphalt mixture, these two factors should be strictly controlled.

Key words: road engineering; emulsified asphalt; strength; grey correlation entropy