

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.06.002

基于自愈合性能的沥青混合料设计因子研究

李江¹, 余胜军¹, 李诗琦², 李闯民²

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;

2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为了解决我国沥青混凝土道路养护中的路面开裂问题,为沥青路面建设与预防性养护提供数据支持,为区域养护政策与标准制定提供理论支撑,特针对当下公路沥青路面和城市道路沥青路面中普遍存在的开裂病害进行了自愈合性能影响因子研究。为了更好地模拟道路开裂和研究自愈合性能影响因素,从沥青混合料配合比设计着手,基于四点小梁弯曲疲劳试验,通过 N_{FM} 方法中的评价方法,选取疲劳恢复率作为评价指标,采用单因素方法对沥青混合料的空隙率、沥青用量、沥青种类及级配等因子进行了系统研究,并选用灰关联分析研究各因子显著影响水平。结果表明:首先,沥青混合料的自愈合能力与其空隙率成反比关系,随空隙率的增大,其疲劳寿命恢复率减小;其次,沥青混合料的自愈合能力与沥青用量成正比关系,随沥青用量的增大,其疲劳寿命恢复率增大;再者,SBS改性沥青混合料的自愈合能力要比普通沥青混合料更好,且随改性沥青的基质沥青标号的增大而增大;最后,不同级配的沥青混合料,其疲劳恢复率也是不一样的,随着最大公称粒径的增大,其疲劳寿命恢复率减小。同时,灰关联分析结果显示,沥青种类对沥青混合料的自愈合能力的影响是最显著的,其次沥青混合料的空隙率和沥青含量对其自愈合能力的影响较显著,而级配类型对沥青混合料的自愈合能力影响则不显著。

关键词:道路工程;自愈合性能;疲劳恢复率;影响因子;灰关联分析

中图分类号:U416.03

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2019)06-0010-07

Study on Design Factor of Asphalt Mixture Based on Self-healing Property

LI Jiang¹, YU Sheng-jun¹, LI Shi-qi², LI Chuang-min²

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: In order to solve the problem of pavement cracking in asphalt concrete road maintenance in China, to provide data support for asphalt pavement construction and preventive maintenance, and to provide theoretical support for formulating regional maintenance policies and standards, the influence factors of self-healing performance are studied for the common cracking diseases in asphalt pavement of highway and urban roads. In order to better simulate road cracking and study the influence factors of self-healing performance, starting from asphalt mixture mix design, based on four-point trabecular bending fatigue test and the evaluation method in N_{FM} method, choosing fatigue recovery rate as the evaluation index, the factors such as air voids, content, type and gradation of asphalt mixture are studied by using single factor method. The significant influence level of each factor is analyzed by using grey relational analysis. The result shows that (1) the self-healing ability of asphalt mixture is inversely proportional to its air void, and the fatigue life recovery rate decreases with the increase of air void; (2) the self-healing ability of asphalt mixture is proportional to the asphalt content, and the fatigue life recovery rate increases with the increase of asphalt

收稿日期:2018-04-02

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Z2060302160199019)

作者简介:李江(1978-),男,山东青岛人,博士。(30196419@qq.com)

content; (3) the self-healing ability of SBS modified asphalt mixture is better than that of ordinary asphalt mixture, and it increases with the increase of base asphalt label of modified asphalt; (4) the fatigue recovery rates of asphalt mixture with different gradations are different, and the fatigue life recovery rate decreases with the increase of maximum nominal particle size. At the same time, the grey relational analysis result shows that the influence of asphalt type on the self-healing ability of asphalt mixture is the most significant, followed by air void and content of asphalt mixture, while the gradation type has no significant effect on the self-healing ability of asphalt mixture.

Key words: road engineering; self-healing property; fatigue recovery rate; influencing factor; gray relational analysis

0 引言

沥青路面由于其平整度好、行车舒适、交通噪声小、维修养护简单且排水能力强等优良的特点,广泛应用于全球^[1]。然而,沥青路面是由集料和沥青组成,在若干年的使用后,经外部环境(如交通量过大导致负载、施工状况不良等条件)和自然环境(如光、氧、水等条件)的影响下,沥青路面容易发生疲劳开裂,产生微裂缝^[2-3]。若不加以处理,就会进一步发展,进而产生严重的路面裂缝,大大降低了路面的使用寿命。

基于延长路面的使用寿命,国内外学者开始关注如何延缓裂缝的扩散,并实现自愈合,即在使用过程中对出现的微小损伤实现自我愈合的能力。1967年,通过在荷载条件下,沥青混合料存在劲度模量和强度的自我修复过程,Bazin等发现了沥青混合料自愈合的特性^[4]。随后,国外大量学者开始对其进行研究。但Schapery, Wool, Carpenter和Shen等人的主要研究表现在沥青混合料自愈合形成机理、如何对其自愈合能力进行表征以及如何提高沥青混合料的自愈合能力等3个方面^[5-8]。而我国现阶段对其研究还较少,重庆交通大学的徐辰等^[9]通过正交试验,采用了DSR对不同沥青进行了疲劳-自愈合-疲劳试验,得出能量密度比是最佳的自愈合评价指标。武汉理工大学的何凡等^[10]采用三点弯曲梁的断裂-愈合-再断裂试验,引入强度恢复率作为自愈合指标,研究了3种沥青砂浆在不同愈合时间和温度条件下的自愈合性能。同济大学的孙大权等^[11]通过动态剪切流变仪研究了SBS、岩沥青及表面活性3种改性剂对沥青自愈合能力的影响。黄卫东等^[12]采用单因数对比分析法,通过四点弯曲疲劳试验研究了SBS改性沥青混合料疲劳自愈合能力的3类影响因子。汤文等^[13]人通过引入自愈合速率(Healing Rate,简称HR)和自愈合率(Healing

Index,简称HI),对沥青自愈合行为的影响因数及评价方法进行了研究。

以上研究大都集中于沥青及沥青混合料的自愈合机理及表征方面,对于其影响因子研究较少。因此,为了更进一步评价沥青混合料的自愈合性能,有必要对其影响因子进行完善和系统的研究。本研究通过采用单因子分析对其内在因子进行了研究,并通过灰关联分析研究了各内在因子的显著水平,进而找出最显著因子。

1 配合比设计和试验

本研究选用70[#],90[#]基质沥青,并通过SBS改性剂对其进行改性制得SBS改性沥青,并拟定AC-13,AC-20矿质混合料分别制备70[#],90[#]基质沥青混合料、SBS改性沥青混合料。以AC-13,AC-20沥青混合料作为研究对象,进行室内试验研究。

1.1 配合比设计

1.1.1 级配

级配选用《公路沥青路面施工技术规范》中推荐的AC-13中值和AC-20中值^[14]。具体级配见表1和表2。

表1 AC-13合成级配

Tab.1 AC-13 synthetic gradation

集料规格/ mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配中值/%	95	76.5	53	37	26.5	19	13.5	10	6

表2 AC-20合成级配

Tab.2 AC-20 synthetic gradation

集料规格/ mm	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配中值/%	95	85	71	61	41	30	22.5	16	11	8.5	5

1.1.2 最佳油石比

然后按照附录 B 的方法,进行马歇尔试验确定最佳油石比。

根据确定的级配称取矿料,油石比按 0.5% 为间距,AC-13 级配 5 种油石比分别为:3.5%,4.0%,4.5%,5.0%,5.5%;AC-20 级配 5 种油石比分别为:3.0%,3.5%,4.0%,4.5%,5.0%,进而成型标准马歇尔试件,计算每组试件的马歇尔技术指标,进行比较后得到最佳油石比,具体试验数据如表 3 和表 4 所示。

表 3 AC-13 SBS 改性沥青混合料马歇尔体积参数

Tab.3 Marshall volume parameters of AC-13 SBS modified asphalt mixture

油石比/ %	毛体积相 对密度	空隙率 VV/%	间隙率 VMA/%	饱和度 VFA/%	稳定度 MS/kN	流值 FL/mm
3.5	2.410	6.8	14.1	51.7	11.48	2.49
4.0	2.426	5.6	13.6	59.0	12.29	2.57
4.5	2.429	4.7	13.9	65.8	12.72	3.00
5.0	2.443	3.5	13.8	74.4	12.05	3.34
5.5	2.456	2.4	13.8	82.9	11.53	3.51

表 4 AC-20 70# 基质沥青混合料马歇尔体积参数

Tab.4 Marshall volume parameters of AC-20 No.70 matrix asphalt mixture

油石 比/%	毛体积相 对密度	空隙率 VV/%	间隙率 VMA/%	饱和度 VFA/%	稳定度 MS/kN	流值 FL/mm
3.0	2.435	6.1	12.76	52.6	10.87	2.26
3.5	2.452	4.9	12.59	61.4	11.26	2.91
4.0	2.463	3.8	12.63	69.9	12.72	3.27
4.5	2.489	2.0	12.11	83.1	12.03	3.37
5.0	2.499	0.9	12.18	92.5	11.88	4.19

通过计算分析,可以得出 AC-13 基质沥青混合料油石比为 4.7%,AC-13 改性沥青混合料油石比为 4.8%;AC-20 基质沥青混合料油石比为 3.9%,AC-20 改性沥青混合料油石比为 4.0%。

1.2 疲劳试验

1.2.1 四点小梁弯曲试验

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 T0739 试验方法^[15],采用万能试验机 MTS 对 70# 基质沥青混合料、90# 基质沥青混合料及 SBS 改性沥青混合料通过控制应变的加载方式,试验温度为 15℃,在 10 Hz 的试验频率下,采用四点小梁弯曲试验,对材料进行疲劳-自愈合-

再疲劳试验,其中结束条件是劲度模量为初始模量的 20%。由于在最佳油石比条件下,不同沥青混合料的路用性能均满足规范要求。因此,拟定 AC-13 70# 和 90# 沥青混合料的油石比为 4.7%,AC-13 SBS 改性沥青混合料油石比为 4.8%;AC-20 70# 和 90# 沥青混合料油石比为 3.9%,AC-20 SBS 沥青混合料油石比为 4.0%,认为在此条件下的沥青混合料具有可比性。

1.2.2 试验评价指标

为了定性和定量评价各种因数对沥青混合料自愈合能力的影响程度,需要明确一个合适的评价指标^[16]。鉴于本研究针对沥青混合料,采用四点小梁弯曲试验,常用的判断方法主要有 N_{50} 方法和 N_{INM} 方法两种。根据 Rowe 等^[17]人的研究发现,由于 SBS 改性沥青的黏度远大于基质沥青,且其初始劲度模量也远大于基质沥青,当达到劲度模量的 50% 时,SBS 改性沥青混合料可能还未开始出现疲劳破坏,因此使用 N_{50} 方法判断 SBS 改性沥青混合料的疲劳破坏离散型较大,不能较好地反映其疲劳性能。同时, N_{INM} 则避免了劲度模量对疲劳寿命的影响,因此按照美国 ASTM D7460 的方法,选用 N_{INM} 方法作为改性沥青混合料的疲劳判断标准。

N_{INM} 方法中,规定梁式试件进行四点疲劳-自愈合-再疲劳试验时,将第 50 次加载时的劲度模量平均值作为初始模量 S_1 ,疲劳寿命为 N_{INM1} ;愈合后梁式试件第 50 次加载时的劲度模量平均值作为愈合初始模量 S_2 ,疲劳寿命为 N_{INM2} 。同时,引入劲度模量恢复率和疲劳寿命恢复率对其进行评价。劲度模量恢复率的定义为愈合初始模量 S_2 和初始模量 S_1 的比值的百分数;同理,疲劳寿命恢复率则为愈合后疲劳寿命 N_{INM2} 和愈合前疲劳寿命 N_{INM1} 的比值的百分数。

2 自愈合影响因子分析

综合已有的研究基础,可以发现影响沥青混合料自愈合能力的内在因子主要有空隙率、沥青用量、沥青种类、级配类型等方面。因此,本节选用单一变量控制的方法,分别对空隙率(高、中、底)、沥青用量(3.8%,4.3%,4.8%,5.3%,5.8%)、沥青种类(70#,90#及 SBS)、级配类型(AC-13 和 AC-20)这 4 个方面进行研究分析,并通过灰关联分析方法,确定对沥青混合料自愈合能力影响的最显著因子。

2.1 空隙率

空隙率是沥青混合料配合比设计和检验的关键参数,也是影响沥青混合料路用性能的重要指标。研究和实践表明,随着空隙率的增大,其路面的耐久性变差,易发生水损害,进而造成路面的各种病害,导致疲劳寿命的降低。因此,有必要研究空隙率对沥青混合料自愈能力的影响。

通过改变压实次数,进而拟定3个不同的空隙率(高、中、低3个空隙率),以AC-13SBS改性沥青混合料作为研究对象,通过四点小梁弯曲疲劳试验,对材料进行疲劳-自愈-疲劳试验,试验条件:15℃,应变水平 $1\,000 \times 10^{-6}$,结束条件为20%,愈合时间为4h,愈合温度为60℃,具体试验结果见图1。

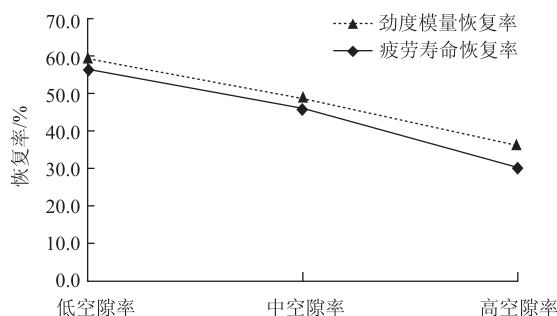


图1 不同空隙率下AC-13SBS改性沥青混合料四点小梁弯曲试验结果

Fig. 1 Four-point trabecular bending test result of AC-13SBS modified asphalt mixture with different air voids

由图1可知,空隙率对沥青混凝土的自愈能力有很大的影响,表现为负相关,且随着其空隙率的增大,其疲劳恢复率和劲度模量恢复率是不断降低的,说明了较大空隙率不利于其自愈能力。同时,当空隙率较大时,其下降幅度是大于空隙率较小时,表明高空隙率下,其疲劳恢复率很差,在工程实际中应避免设计较大空隙率的路面。

2.2 沥青用量

沥青用量不仅对混合料的路用性能有显著影响,同时还是控制经济性的一个重要指标。因此,系统研究沥青用量对沥青混合料自愈能力的影响十分必要。

拟定5个不同的沥青用量(最佳沥青用量 $4.8\% \pm 0.5\%$ 波动),以AC-13的SBS改性沥青混合料作为研究对象,通过四点小梁弯曲疲劳试验,对材料进行疲劳-自愈-疲劳试验,试验条件:15℃,

应变水平 $1\,000 \times 10^{-6}$,结束条件为20%,愈合时间为4h,愈合温度为60℃,具体试验结果见图2。

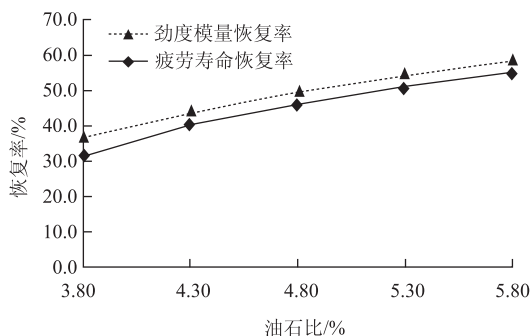


图2 不同油石比下AC-13SBS改性沥青混合料四点小梁弯曲试验结果

Fig. 2 Four-point trabecular bending test result of AC-13SBS modified asphalt mixture with different asphalt-aggregate ratios

由图2可知,沥青用量对沥青混凝土的自愈能力有较大的影响,且随着沥青用量的增大,其疲劳恢复率是不断升高的。当油石比从3.8%增长到5.8%时,其疲劳恢复率的增长幅度依次为27.1%,14.8%,9.9%和8.2%,说明了油石比越大,其自愈能力越强,但明显随着油石比的不断增大,其增长幅度逐渐降低。

2.3 沥青种类

沥青的种类有很多,按照针入度,可划分为50#,70#,90#等沥青;按照改性剂,可分为热塑性橡胶类、橡胶类、树脂类等。不同种类的沥青,其技术性质是有较大差异的,其流变性能和黏弹性能也是有较大的差别。考虑到沥青种类可能会对沥青混合料自愈能力有一定的影响,因此,本节对其进行研究。

拟定3个不同的AC-13沥青混合料类型(70#基质沥青混合料、90#基质沥青混合料、SBS改性沥青混合料),通过四点小梁弯曲疲劳试验,对材料进行疲劳-自愈-疲劳试验,试验条件:15℃,应变水平 $1\,000 \times 10^{-6}$,结束条件为20%,愈合时间为4h,愈合温度为60℃,具体试验结果见图3。

由图3可知,沥青种类对沥青混凝土的自愈能力也有很大的影响,且不同种类的沥青混合料,其自愈能力是不同的。SBS改性沥青混合料的自愈能力要强于基质沥青混合料,其疲劳恢复率对70#,90#沥青混合料分别为2.6倍和1.4倍。而不同

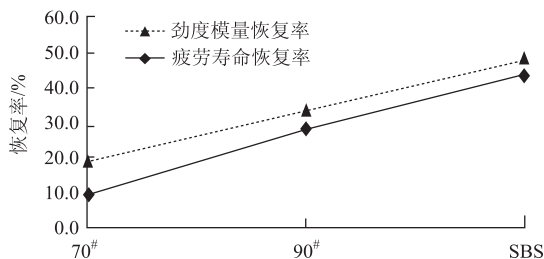


图3 不同沥青种类下 AC-13 沥青混合料四点小梁弯曲试验结果

Fig. 3 Four-point trabecular bending test result of AC-13 asphalt mixture with different kinds of asphalt

标号的沥青混合料,其自愈合能力是随着其标号的升高而增加的,90#沥青混合料的疲劳恢复率是70#基质沥青混合料的1.9倍。这说明了由于标号大的沥青,其流动能力更强,内部分子运动也更大,愈合能力也越强,导致其自愈合疲劳恢复率变大。

2.4 级配类型

一般来说,对于沥青混合料,按照设计要求和环境特点,选择一个适宜的级配组成是十分有必要的,也是研究沥青混合料的体积参数和路用性能的重要影响因素。一个合理的级配组成,可以保证其具有合理的空隙率和显著提高路面的使用性能。同时发现,以往的研究中,级配对沥青混合料自愈合能力的影响较少,因此对其进行研究。

拟定2种级配(AC-13和AC-20),以SBS改性沥青混合料作为研究对象,通过四点小梁弯曲疲劳试验,对材料进行疲劳-自愈合-疲劳试验,试验条件:15℃,应变水平 1000×10^{-6} ,结束条件为20%,愈合时间为4h,愈合温度为60℃。

由图4可知,级配也是沥青混凝土自愈合能力的一个影响因素,且随着最大公称粒径的增大,其疲劳恢复率不断降低,说明了级配较细的沥青混合料,其自愈合能力较好。但是其影响程度较小,由图4发现,级配由AC-13变为AC-20时,其疲劳恢复率仅降低了7.3%,说明级配不是最主要的影响因素。

2.5 灰关联分析

早在1982年,邓聚龙提出了灰关联分析方法,它是指系统在动态发展变化过程中,按照规范性、对称性、整体性和接近性,以空间理论的数学为基础,根据各因素变化曲线的几何形状相似程度,通过定量描述和比较的方法,进而判断因素之间关联

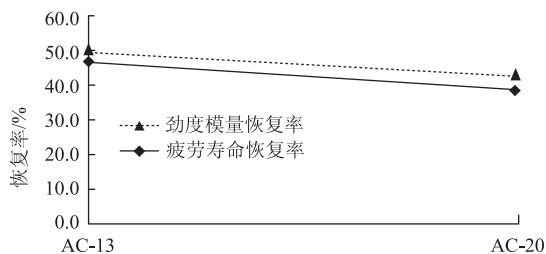


图4 不同级配下 SBS 改性沥青混合料四点小梁弯曲试验结果

Fig. 4 Four-point trabecular bending test result of SBS modified asphalt mixture with different gradations

程度并确定主要因素和次要因数的方法^[18]。

针对沥青混合料自愈合能力的影响因素,前文中介绍了内在因数空隙率、沥青用量、沥青种类及级配类型等对其的影响,因而有必要采用灰关联分析方法对其内在因数的主次进行研究。

2.5.1 灰关联分析方法

首先,确定参考数列和比较数列,其中参考数列是反映系统行为特征的数据序列,记为 $X_0 = \{X_0(j), j=1, 2, 3, \dots, n\}$;比较数列是影响系统行为的因数组成的数据序列,记为 $X_i = \{X_i(j), i=1, 2, 3, \dots, n\}$ 。然后,由于各因数水平的物理意义不同,因此对其进行无量纲化处理,主要采用标准化方法,参考数列和比较数列分别记为 $Y_0 = \{Y_0(j), j=1, 2, 3, \dots, n\}$ 和 $Y_i = \{Y_i(j), i=1, 2, 3, \dots, n\}$ 。其次,根据标准化处理的结果,计算参考数列和比较数列的灰色关联系数 $\xi_{0i}(k)$,按照式(1)计算。

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}}, \quad (1)$$

式中, $\Delta_{0i}(k)$ 为 k 时刻两个序列的绝对差,即 $\Delta_{0i}(k) = |Y_0(j) - Y_i(j)|$; $\Delta_{\max}$ 为各时刻的绝对差中的最大值,即 $\Delta_{\max} = \max |Y_0(j) - Y_i(j)|$; $\Delta_{\min}$ 为各时刻的绝对差中的最小值,即 $\Delta_{\min} = \min |Y_0(j) - Y_i(j)|$; ρ 为分辨系数。 $\rho \in (0, 1)$,一般情况取0.1~0.5,通常取0.5。最后,根据灰关联系数,计算灰关联度 r_{0i} 。关联度的计算可以用比较序列的各个时刻的灰关联系数的平均值计算。

2.5.2 自愈合影响因素的关联分析

按照灰关联分析方法,拟定疲劳恢复率作为参考数列,各影响因素空隙率、沥青用量、沥青种类、级配类型作为比较数列,具体的影响参数试验结果如表5所示。

表5 各影响因数下的四点小梁弯曲结果

Tab. 5 Four-point trabecular bending test result under different influence factors

试验序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
空隙率	高	中	低	高	中	低	高	中	低
沥青含量/%	3.8	4.8	5.8	3.8	4.8	5.8	3.8	4.8	5.8
沥青种类	70 [#]	90 [#]	SBS	90 [#]	SBS	70 [#]	SBS	70 [#]	90 [#]
级配类型	AC-13	AC-20	AC-13	AC-20	AC-13	AC-20	AC-13	AC-20	AC-13
疲劳恢复率/%	16.4	31.8	55	24.5	46.2	25.1	31.7	20.5	36.1

因此,参考数列为 $X_0 = \{16.4, 31.8, 55, 24.5, 46.2, 25.1, 31.7, 20.5, 36.1\}$; 空隙率作为比较数列 $X_1 = \{29.9, 46.2, 56.5, 29.9, 46.2, 56.5, 29.9, 46.2, 56.5\}$; 沥青用量作为比较数列 $X_2 = \{31.7, 46.2, 55, 31.7, 46.2, 55, 31.7, 46.2, 55\}$; 沥青种类作为比较数列 $X_3 = \{17.8, 33.4, 46.2, 33.4, 46.2, 17.8, 46.2, 17.8, 33.4\}$; 级配类型作为比较数列 $X_4 = \{46.2, 38.9, 46.2, 38.9, 46.2, 38.9, 46.2, 38.9, 46.2\}$, 然后其无量纲初值化结果如表6所示。

表6 无量纲初值化数据结果汇总

Tab. 6 Summary of dimensionless initialized data

Y_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Y_1(K)$	1.0	1.5	1.9	1.0	1.5	1.9	1.0	1.5	1.9
$Y_2(K)$	1.0	1.5	1.7	1.0	1.5	1.7	1.0	1.5	1.7
$Y_3(K)$	1.0	1.9	2.6	1.9	2.6	1.0	2.6	1.0	1.9
$Y_4(K)$	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0
$Y_0(K)$	1.0	1.9	3.4	1.5	2.8	1.5	1.9	1.3	2.2

进而,按照灰关联分析方法的计算方法,计算出关联系数,具体数据如表7所示。

表7 关联系数结果

Tab. 7 Correlation coefficient result

ξ_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\xi_{01}(k)$	1.000	0.753	0.450	0.708	0.485	0.770	0.563	0.803	0.794
$\xi_{02}(k)$	1.000	0.714	0.426	0.708	0.469	0.854	0.563	0.853	0.720
$\xi_{03}(k)$	1.000	0.950	0.613	0.758	0.844	0.693	0.644	0.828	0.787
$\xi_{04}(k)$	1.000	0.522	0.338	0.648	0.398	0.635	0.563	0.746	0.500

根据关联系数,即可得出各因数的关联度,具体结果见表8。

表8 关联度结果

Tab. 8 Correlation result

r_{01}	r_{02}	r_{03}	r_{04}
0.703	0.701	0.791	0.594

由表8可知, $r_{03} > r_{01} > r_{02} > r_{04}$ 。因此,各影响因数对沥青混合料的自愈合能力影响程度中,沥青种类的影响最大,空隙率影响次之,级配的影响最小。同时,根据灰关联理论可以发现,当分辨系数 $\rho = 0.5$ 时,若灰关联度大于 0.6 时,表明对参考因数的关联显著。所以,由表8可知,沥青种类对沥青混合料的自愈合能力的影响是最显著的,空隙率和沥青含量对自愈合能力的影响也很显著,但均小于沥青种类的影响水平,且空隙率和沥青含量的影响几乎相同。同时,级配类型的关联度略小于 0.6,表明对沥青混合料的自愈合能力影响不显著。

3 结论

(1) 沥青混合料的自愈合能力和空隙率成反比关系,即随着空隙率的增大,其疲劳寿命恢复率减小;而其自愈合能力与沥青用量成正比关系,即随着沥青用量的增大,其疲劳寿命恢复率增大。

(2) SBS 改性沥青混合料的自愈合能力是要比基质沥青混合料要好,且随着基质沥青标号的增大而增大;不同级配的沥青混合料,其疲劳恢复率也是不一样的,随着最大公称粒径的增大,其疲劳寿命恢复率减小。

(3) 通过灰关联分析发现:沥青种类对沥青混合料的自愈合能力的影响是最显著的,空隙率和沥青含量对自愈合能力的影响也很显著,但均小于沥青种类的影响水平,且空隙率和沥青含量的影响几乎相同。同时,级配类型的关联度略小于 0.6,表明其对沥青混合料的自愈合能力影响不显著。

参考文献:

References:

- [1] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
SHEN Jin-an. Road Performance of Asphalt and Asphalt

- Mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [2] 李诗琦, 李闯民, 陈桥. 一种新型沥青混合料添加剂改性沥青混合料的路用性能试验研究 [J]. 公路, 2017, 62 (1): 54-59.
LI Shi-qi, LI Chuang-min, CHEN Qiao. Test and Study of Pavement Performance for A New Type Asphalt Mixture Additives Modified Asphalt Mixture [J]. Highway, 2017, 62 (1): 54-59.
- [3] 崔新壮, 黄丹, 刘磊, 等. 沥青路面病害力学研究进展 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2016, 46 (5): 68-87.
CUI Xin-zhuang, HUANG Dan, LIU Lei, et al. A Review of Mechanics of Asphalt Pavement Disease [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science Edition, 2016, 46 (5): 68-87.
- [4] BAZIN P, SAUNIER J B. Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes [C] // Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Ann Arbor: CSA, 1967: 553-569.
- [5] SCHAPERY R A. On the Mechanics of Crack Closing and Bonding in Linear Viscoelastic Media [J]. International Journal of Fracture, 1989, 39 (1/2/3): 163-189.
- [6] WOOL R P, O'CONNOR K M. A Theory of Crack Healing in Polymers [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52 (10): 5953-5963.
- [7] CARPENTER S, SHEN H S. Dissipated Energy Approach to Study Hot-mix Asphalt Healing in Fatigue [J]. Transportation Research Board, 2006, 1970: 178-185.
- [8] SHEN S H, CHIU H M, HUANG H. Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22 (9): 846-852.
- [9] 徐辰. 沥青自愈合特性及影响因素研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
XU Chen. Study on Self-healing Characteristic of Asphalt and Influencing Factors [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [10] 何凡, 唐进, 刘全涛. 沥青砂浆的热诱导自愈合性能研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2016, 40 (4): 700-704.
HE Fan, TANG Jin, LIU Quan-tao. Thermally Activated Self-healing of Asphalt Mastic [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2016, 40 (4): 700-704.
- [11] 孙大权, 林添坂. 改性剂对沥青自愈合能力的影响 [J]. 公路, 2015, 60 (4): 224-228.
SUN Da-quan, LIN Tian-ban. Effect of Modifier on Self-healing Ability of Asphalt [J]. Highway, 2015, 60 (4): 224-228.
- [12] 黄卫东, 林鹏, 郑茂, 等. SBS 沥青混合料疲劳自愈合影响因素分析 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19 (5): 950-956.
HUANG Wei-dong, LIN Peng, ZHENG Mao, et al. Analysis of Factors Influencing Fatigue Self-healing Performance of SBS Modified Asphalt Mixture [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19 (5): 950-956.
- [13] 汤文, 资建民, 吕悦晶. 沥青自愈合行为的影响因素及评价方法 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20 (5): 814-819.
TANG Wen, ZI Jian-min, LÜ Yue-jing. Influential Factors and Evaluation Methods of Healing Behavior of Asphalt Binders [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20 (5): 814-819.
- [14] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].
JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [15] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].
JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [16] 王昊鹏. 自修复型导电沥青混凝土设计与评价 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
WANG Hao-peng. Design and Evaluation of Conductive Asphalt Concrete for Self-healing [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [17] ROWE U M, BOULDIN M U. Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures [C] // 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress. Barcelona: [s. n.], 2000.
- [18] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析: 多因素统计分析新方法 [J]. 统计研究, 1995, 12 (3): 46-48.
TAN Xue-rui, DENG Ju-long. Gray Relational Analysis: A New Method of Multi-factor Statistical Analysis [J]. Statistical Research, 1995, 12 (3): 46-48.