

辽宁省公路沥青结合料低温性能 设计参数研究

张敏江,韩梦迪

(沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 根据现行规范中给出的低温开裂预估模型,通过控制沥青结合料设计参数来控制沥青路面的低温开裂. 方法 根据辽宁省各地温度和湿度分布情况,利用K-均值聚类算法对辽宁省进行了路面使用性能气候分区,并依据现行规范中提出的沥青路面低温开裂模型,对五个气候分区的公路沥青混合料所需沥青的蠕变劲度进行研究. 结果 五个分区当中按照平均沥青蠕变劲度模量由小到大的顺序为Ⅱ区、Ⅰ区、Ⅳ区、Ⅲ区、Ⅴ区;温度变量对沥青路面低温开裂影响较大,平均每减少1℃,沥青蠕变劲度减少44.97 MPa;公路等级越高,沥青的蠕变劲度就越低;路基土对沥青低温性能要求从高至低排序为砂土、粉质黏土、黏土. 结论 在季节性冻土地区公路沥青路面设计中,选择沥青蠕变劲度满足当地气候、土基类型及路面等级设计要求的沥青结合料可有效地控制沥青路面低温开裂.

关键词 沥青路面;低温开裂;蠕变劲度;路面使用性能;土基类型

中图分类号 TU366.3

文献标志码 A

Study of the Design Parameters of Low Temperature Performance of Highway Asphalt in Liaoning Province

ZHANG Minjiang, HAN Mengdi

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: According to the low-temperature cracking prediction model given in the current specification, the asphalt pavement cold cracking was controlled by controlling the design parameters of the asphalt binder. According to the distribution of temperature and humidity in Liaoning Province, the K-means clustering algorithm was used to partition the pavement performance and climate in Liaoning province, based on the low temperature cracking model of asphalt pavement proposed in the current specification, the creep stiffness of asphalt mixture in five climatic zones of Liaoning province was studied. In the five zones, the order of the average creep modulus of asphalt creep from small to large is Zone II, Zone I, Zone IV, Zone III, Zone V; the temperature variation has a

收稿日期:2017-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51178278);辽宁省交通厅科技项目(201512)

作者简介:张敏江(1960—),男,教授,博士,主要从事路面结构工程等方面研究.

great influence on the low temperature cracking of asphalt pavement. For every 1 °C decrease, the creep stiffness of asphalt decreases by 44.97 MPa. The higher the highway grade, the lower the creep stiffness of the asphalt; Subgrade soil sorts asphalt cold, silty clay, and clay from low to high. In the design of highway asphalt pavement in seasonal frozen soil areas, the asphalt binder with the creep strength of asphalt meeting the local climate, soil type and pavement grade design requirements can effectively control the low temperature cracking of asphalt pavement.

Key words: asphalt pavement; low-temperature cracking; creep stiffness; pavement performance; subgrade type

沥青路面低温开裂是困扰国内外道路工程界的主要问题之一,路面出现温度裂缝后,水会通过裂缝进入路面结构^[1-3].一旦水分经过路表裂缝进入就会滞留在路面结构内部,削弱基层和路基的强度,加速路面损坏,降低行驶质量^[3-6].

沥青作为沥青混合料的主要组成部分,对沥青混合料的低温性能影响较大^[7].所以沥青的选择和评价依据非常重要.甚至有学者认为^[8-11],在沥青混合料的低温收缩和疲劳开裂中,沥青材料的低温抗裂性能起决定性作用.由此可知,可以通过提高沥青材料低温抗裂性能来减少沥青路面的温度裂缝.在沥青性能指标中沥青的针入度、延度、含蜡量等都与低温缩裂有关,但沥青的蠕变劲度是决定沥青路面是否开裂的最根本的因素^[12-17].

现行规范《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)较《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)新增了低温开裂预估模型,但低温开裂预估模型未给出影响沥青路面低温开裂的各因素敏感性分析,并且对沥青蠕变劲度的设计要求不够清晰.为解决上述问题,笔者针对辽宁省五个气候分区各级公路沥青路面所需沥青的蠕变劲度进行研究分析,计算出与之相对应所需沥青的蠕变劲度,以此指导辽宁省各级普通沥青路面沥青的选用.

1 辽宁省气候分区

道路作为一种线性结构,其必然会途经

具有不同气候特点的区域^[18].为了延长路面使用寿命,沥青混合料低温性能设计必须与道路所经过的区域气候环境相适应^[19],因此笔者首先对辽宁省所在区域进行气候分区.

沥青路面气候分区以分布各地的气象站台长期观测获得的气象数据为基础,通过K-均值聚类算法处理后依据不同分区指标、分区方案和分区方法进行区域划分.K-均值聚类算法是以k为参数,把N个数据对象分成k个簇,使得簇内数据对象之间具有较高的相似度,而簇间的相似度较低.相似度的计算根据一个簇中所有对象的平均值即簇的质心来进行,使其不断向质心方向减小^[20].

K-均值聚类算法的过程描述如下:

- (1)随机选取k个数据对象作为初始簇的质心;
- (2)根据计算对象与各个簇的质心的距离,将对象分配到距离其最近的质心所代表的簇;
- (3)重新计算各个簇的数据对象的平均值(均值计算见式(1)),即质心:

$$\bar{x}_i = \sum_{x \in C_i} \frac{x}{|C_i|} \tag{1}$$

式中: \bar{x}_i 为簇 C_i 的平均值; x 为空间中的点.

- (4)若每个簇的质心都不再变化,或者指定的收敛准则已经得到满足,则返回划分结果;否则转步骤(2)继续重复迭代,收敛准则函数见式(2):

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |x - \bar{x}_i|^2.$$

(2)

式中: E 为所有对象的平方误差的总和.

将辽宁省各市縣温度指标、降雨指标等帶入式(1)与式(2)中,输出各市縣聚类及距质心距离,并且在充分考虑各因素后,根据地理位置进行微调,将辽宁省沥青混凝土路面使用性能分为 5 个区:Ⅰ区—东南部近河海低山丘陵区、Ⅱ区—东部低温多雨山区、Ⅲ区—中部沿河平原区、Ⅳ区—西部少雨干旱丘陵区、Ⅴ区—南部沿海多雨山丘区. 分区情况如图 1 所示. 各区域温度指标数值分布情况见表 1,表中 $t_{I \max} \sim t_{V \max}$ 表示Ⅰ区~Ⅴ区温度最大值, $t_{I \min} \sim t_{V \min}$ 表示Ⅰ区~Ⅴ区温度最小值.

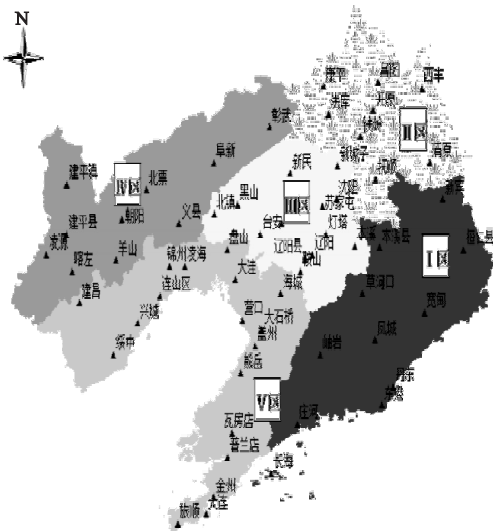


图 1 辽宁省沥青路面气候分区图

Fig. 1 Climatic zoning map of asphalt pavement in Liaoning

表 1 温度指标

Table 1 Temperature index

℃

温度指标	$t_{I \max}$	$t_{I \min}$	$t_{II \max}$	$t_{II \min}$	$t_{III \max}$	$t_{III \min}$	$t_{IV \max}$	$t_{IV \min}$	$t_{V \max}$	$t_{V \min}$
最大值	37.6	-18.4	39.0	-31.6	37.9	-25.6	41.3	-25.5	39.3	-18.0
最小值	33.4	-38.3	36.4	-43.4	35.9	-35.4	37.2	-36.3	33.5	-31.9
平均值	35.5	-28.4	37.7	-37.5	36.9	-30.5	39.3	-30.9	36.4	-25.0

2 辽宁省不同自然区土基类型

研究表明,沥青路面低温开裂情况与土基类型和湿度状况相关,为此笔者对辽宁省不同自然气候区路基土的性质和分布情况进行了分析.

总体来看,辽宁省全部地区可分为东部山地丘陵、西部山地丘陵、中部平原三部分. 山地丘陵分列于东西两侧,向中部平原倾斜. 总体地势呈现东、西部高,中部低;北高南低,从陆地向海洋倾斜的特征. 因此,辽宁省各地工程地质条件差异较大,地貌特征、岩土类型、土体强度、潮湿系数等存在明显区别. 为了和以上的气候分区保持一致性,现按照以上各个气候分区情况,将各区路基土的主要分布类型和特点介绍如下.

Ⅰ区:该区域降水量非常大,累年极端年

降水量高达 1 765.5 mm. 该区的土质多为粉质黏土,而在沿河地带存在经物理风化破碎的砂土. 故路基按粉质黏土和砂土考虑.

Ⅱ区:该区域冬季温度极低,累年极端最低气温已到 -43.4℃,春夏季多雨. 山区公路存在较多残积土(一般按砂土考虑). 故路基土按砂土考虑.

Ⅲ区:中部平原降水量比较适中,年平均在 600 mm 左右. 该区的土质多为砂土,在部分平原等开阔地带公路存在粉质黏土路基. 故路基土按砂土和粉质黏土考虑.

Ⅳ区:西部山地丘陵区与内蒙古高原相连,年降水量在 400 mm 左右,是全省降水最少的地区. 故路基土按砂土考虑.

Ⅴ区:该地区夏季温度较高,降雨量较大,累年极端年降水量高达 1 132.5 mm. 故路基土按黏土和粉质黏土考虑.

3 沥青路面低温开裂指数敏感性分析

3.1 开裂模型

影响沥青路面低温开裂的因素众多. 根据现行规范《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中给出的低温开裂预估模型,可知路面低温设计温度、沥青的蠕变劲度、沥青混合料厚度和路基类型均对沥青路面低温开裂起着重要作用. 通过对影响沥青路面低温开裂的因素进行敏感性分析,以便供路面设计参考.

沥青路面的低温开裂预估模型见式(3):

$$CI = 1.95 \times 10^{-3} S_t \lg b - 0.075 (t + 0.07 h_a) \lg S_t + 0.15. \tag{3}$$

式中: CI 为沥青路面低温开裂指数; t 为路面低温设计温度, $^{\circ}\text{C}$, 为连续 10 年年最低气温平均值; S_t 为在路面低温设计温度加 10°C 试验温度条件下, 表面层沥青弯曲梁流变试验加载 180 s 时蠕变劲度, MPa ; h_a 为沥青混合料层厚度, mm ; b 为路基类型参数, 砂 $b = 5$, 粉质黏土 $b = 3$, 黏土 $b = 2$.

3.2 敏感性分析

为了分析各因素对沥青路面低温开裂影响的敏感性, 分别确定除路基土类型以外各计算参数 5 种取值水平. 当分析某一参数的影响时, 保持其他 3 个参数不变. 当考虑路面低温设计温度的变化对低温开裂指数 CI 的影响时, 假定沥青混合料的沥青蠕变劲度为 100 MPa , 沥青路面面层为 3 cm 改性沥青(橡胶沥青)混合料 + 4 cm 普通沥青(高模量)混合料, 路基土类型为粉质黏土; 当考虑沥青蠕变劲度的变化对低温开裂指数 CI 的影响时, 假定路面低温设计温度为 -25°C , 沥青路面面层为 3 cm 改性沥青(橡胶沥青)混合料 + 4 cm 普通沥青(高模量)混合料, 路基土类型为粉质黏土; 当考虑沥青混合料层厚度的变化对低温开裂指数 CI 的影响时, 假定路面低温设计温度为 -25°C , 沥青混合料

的沥青蠕变劲度为 100 MPa , 路基土类型为粉质黏土; 当考虑路基土类型的不同对低温开裂指数 CI 的影响时, 假定路面低温设计温度为 -25°C , 沥青混合料的沥青蠕变劲度为 100 MPa , 沥青路面面层为 3 cm 改性沥青(橡胶沥青)混合料 + 4 cm 普通沥青(高模量)混合料.

绘制各参数的变化对 CI 变化的影响曲线, 结果见图 2 ~ 图 5.

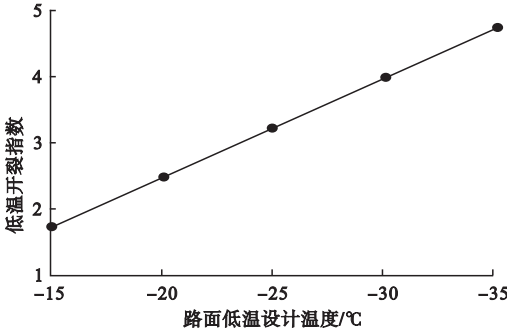


图 2 路面低温设计温度的变化对 CI 的影响
Fig. 2 Influence of low temperature design temperature of pavement on CI

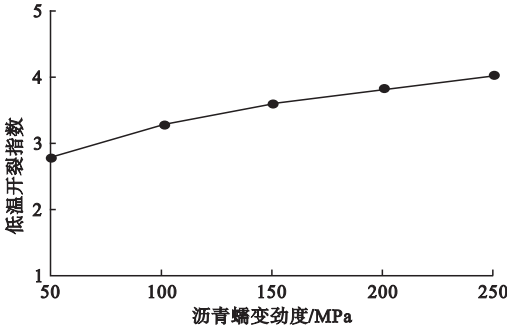


图 3 沥青蠕变劲度的变化对 CI 的影响
Fig. 3 Influence of asphalt creep stiffness on CI

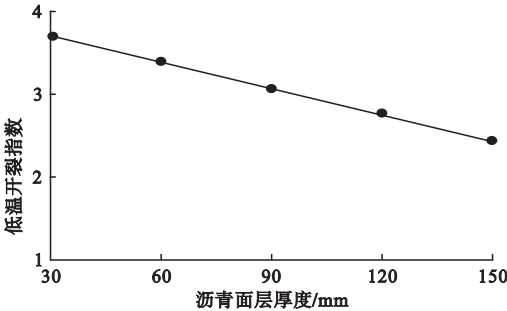


图 4 沥青混合料层厚度的变化对 CI 的影响
Fig. 4 Influence of asphalt mixture layer thickness on CI

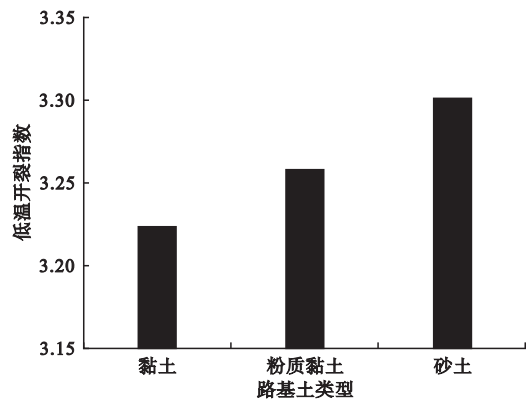


图5 路基土类型的不同对CI的影响

Fig.5 Influence of different types of subgrade soil on CI

由图2~图5可知:

(1)在其他条件相同的情况下,路面低温设计温度越低,低温开裂指数CI越大,沥青路面温缩裂缝越多.温度每降低1℃,CI增大0.15.CI与路面低温设计温度 t 呈线性关系.温度的变化对低温开裂指数影响较大,CI对温度敏感性较高.

(2)在其他条件相同的情况下,沥青蠕变劲度增大,低温开裂指数CI随之增大.且随着沥青蠕变劲度的增加,CI增加的速度逐渐变慢.CI与沥青蠕变劲度 S_t 呈非线性关系.相较路面低温设计温度的变化对低温开裂指数的影响,沥青蠕变劲度的增加对低温开裂指数增加略缓慢.

(3)在其他条件相同的情况下,沥青面层越薄,低温开裂指数CI越大,沥青路面温缩裂缝越多.沥青混合料层厚度每增加30mm,CI减少0.32.CI与沥青混合料层厚度 h_a 呈线性负增长关系.沥青混合料层厚度对低温开裂指数影响较大,对低温开裂指数CI敏感性较高.

(4)在其他条件相同的情况下,黏土路

基的沥青路面低温开裂指数CI最小,其次为粉质黏土路基的沥青路面,低温开裂指数最大的是砂土路基的沥青路面.由图5可知路基土类型的变化对低温开裂指数CI影响较小,CI对路基类型敏感性较低.

4 基于低温开裂模型的沥青蠕变劲度研究

笔者根据现行规范,利用式(3)中给出的低温开裂预估模型和表2给出的不同等级公路低温开裂指数的要求,同时根据辽宁省5个自然气候区温度参数和土基类型参数,反算沥青的劲度模量.低温开裂指数CI为竣工验收时100m调查单元内横向裂缝条数,贯穿全幅的裂缝按1条计,未贯穿且长度超过一个车道宽度的裂缝按0.5条计,不超过一个车道宽度的裂缝不计入.

表2 低温开裂指数

Table 2 Low temperature cracking index requirement

公路等级	低温开裂指数 CI
高速、一级公路	≤3
二级公路	≤5
三级、四级公路	≤7

按照辽宁省不同等级公路沥青路面厚度设计范围,高速公路和一级公路沥青混合料面层厚度按15~20cm考虑,二级公路沥青混合料面层厚度按7~15cm考虑,三四级公路面层厚度按3~7cm考虑.

由式(3)可计算得到各分区不同等级公路沥青路面所要达到的沥青蠕变劲度数值范围,结果见表3~表7.图6为由以上表中数据绘制的辽宁省各分区及不同等级公路对沥青蠕变劲度要求的变化规律图.

表3 I区沥青蠕变劲度要求

Table 3 Requirements for creep modulus of asphalt in I Zone MPa

路基土类别	高速、一级公路蠕变劲度	二级公路蠕变劲度	三级、四级公路蠕变劲度
砂土	22.6~34.6	78.3~165.3	249.9~350.3
粉质黏土	22.7~35.2	80.6~176.7	269.8~389.2

表 4 II 区沥青蠕变劲度要求

Table 4 Requirements for creep modulus of asphalt in II Zone				MPa
路基土类别	高速、一级公路蠕变劲度	二级公路蠕变劲度	三级、四级公路蠕变劲度	
砂土	14.1 ~ 19.2	45.6 ~ 83.2	141.1 ~ 191.4	

表 5 III 区沥青蠕变劲度要求

Table 5 Requirements for creep modulus of asphalt in III Zone				MPa
路基土类别	高速、一级公路蠕变劲度	二级公路蠕变劲度	三级、四级公路蠕变劲度	
砂土	31.9 ~ 53.8	113.0 ~ 256.9	354.4 ~ 498.4	
粉质黏土	32.4 ~ 55.5	118.1 ~ 285.2	394.4 ~ 575.9	

表 6 IV 区沥青蠕变劲度要求

Table 6 Requirements for creep modulus of asphalt in IV Zone				MPa
路基土类别	高速、一级公路蠕变劲度	二级公路蠕变劲度	三级、四级公路蠕变劲度	
砂土	28.4 ~ 46.4	100.0 ~ 223.4	317.6 ~ 446.8	

表 7 V 区沥青蠕变劲度要求

Table 7 Requirements for creep modulus of asphalt in V Zone				MPa
路基土类别	高速、一级公路蠕变劲度	二级公路蠕变劲度	三级、四级公路蠕变劲度	
粉质黏土	55.5 ~ 111.2	200.9 ~ 523.2	633.1 ~ 916.3	
黏土	56.9 ~ 117.9	215.2 ~ 623.1	741.7 ~ 1 133.1	

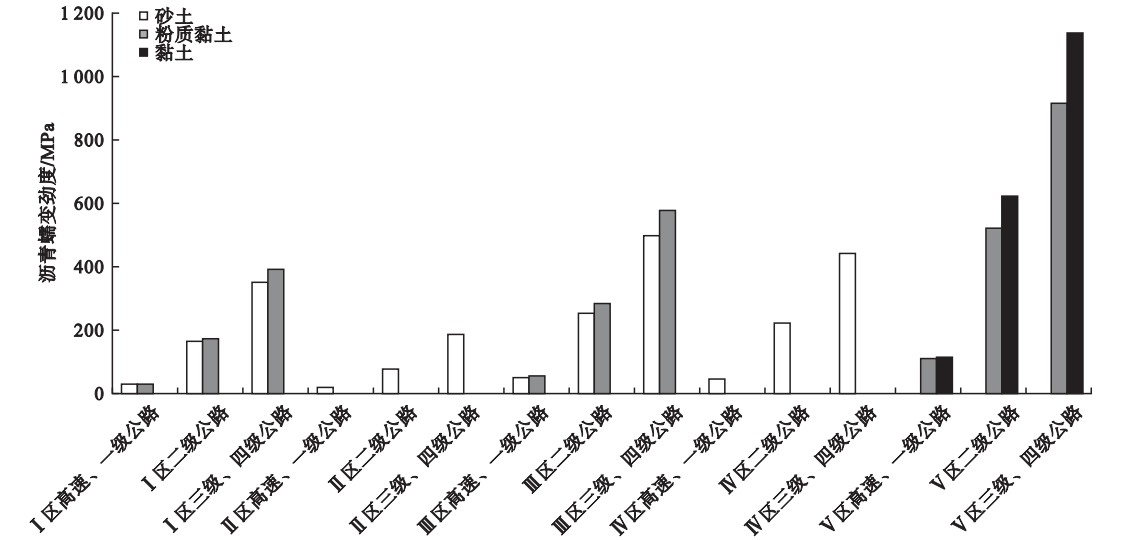


图 6 辽宁省各分区各级公路沥青路面沥青蠕变劲度要求变化规律

Fig. 6 Variation law of asphalt creep modulus of highway asphalt pavement in different districts in Liaoning province

(1)不同分区对沥青蠕变劲度要求的影响分析. 五个分区当中,对沥青的蠕变劲度要求差别较大,在不考虑公路等级和土基类型变化的情况下,以平均劲度模量为衡量标准,按照平均劲度模量由小到大的顺序:II 区平均劲度模量为 97.93 MPa; I 区平均劲度模量为 191.88 MPa; IV 区平均劲度模量为 238.87 MPa; III 区平均劲度模量为 287.62 MPa; V 区平均劲度模量为 570.80 MPa.

由表1给出的各区最低温度(Ⅱ区为 $-43.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、Ⅰ区为 $-38.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、Ⅳ区为 $-36.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、Ⅲ区为 $-35.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、Ⅴ区为 $-31.9\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及表3~表7给出的各区劲度模量的要求可知,各区的最低温度对沥青路面低温开裂起到至关重要的作用,沥青路面所在区域的温度越低,沥青的蠕变劲度越小。

同种路基土情况下,温度由 $-35.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-36.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,每降低 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 沥青蠕变劲度平均减少 1.27% ;温度由 $-36.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-38.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,每降低 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 沥青蠕变劲度平均减少 1.16% ;温度由 $-38.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-43.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,每降低 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 沥青蠕变劲度平均减少 0.91% 。可知随着温度不断变低,沥青蠕变劲度减少的速度在逐渐变慢。环境温度平均每降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,沥青蠕变劲度减少 44.97 MPa 。

(2)公路等级对沥青蠕变劲度模量要求的影响分析。在同一个区内(以Ⅱ区为例),不同等级公路沥青路面对沥青蠕变模量要求差别较大。高速、一级公路要求沥青蠕变劲度不高于 19.2 MPa ;二级公路要求沥青蠕变劲度不高于 83.2 MPa ;三、四级公路要求沥青蠕变劲度不高于 191.4 MPa 。三、四级公路要求的沥青蠕变劲度降低到 43.6% 才可满足二级公路对沥青蠕变劲度的要求,二级公路要求的沥青蠕变劲度降低到 23.1% 才可满足对高速、一级公路对沥青蠕变劲度的要求。

(3)路基土类型对沥青蠕变劲度模量要求的影响分析。在同一区内,不同路基类型下,按照沥青蠕变劲度由小到大排序:砂土、粉质黏土、黏土。砂土路基对沥青蠕变劲度数值比粉质黏土路基对沥青蠕变劲度数值平均减少 10.1% ,粉质黏土路基的沥青蠕变劲度比黏土路基对沥青蠕变劲度平均减少 17.3% 。

可见,在相同温度和相同公路等级情况下,砂性土路基沥青路面低温开裂较粉质黏土路基沥青路面低温开裂严重,粉质黏土路

基沥青路面低温开裂较黏土路基沥青路面低温开裂严重。由此可知路基土颗粒越大,路面表面越粗糙,对沥青的低温性能要求越高。

5 结 论

(1)温度变量对沥青路面低温开裂影响较大,温度越低沥青路面要求沥青蠕变劲度越小,并且随着温度下降沥青蠕变劲度减小的速度也在不断减小。平均每减少 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,沥青蠕变劲度减少 44.97 MPa 。

(2)公路等级越高,对沥青的低温性能要求越高,沥青的蠕变劲度就越低。高速、一级公路的沥青蠕变劲度是二级公路沥青蠕变劲度要求的 21.7% ,二级公路的沥青蠕变劲度是三、四级公路沥青蠕变劲度要求的 46.3% 。

(3)砂土路基对沥青低温性能要求高于粉质黏土路基,粉质黏土路基对沥青低温性能的要求高于黏土路基。

参考文献

- [1] LI Xinjun, MARASTEANU M O, ANDREA K, et al. Factors study in low-temperature fracture resistance of asphalt concrete[J]. Journal of materials in civil engineering, 2010, 22(22): 145-152.
- [2] 李晓娟, 韩森, 李渊, 等. 沥青结合料低温抗裂性指标试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 81-84.
(LI Xiaojuan, HAN Sen, LI Yuan, et al. Experimental study on low temperature crack resistance index of asphalt binder[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2010, 32(7): 81-84)
- [3] 黄志军, 赖远明, 李双洋, 等. 交通荷载作用下冻土路基动力响应分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 418-426.
(HUANG Zhijun, LAI Yuanming, LI Shuangyang, et al. Dynamic response analysis of frozen soil subgrade under traffic load[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2012, 34(2): 418-426.)
- [4] CEMI G, CARDONE F, COLAGRANDE S. Low-temperature tensile behaviour of asphalt binders: application of loading time-temperature-conditioning time superposition principle[J]. Construction and building materials, 2011, 25(4): 2133-2145.

- [5] 周雪艳,马磊,田宇翔,等. 青藏高寒地区沥青混合料低温抗裂性能的灰关联分析[J]. 江苏大学学报,2016,37(5):597-603.
(ZHOU Xueyan, MA Biao, TIAN Yuxiang, et al. Analysis on ash correlation of low temperature cracking resistance of asphalt mixture in high cold area of Qinghai-Tibet[J]. Journal of Jiangsu university,2016,37(5):597-603)
- [6] 李晓娟,韩森,贾志清,等. 基于抗裂性能的沥青混合料低温弯曲蠕变试验[J]. 广西大学学报,2011,36(1):142-146.
(LI Xiaojuan, HAN Sen, JIA Zhiqing, et al. Low temperature bending creep test of asphalt mixture based on cracking resistance[J]. Journal of Guangxi university,2011,36(1):142-146.)
- [7] 陈俊青. 基于低温性能的沥青路面应用技术研究[D]. 西安:长安大学,2013.
(CHEN Junqing. Research on application technology of asphalt pavement based on low temperature performance[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.)
- [8] PIRMOHAMMAD S, AYATOLLAHI M R. Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions[J]. Construction and building materials, 2014,53(28):235-242.
- [9] 顾明达. 沥青与沥青混合料低温性能评价方法的研究[D]. 济南:山东建筑大学,2017.
(GU Mingda. Research on the low temperature performance evaluation method for asphalt and asphalt mixtures[D]. Ji nan:Shandong Jianzhu University,2017.)
- [10] LI X J, MARASTEANU M O. Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete[J]. Experimental mechanics,2010,50:867-876.
- [11] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
(YAO Zukang. Asphalt pavement structure design [M]. Beijing: People Communications Press,2011.)
- [12] MARCIN G, PIERRE-ALAIN L. Prediction of asphalt concrete low-temperature cracking resistance on the basis of different constitutive models[J]. Procedia engineering, 2014, 91: 81-86.
- [13] 曹宇. 沥青混合料低温抗裂性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
(CAO Yu. Research on low temperature cracking resistance of asphalt mixture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.)
- [14] 季节,武昊,索智,等. THFS 对沥青感温性能的影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(3):475-482.
(JI Jie, WU Hao, SUO Zhi, et al. Analysis of the influence of THFS on the temperature sensibility of asphalt [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(3):475-482.)
- [15] AMERI M, MANSOURIAN A, PIRMOHAMMAD S, et al. Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures[J]. Engineering fracture mechanics,2012,93:153-167.
- [16] 孙立军. 沥青路面结构行为学[M]. 上海:同济大学出版社,2013.
(SUN Lijun. Behavior of asphalt pavement structure [M]. Shanghai: Tongji University Press,2013.)
- [17] 梅朔华. 循环低温环境下沥青路面温度应力分析[D]. 杭州:浙江大学,2016.
(MEI Shuohua. Analysis of temperature stress of asphalt pavement under cyclic low temperature environment [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2016.)
- [18] RAZMI A, MIRSAYAR M M. Fracture resistance of asphalt concrete modified with crumb rubber at low temperatures [J]. International journal of pavement research and technology, 2018,11(3):265-273.
- [19] TAN Y, ZHANG L, XU H. Evaluation of low-temperature performance of asphalt paving mixtures[J]. Cold regions science and technology,2012,70:107-112.
- [20] 张敏江,董是. 公路沥青混凝土路面使用性能综合分区技术的研究[J]. 公路,2014,8:85-91.
(ZHANG Minjiang, DONG Shi. Research on comprehensive zoning technology of service performance of highway asphalt concrete pavement[J]. Highway,2014,8:85-91)