

文章编号:1671-8879(2015)04-0020-07

# 基于一次二阶矩的冻融作用下沥青 路面性能可靠度分析

石福周<sup>1,2</sup>, 司 伟<sup>1</sup>, 马 翥<sup>1</sup>, 格桑泽仁<sup>3</sup>

(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. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 西藏自治区交通科学研究所, 西藏 拉萨 850000)

**摘 要:**温度裂缝与水损坏是寒冷地区沥青路面常见的病害形式,对路面性能有重要影响。通过冻融循环试验模拟,分析了温度与水分冻融环境对沥青混合料性能的影响;基于沥青路面结构可靠度方程,通过考虑影响因素不确定性,采用一次二阶矩法求解路面结构强度可靠度功能函数,对沥青路面结构的可靠性展开研究。研究表明:沥青混合料的抗压回弹模量随冻融循环作用次数的增加呈减小趋势;路面结构可靠度随冻融循环次数的增加也呈降低趋势,冻融循环作用对路面结构的可靠度有显著影响;冻融循环变异系数取值对路面结构可靠度也有一定影响;在实际工程分析中应重视外界环境的影响。

**关键词:**道路工程;冻融循环;可靠度分析;一次二阶矩法;沥青混合料

**中图分类号:**U414.75 **文献标志码:**A

## Applying first order second moment to solve the reliability of asphalt pavement performance under freeze-thaw impacts

SHI Fu-zhou<sup>1,2</sup>, SI Wei<sup>1</sup>, MA Biao<sup>1</sup>, GE-SANG Ze-ren<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Institute of Traffic Science of Traffic Bureau of Tibet, Lhasa 850000, Tibet, China)

**Abstract:** Thermal cracks and moisture distresses are principal distress forms of asphalt pavement in cold regions, which have a significant impact on asphalt pavement performance. In this paper, freeze-thaw (F-T) cycle test was used to simulate and analyze the impact of environment temperature and moisture on asphalt mixture performance. Based on the asphalt pavement reliability function and the uncertainties of influencing factor the first order second moment (FOSM) method was employed to solve the performance function of the pavement structural strength and reliability and the research on the asphalt pavement reliability was carried out. Analytical results show that the resilient modulus of asphalt concrete mixture declines with the increase of F-T cycle. F-T cycle has a significant impact on estimating reliability, which declines with the increase of F-T cycle. Besides, the value of variation coefficient of freeze-thaw cycle also

收稿日期:2015-01-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51310105029);交通运输部西部交通建设科技项目(2012 318 792 10);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G5210002)

作者简介:石福周(1973-),男,甘肃白银人,高级工程师,长安大学工学博士,在站博士后,E-mail:sfz562236220@163.com。

has some influence on the reliability of pavement structure. As a result, environment and other influence factors should not be neglected in the practical engineering analysis. 2 tabs, 4 figs, 19 refs.

**Key words:** road engineering; freeze-thaw cycle; reliability method; first order second moment; asphalt mixture

0 引言

公路沿线外界环境复杂多变,路面结构直接承受气候、环境、温度、地质及行车荷载作用。已有研究表明,路面性能除了受行车荷载作用外,所处的外界环境条件也有显著影响,甚至大于行车荷载作用<sup>[1-3]</sup>。青藏高原寒冷地区年平均气温低、昼夜温差大、降温速率快、冻融循环频繁剧烈,多种不利条件对沥青混合料力学性能、耐久性等有明显影响;沥青路面病害与沥青混合料在特殊环境下的性能衰变相关<sup>[4]</sup>。低温开裂与温度疲劳裂缝是寒冷地区沥青路面温度裂缝的 2 种主要形式<sup>[1-5]</sup>。沥青路面在水环境中,在车轮荷载作用下将产生动水压力及真空负压抽吸作用,导致沥青面层混合料剥落、孔隙变大,从而加速路面性能与承载能力的衰减<sup>[3-5]</sup>。温度和水分是影响沥青路面性能最主要的 2 个气候环境因素<sup>[1-4]</sup>。关于温度与水分对寒冷地区沥青路面性能的影响虽然开展了广泛的探索研究,然而至今仍没有统一的评价方法与指标。

可靠性是指系统在规定的条件和规定的时间内完成预定功能的能力<sup>[6-7]</sup>。沥青路面的可靠度功能函数方程可以定义为与设计荷载作用次数的差异。在可靠度模型中,路面结构的强度可以定义为,道路在失效前能承受的荷载作用次数;而应力可以定义为相应的荷载作用次数<sup>[6]</sup>。如果对于道路失效有明确的定义,就可以利用可靠度方法预测道路性能以及使用寿命的变化<sup>[8]</sup>。可靠度分析中,功能函数的求解成为最棘手的难题,由于大多功能函数方程为多元、多维积分方程,利用常规数值方法很难求解,在实际工程中广泛采用近似概率仿真方法求解可靠度。为此,本文基于冻融循环试验方法模拟温度与水分对沥青混合料性能的影响,然后采用可靠度分析方法,通过 AASHTO 设计方程,引入影响参数的不确定性,分析冻融循环作用对沥青路面结构性能的影响。可以将冻融循环作用对沥青路面结构性能的影响转变为对沥青路面结构性能的影响,克服了现有研究将外界环境因素与路面设计指标和沥青路面性能之间相互结合较少的不足,以及目前大多研究只考虑行车荷载而忽视了外界气候环境影响的不足,并且还可以考虑外界环境变化的不确定性影响。本文利用一次二阶矩法

对功能函数进行求解,研究结果可为完善寒冷地区沥青路面设计参数取值提供依据。

1 试验材料与可靠度分析方法

1.1 试验原材料与冻融循环试验

试验采用青藏高原寒冷地区常用的 SBR 成品改性沥青,其性能技术指标见表 1。集料取自青藏高原公路沿线料场,以石灰岩为主,矿粉为石灰岩矿粉。试验沥青混合料为 AC-13,级配组成采用《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)推荐中值。在标准马歇尔试验的基础上,兼顾西藏地区特殊的气候条件与交通状况,确定了 SBR 改性 AC-13 沥青混合料的最佳油石比为 5.5%。

在参考国内外相关冻融循环试验条件的基础上,依据青藏公路实际条件自行制定冻融循环试验方法。青藏公路沿线气象资料表明,年平均最低气温为-14.5℃~-17.4℃,年平均最高气温为6.8℃~8.1℃;5~8月有较短的正温环境;昼夜温差可达23℃~26℃<sup>[9]</sup>。为此,本文提出的冻融循环试验,冻结时利用塑料袋将试件密封,并在塑料袋中注水 30 mL,冻结温度-25±1℃,冻结时间 12 h;融化时将试件直接放入恒温水浴,融化温度 25±1℃,融化时间 12 h;利用低温冷冻箱与恒温水浴模拟冻融作用。采用静压法成型混合料试件,用电子万能试验机进行试验,计算机自动采集数据,温度控制装置为环境箱,温控精度±0.1℃,试验温度为 15℃,加载速率为 2 mm/min。

表 1 沥青技术指标试验结果  
Tab. 1 Test results of asphalt parameters

沥青状态	试验项目		试验结果
原样	针入度/0.1 mm	15℃	51.0
		25℃	123.1
	软化点(R&B)/℃		47.6
	延度(5℃)/cm		>150
	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		1.023
	闪点/℃		>260
	溶解度/%		99.6
RTOFT 老化后	质量损失/%		0.2
	残留针入度比/%	15℃	65.3
		25℃	58.1
	延度(5℃)/cm		>150

## 1.2 一次二阶矩求解可靠度

应力-强度模型是可靠度分析中最常见也是应用最广泛的模型,该模型通过比较,被定义为采用随机变量的应力(或荷载)与强度评价其系统的可靠度;当应力水平超过其强度水平时,说明该系统失效<sup>[8,10-11]</sup>。应力(stress)通常也称为载荷,强度(strength)称为抗力,其功能函数可表示为  $Z = g(x)$ 。当  $\{g(x) < 0\}$  表示其功能函数失效;  $\{g(x) > 0\}$  表示功能函数安全可靠;当  $\{g(x) = 0\}$  表示功能函数处于安全与失效的零界状态<sup>[10-11]</sup>。功能函数中的  $x$  为  $n$  个基本随机变量  $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_n]^T$ ,并假设这  $n$  个随机变量相互独立,其均值为  $\mu_{x_i}$ ,标准差为  $\delta_{x_i}$ 。

图 1 为典型的应力-强度模型示意图,可以看出,可靠度失效发生在应力与强度的重叠区域,该区域面积与其失效概率成正比。失效概率可以表示为  $n$  维的概率积分方程,如式(1),失效区域的概率是工程系统在其期望条件下运行而失效的估计值<sup>[10-11]</sup>,有

$$P_F = \text{prob}[g(x) \leq 0] = \int_{g(x) \leq 0} f(x) d\mathbf{X} \quad (1)$$

式中:  $f(x)$  是随机变量  $\mathbf{X}$  的联合概率密度函数;  $\text{prob}(\cdot)$  为概率函数。

可靠度计算时首先须知道应力和强度的分布特征,然而在工程实际中要得到准确的应力和强度分布比较困难。目前大多数可靠度研究时都假设各变量服从正态分布,然后将应力或强度方程转化为线性方程,利用正态分布的线性组合仍服从正态分布的特性,得到应力或强度方程的分布特征,这为可靠度计算带来诸多不便<sup>[10-11]</sup>。针对这种情况,在实际工程中广泛采用近似概率仿真方法计算可靠度,其中一次二阶矩(first order second moment, FOSM)方法在结构、机械可靠性分析中得到广泛应用<sup>[10-11]</sup>。经过近几十年的发展已成为世界各国结构安全标准与规范的基础。

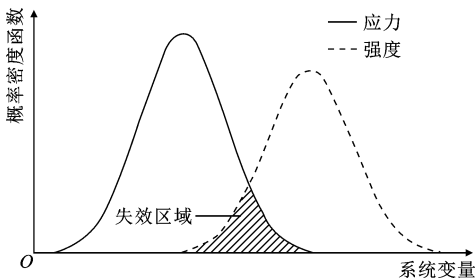


图 1 失效区域概率

Fig. 1 Probability of failure region

一次二阶矩法是一种在随机变量分布尚不清楚时,只利用均值与标准差的数学模型解决可靠度的方法<sup>[10-11]</sup>。该方法一般将功能函数  $Z = g(x)$  在某点用泰勒级数展开,使之线性化然后求解。

对于方程  $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$  关于点  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  的泰勒展开式为

$$\begin{aligned} g(x_1, x_2, \dots, x_n) = & g(a_1, a_2, \dots, a_n) + \\ & g_{x_1}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_1 - a_1) + \\ & g_{x_2}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_2 - a_2) + \dots + \\ & g_{x_n}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_n - a_n) + \\ & 1/2[g_{x_1 x_1}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_1 - a_1)^2 + \\ & g_{x_2 x_2}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_2 - a_2)^2 + \dots + \\ & g_{x_n x_n}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_n - a_n)^2] + \\ & 2g_{x_1 x_2}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_1 - a_1)(x_2 - a_2) + \\ & \dots + 2g_{x_{n-1} x_n}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_{n-1} - a_{n-1}) \cdot \\ & (x_n - a_n) + \dots \end{aligned}$$

式中:  $g(x)$  的下标  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的偏微分。

利用泰勒级数展开后忽略二次及以上的展开式,使之线性化。由于随机变量  $x$  相互独立,则功能函数在平均值处的一次项展开式为

$$\begin{aligned} g(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx & g(a_1, a_2, \dots, a_n) + \\ & g_{x_1}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_1 - a_1) + \\ & g_{x_2}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_2 - a_2) + \dots + \\ & g_{x_n}(a_1, a_2, \dots, a_n)(x_n - a_n) = \\ & g(\mu_{a_1}, \mu_{a_2}, \dots, \mu_{a_n}) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_{\mu} (x_i - \mu_{a_i}) \end{aligned}$$

因此,功能函数  $Z = g(x)$  的平均值与方差分别为

$$\mu_Z = E(Z) = g(\mu_{a_1}, \mu_{a_2}, \dots, \mu_{a_n}) \quad (2)$$

$$\sigma_Z^2 = E[Z - E(Z)]^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_{\mu}^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (3)$$

从而得到其可靠度指数为

$$\begin{aligned} \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = & g(\mu_{a_1}, \mu_{a_2}, \dots, \mu_{a_n}) / \\ & \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_{\mu}^2 \sigma_{x_i}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

当得到可靠度指数  $\beta$  后,可靠度失效区域的概率可以表示为<sup>[10-11]</sup>

$$P_F = \text{prob}[g(x) \leq 0] = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

式中:  $\Phi$  为标准正态方程的分布函数。

## 1.3 AASHTO 设计方程

AASHTO 设计方法是世界范围内影响最大也

是应用最广的沥青路面设计方法,该方法根据 AASHTO 试验路的数据建立。当不考虑参数的变异时,可靠度分析中路面结构的强度方程可以由 AASHTO 设计方程表示<sup>[12]</sup>

$$\lg(W_{18})=9.36\lg(I_{SN}+1)-0.20+\frac{\lg[I_{\Delta PSI}/(4.2-1.5)]}{0.4+1.094/(I_{SN}+1)^{5.19}}+2.32\lg(M_r)-8.07 \tag{6}$$

式中: $W_{18}$ 为允许的荷载作用次数,它等价于 80-kN 的单轴当量荷载 ESAL; $\Delta PSI$ 是现时服务能力指数的减小值; $I_{\Delta PSI}$ 为 $\Delta PSI$ 的计算参数; $SN$ 为结构层系数; $M_r$ 为有效的路基回弹模量。

结构层系数计算式为<sup>[12]</sup>

$$I_{SN}=a_1D_1+a_2D_2m_2+a_3D_3m_3 \tag{7}$$

式中: $I_{SN}$ 为  $SN$  的计算参数; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  分别为沥青的面层系数、基层系数和底基层系数; $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  为对应的结构层厚度; $m_2$ 、 $m_3$  分别为基层和底基层的排水系数。

2 试验结果与分析

2.1 冻融循环对抗压回弹模量的影响

AC-13 沥青混合料经历 14 次冻融循环试验后,其抗压回弹模量如图 2 所示。

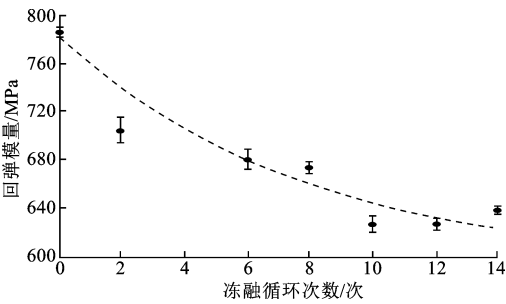


图 2 冻融循环作用对抗压回弹模量的影响

Fig. 2 Impact of freeze-thaw cycles on resilient modulus

由图 2 可知,沥青混合料的抗压回弹模量随冻融循环次数的增加呈减小趋势。初期冻融循环作用下混合料的抗压回弹模量下降明显。8~10 次冻融循环后,沥青混合料抗压回弹模量衰减趋势逐渐趋于平缓。经历 14 次冻融循环作用后,抗压回弹模量减小了 152 MPa,与未冻融时相比,抗压回弹模量降低了 19.3%。

沥青混合料抗压回弹模量是表征强度和变形的函数,混合料受压破坏时,压缩变形由可压缩的空隙(和孔隙)空气和混合料整体变形共同构成。成型的沥青混合料内部存在一定的闭口孔隙和开口空隙,在饱水冻融循环作用下,开口空隙充满自由水分,水

结冰后体积增大,产生膨胀力<sup>[2-3,13-15]</sup>。在反复冻融循环作用下,孔隙壁承受冻胀压力和渗透压力,使沥青与集料的粘结力持续衰减,结构变得松散,导致孔隙壁受损开裂<sup>[2-3,13-15]</sup>。水对沥青混合料性能的影响除了对沥青膜的置换作用外,在寒冷地区存在水分相关变化,导致混合料冻融损伤<sup>[13,15]</sup>。反复冻融循环作用后,混合料空隙被撑大,影响粗集料的相互嵌挤,混合料在压缩破坏时骨架变形增大<sup>[2,4,15]</sup>。冻融循环作用破坏了集料表面的结构沥青,使集料间的粘结力下降,减小了结构沥青对整个粗集料骨架的粘结作用,导致抗压回弹模量减小。

图 2 中混合料抗压回弹模量随冻融循环次数的增加近似呈指数形式变化。利用非线性指数模型对抗压回弹模量进行拟合,指数模型为<sup>[16-17]</sup>

$$y=a+be^{cx}+\epsilon \quad \epsilon \sim N(0,\delta^2) \tag{8}$$

式中: $y$  为因变量,表示抗压回弹模量; $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为抗压回弹模量的初始值、性能衰减速率和方程曲率; $x$  为解释变量,表示冻融循环次数; $\epsilon$  为误差项。

模型中假设随机变量  $\epsilon$  的均值为 0,方差具有齐次性并与因变量不相关,服从正态分布。参数估计采用最小二乘法,由于  $\epsilon$  的正态分布性,可以利用  $x^2$  值评价拟合参数的有效性<sup>[16-17]</sup>。

指数模型关于抗压回弹模量的拟合结果如表 2 所示。结果表明,指数模型较好地反映了抗压回弹模量与冻融循环次数的关系, $R^2_{adj}$  为 0.88。方差分析结果表明,试验数据与指数模型在 0.01 显著性水平下是统计显著的,即两者具有很好的相关性。

表 2 指数模型拟合结果

Tab. 2 Fitting results of exponential model

参 数	<i>a</i>		<i>b</i>		<i>c</i>		统计属性	
	数值	标准 误差	数值	标准 误差	数值	标准 误差	减小的 $x^2$ 值	$R^2_{adj}$
回弹 模量	625.33	23.80	151.92	25.58	-0.21	0.11	366.67	0.88

2.2 结构层系数计算

由于混合料的抗压回弹模量随冻融循环次数的增加而减小,导致路面结构的承载能力降低。已有研究表明,结构层系数  $SN$  可以很好地反映路面结构的承载能力。如式(7)中,各层系数  $a_i$ 、结构层厚度  $D_i$ 、排水系数  $m_i$  共同决定了结构层系数的变化。本文只考虑冻融循环作用对沥青面层系数  $a_1$  有影响,假定其他参数不受冻融作用影响,从而通过沥青面层系数  $a_1$  的变化研究冻融作用对路面结构承载能力的影响。

各层的层系数  $a_i$  是沥青路面结构中表征材料性能的参数。根据 AASHTO(1986) 指南, 材料的回弹模量是决定该层系数的主要参数。通过室外试验, 得到的经验方程可以求解不同材料的层系数。普遍应用的沥青面层系数计算经验方程为<sup>[18]</sup>

$$a_1 = 0.4 \lg\left(\frac{E}{3\,000}\right) + 0.44 \quad (9)$$

$$0.20 < a_1 < 0.44$$

式中:  $E$  为沥青面层混合料的抗压回弹模量(MPa), 本文为冻融循环作用后的抗压回弹模量。

利用式(9)得到冻融后沥青面层系数  $a_{1(F-T)}$  后, 将其代入式(7)可以求得冻融后结构层系数  $SN_{F-T}$ 。由于抗压回弹模量在冻融循环作用下呈现出不确定性, 在可靠度分析中结构层系数  $SN_{F-T}$  的不确定性与抗压回弹模量相同。

### 2.3 关于 AASHTO 设计方法的可靠度方程

在路面结构承载能力可靠度分析中, 应力分析主要针对交通量的预测; 而强度分析主要处理关于路面结构强度的材料性能与结构设计<sup>[19]</sup>。可靠度模型中, 应力方程可以用相应时间段内累积的当量单轴(80-kN)荷载方程表示。美国地沥青协会与 AASHTO 设计方法推荐利用交通增长率来获得整个设计期内的交通量, 计算公式为<sup>[1,12]</sup>

$$N(t) = I_{ESAL} I_{TGF} = I_{ESAL} \frac{(1+r)^t - 1}{r} \quad (10)$$

式中:  $N(t)$  为  $t$  年内总交通量;  $ESAL$  为初始交通量;  $TGF$  为总增长率;  $r$  为年交通增长率;  $t$  为设计年限;  $I_{ESAL}$  为  $ESAL$  的计算参数;  $I_{TGF}$  为总增长率的计算参数。

由强度方程(6)和应力方程(10), 可以得到相应的功能函数方程, 有

$$g(SN_{F-T}, \Delta PSI, M_r, ESAL, r, t) =$$

$$\lg(W_{18}) - \lg(N(t)) = 9.36 \lg(I_{SN} + 1) -$$

$$0.20 + \frac{\lg[I_{\Delta PSI}/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1.094/(I_{SN} + 1)^{5.19}} +$$

$$2.32 \lg(M_r) - 8.07 - \lg(I_{ESAL}) -$$

$$\lg(1+r)^t - 1 + \lg(r) \quad (11)$$

利用泰勒级数展开, 则功能函数可转化为

$$g(SN_{F-T}, \Delta PSI, M_r, ESAL, r, t) =$$

$$g(9.36 \lg(\mu(I_{SN}) + 1) - 0.20 +$$

$$\frac{\lg[\mu(I_{\Delta PSI})/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1.094/(\mu(I_{SN}) + 1)^{5.19}} +$$

$$2.32 \lg(\mu(M_r)) - 8.07 - \lg(\mu(I_{ESAL})) -$$

$$\lg[(1+\mu(r))^t - 1] + \lg(\mu(r)) +$$

$$\frac{\partial(9.36 \lg(I_{SN} + 1))}{\partial I_{SN}} +$$

$$\frac{\partial(\frac{\lg[I_{\Delta PSI}/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1.094/(I_{SN} + 1)^{5.19}})}{\partial \Delta PSI} +$$

$$\frac{\partial(\frac{\lg[I_{\Delta PSI}/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1.094/(I_{SN} + 1)^{5.19}})}{\partial I_{SN}} +$$

$$\frac{\partial(2.32 \lg(M_r))}{\partial M_r} - \frac{\partial(\lg(I_{ESAL}))}{\partial I_{ESAL}} -$$

$$\frac{\partial(\lg[(1+r)^t - 1])}{\partial r} + \frac{\partial(\lg(r))}{\partial r}$$

在计算上式时, 首先须知道各变量的均值, 在计算时除了沥青面层的回弹模量外, 其他参数取值均采用 Huang 的推荐值<sup>[1]</sup>。各参数的推荐值为: 沥青面层厚度 203 mm、基层厚度 178 mm、底基层厚度 292 mm; 基层与底基层回弹模量分别为 207 MPa 和 76 MPa; 路基有效回弹模量为 39.3 MPa; 减小的现时服务能力指数  $\Delta PSI$  为 2; 基层和底基层的排水系数为 1.2; 基层系数和底基层系数则分别为 0.14 和 0.08<sup>[1]</sup>。

通过求解公式可以得到其均值与标准差, 然后利用式(4)得到可靠度指数  $\beta$ , 再将其代入式(5)便得到功能函数的失效概率, 从而获得相关可靠度。

为了分析冻融循环作用对路面结构承载能力的影响, 本文给出设计年限内预计的累计当量单轴荷载  $ESAL$  为 5 000 000, 设计年限为 50 年。5 个基本随机变量当量单轴荷载  $ESAL$ 、底基层回弹模量  $M_r$ 、现时服务能力指数减小值  $\Delta PSI$ 、年交通增长率  $r$  和冻融循环下结构层系数  $SN_{F-T}$ , 前 4 个变量的均值分别为 109 261、5 700、2、0.05; 冻融循环下结构层系数随冻融循环作用而变化。5 个基本变量的变异系数分别为 10%、15%、10%、10% 和 10%<sup>[1]</sup>。

### 2.4 可靠度分析

不同冻融循环作用下可靠度随时间的变化如下页图 3 所示, 其中冻融循环作用的变异系数为 10%。

图 3 中不同冻融循环作用下的路面结构承载能力可靠度均随时间的增加而减小, 前 25 年的可靠度减小速率要大于后面 25 年, 其中前 10 年的减小速率最为明显。其次, 随着冻融循环次数的增加, 可靠度随时间的变化曲线逐渐下移, 即可靠度减小; 未冻融(0 次)的可靠度在整个时间历程内大于其他遭受了冻融循环作用的可靠度。

以图 3 中第 5 年、第 10 年、第 15 年、第 20 年与第 25 年路面结构的可靠度随冻融循环次数的变化

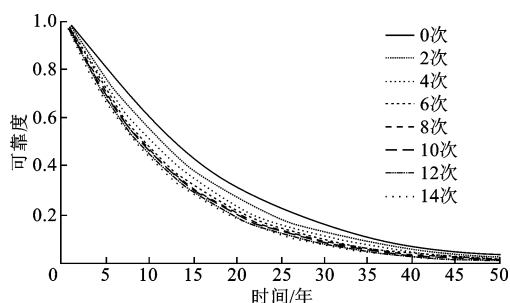


图3 冻融循环作用次数对可靠度影响

Fig. 3 Impact of F-T cycles on reliability

为例可知,无论在哪一年,路面结构可靠度均随冻融循环次数的增加而减小,并且最初几次冻融循环作用对可靠度的影响较大,在经历10次冻融循环后可靠度的减小趋势趋于平缓。当经历14次冻融循环后,可靠度在第5年减小了14.4%,与未冻融情形相比减小了17.7%;可靠度在第25年减小了10%,与未冻融情形相比减小了44.2%。数值分析结果表明,在冻融循环作用下可靠度在初期的衰减程度最为显著,然而其衰减速率将随着冻融循环作用的增加而持续增加。这说明冻融循环作用对路面结构可靠度的影响随着冻融循环次数的增加而不断的累积,导致路面结构性能持续衰减。

为了对比冻融循环作用下结构层系数变化的不确定性对路面结构承载能力的影响,在敏感性分析时,冻融循环作用下结构层系数的变异系数取5%、10%、15%和20%。

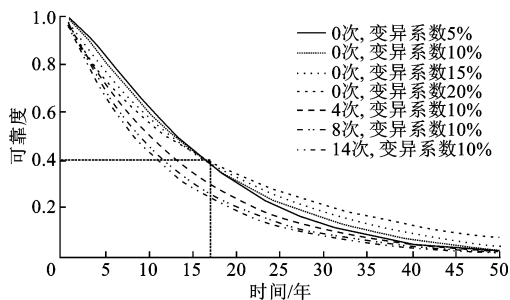


图4 可靠度方程中关于冻融循环作用次数的敏感性分析

Fig. 4 Sensitivity of reliability function of F-T cycles

图4为路面结构可靠度在不同冻融循环作用以及变异系数下随时间的衰减趋势。图中可看出,路面结构可靠度随使用年限的增加呈降低趋势,前15年是可靠度下降的主要区间,可靠度下降了50%以上。说明在前15年应对道路采取有效的养护措施,抑制道路持续恶化,从而提高可靠度,延长其使用寿命。对于具有相同变异系数(10%)的可靠度,可靠度曲线随时间的变化趋势一致,说明冻融循环作用不会改变可靠度的变化趋势,只影响其变化幅度。

对于未遭受冻融循环作用的可靠度,随着变异系数的变化其变化也略有不同,在接近17年时曲线出现交叉点。在前17年,变异系数越小其可靠度越大;当超过17年后,可靠度呈相反变化,说明当变异系数越大时,其不确定性越大,从而为道路性能的预估带来更大的困扰,也为道路的运营管理带来困难。对于不同变异系数情形下的可靠度,接近17年是其可靠度变化的转折点,说明在该点以前要尽可能的降低外界影响的变异系数。分析结果表明,降低冻融循环作用引起的不确定性可以有效增加路面结构承载能力的可靠度。

以上分析表明,利用一次二阶矩法可以求解路面结构承载能力的可靠度方程,该方法简单易行,便于应用。因此,在实际道路性能预估中,首先可采用一次二阶矩法对道路性能进行简单的评估,得到道路性能的总体变化趋势后,再尝试利用其他更为精确的方法对道路性能展开评价。分析结果还说明,冻融循环作用对路面结构的影响很显著,因而在实际工程中不应忽略这一外界影响因素。

### 3 结 语

(1)沥青混合料抗压回弹模量随冻融循环次数的增加呈降低趋势,初期抗压回弹模量衰减较快,经历8~10次冻融循环后,性能衰减趋于平缓;利用指数模型可以较好的反映抗压回弹模量随冻融循环次数的变化。

(2)利用一次二阶矩法可以求解由AASHTO设计方程与设计年限内交通量联合建立的沥青路面结构承载能力可靠度方程,通过结构层系数(沥青面层系数)的变化,可以反映冻融循环作用的不确定性。

(3)路面结构的可靠度随冻融循环作用的增加呈减小趋势,变化程度随变异系数的增大而增大;敏感性分析表明冻融循环作用与其变异系数对路面结构可靠度有显著的影响,降低冻融循环作用的变异性可以有效的增加路面结构的可靠度。

### 参考文献:

#### References:

- [1] Huang Y H. Pavement analysis and design[M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2004.
- [2] 司 伟,马 磊,肖 楠,等.高原寒冷地区沥青混合料冻融循环作用下的抗压性能[J].公路交通科技, 2013,30(4):6-10.

- SI Wei, MA Biao, XIAO Nan, et al. Compression characteristics of asphalt mixture under freeze-thaw cycles in cold plateau regions[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(4): 6-10. (in Chinese)
- [3] Feng D C, Yi J Y, Wang D S, et al. Impact of salt and freeze-thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 62(1): 34-41.
- [4] 马 磊, 韦佑坡, 王 磊, 等. 高原寒冷地区沥青混合料弯拉特性分析[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(3): 44-48.
- MA Biao, WEI You-po, WANG Lei, et al. Analysis on flexural tensile characteristics of asphalt mixture in cold plateau region [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(3): 44-48. (in Chinese)
- [5] Kettil P, Engström G, Wiberg N E. Coupled hydro-mechanical wave propagation in road structures[J]. *Computers & Structures*, 2005, 83(21/22): 1719-1729.
- [6] Alsherri A, George K P. Reliability model for pavement performance[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1988, 114(3): 294-306.
- [7] Melchers R E. Structural reliability: analysis and prediction[M]. 2nd ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 1999.
- [8] Zhang Z M, Damnjanovic I. Applying method of moments to model reliability of pavements infrastructure [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(5): 416-424.
- [9] 国家气象局数据中心. 五道梁、沱沱河、安多地区地面气象资料三十年数据汇编[Z]. 北京: 国家气象局数据中心, 2010.
- National Meteorological Information Center. Earth meteorological data in 30 years of Wudaoliang, Tuo-tuohe, Anduo [Z]. Beijing: National Meteorological Information Center, 2010. (in Chinese)
- [10] Sundararajan C R. Probabilistic structural mechanics handbook[M]. New York: Chapman & Hall, 1994.
- [11] Ditlevsen O, Madsen H O. Structural reliability methods [M]. West Sussen: John Wiley & Sons Ltd., 1996.
- [12] AASHTO T, Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage[S].
- [13] Goh S W, Akin M, You Z P, et al. Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro-or nano-modified asphalt mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(1): 195-200.
- [14] Merboub M. Effect of thermal cycling on the creep-recovery behaviour of road bitumen[J]. *Energy Procedia*, 2012, 18(2): 1106-1114.
- [15] 侯曙光, 李志栋, 黄晓明, 等. 利用冻融飞散试验进行沥青混合料抗冻性能评价[J]. *公路交通科技*, 2006, 23(2): 32-35.
- HOU Shu-guang, LI Zhi-dong, HUANG Xiao-ming, et al. Asphalt mixture antifreeze capability evaluation using freezing-thawing and scattering loss test[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2006, 23(2): 7-10. (in Chinese)
- [16] Washington S P, Karlaftis M G, Mannering F L. Statistical and econometric methods for transportation data analysis[M]. London: Chapman & Hall / CRC, 2011.
- [17] Greene W H. Econometric analysis[M]. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002.
- [18] Bahia H U, Bosscher P J, Christensen J, et al. Layer coefficients for new and reprocessed asphaltic mixes [R]. Madison: University of Wisconsin, 2000.
- [19] Deshpande V P, Damnjanovic I, Gardoni P. Modeling pavement fragility[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, 136(6): 592-596.