

文章编号: 1005—0523(2009)01—0025—04

沥青路面结构的可靠性分析初探

陈百玲, 宋 建, 康玉梅

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 在路面结构设计中, 许多因素都存在不确定性, 这些因素的不确定性将对路面结构的可靠程度产生严重影响. 以现行《公路柔性路面设计规范》为依据, 结合《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999), 应用概率论和随机过程理论, 并考虑设计参数的随机性和变异性, 阐述了沥青路面结构的可靠度概念. 在此基础上, 对路面质量的控制指标建立极限状态方程, 提出了沥青路面结构可靠度设计计算方法, 并结合示例加以说明.

关 键 词: 沥青路面; 可靠度设计; 概率; 极限状态

中图分类号: U416

文献标识码: A

路面作为一种暴露在大自然中的工程结构物, 要经受气候、行车等外部复杂条件的作用, 与其他工程结构一样要有较好的安全性、适用性和耐久性. 无论是水泥路面还是沥青路面, 其结构都是由土基、垫层、基层和面层组成的一个整体. 路面在使用过程中, 任何一个部分受到损害, 都将影响整个路面结构的性能, 甚至导致整个路面结构的失效. 以往, 传统的沥青路面结构设计是以经验或试验为依据, 按照设计规范拟定路面结构的初始方案, 确定有关设计参数, 然后按弹性层状体系理论进行弯拉应力验算, 若设计指标符合规定 (应力或变形), 则认为是适宜的, 否则, 需改变结构或厚度进行重新设计计算, 直到满足设计要求为止. 显然, 传统的设计方法中的一些主要计算参数, 如交通量、土基模量、结构层材料强度及模量、厚度等都是定值, 由此计算得到的路面结构指标, 如: 弯沉、厚度及使用寿命等也是定值. 但事实上, 大部分路面结构的设计参数是随机变量, 具有一定的随机性或不确定性. 同时, 路面结构设计理论和计算公式, 同路面结构实际使用状况差异很大. 因此, 用传统的定值设计法, 不可能客观地反映路面结构的工作状态.

为使沥青路面设计方法更合理、更科学、更可靠, 有必要在设计方法中引入统计及概率概念, 并应充分考虑各设计参数的变异性或不确定性对设计结果的影响. 《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999), 全面引入了结构可靠性理论, 把影响结构可靠性的各种因素均视为随机变量, 以大量现场实测资料和试验数据为基础, 运用统计数学的方法, 寻求各随机性变量的统计规律, 确定结构的失效概率 (或可靠度) 来度量结构的可靠性. 这种方法国际上通常称为“可靠度设计法”, 而将其应用于结构的极限状态设计则称为“概率极限状态设计法”. 该标准明确提出以结构可靠性理论为基础的概率极限状态设计法作为结构设计的总原则. 这无疑是设计思想和设计理论的一大进步.

1 沥青路面结构可靠性分析

1.1 沥青路面结构可靠性概述

为了保证工程结构的质量, 必须明确规定相关的质量指标, 通常称为性能指标. 工程结构的性能指标一

收稿日期: 2008—09—10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50490274); 辽宁省高速公路管理局项目 (2007)

作者简介: 陈百玲 (1972—), 女, 山东龙口人, 博士研究生, 研究方向为道路材料及结构工程.

般为:安全性、适用性和耐久性,通常把这三者总称为结构的可靠性.

参照工程结构可靠度的一般定义,对于沥青路面结构的可靠度可定义如下^[1,2]:沥青路面在规定的条件下和规定的时间内,完成预定功能的概率.所谓“规定的条件”,是指道路实际可能遇到的荷载以及气候环境等条件;“规定的时间”是指道路的设计使用年限;“预定的功能”是指道路满足行车要求所必须具备的强度、刚度和稳定性等.显然,要正确地理解路面结构的可靠性定义,必须抓住三方面的内容,即条件、时间和功能.要想保证路面结构有足够的完成设计功能,并对影响路面结构特性的各个因素的变异性有较好的评价和预估,就必须对路面结构的可靠性加以研究.

1.2 沥青路面结构可靠性分析方法

(1) 极限状态功能函数和分析模型

在可靠度理论中,凡是以结构抗力—荷载效应这种形式出现的结构功能函数,统称为极限状态的 R—S 模型^[2],即以综合随机变量 R 表示结构抗力,以综合随机变量 S 表示荷载效应,具体写成:

$$Z=R-S \begin{cases} >0 \text{ 结构可靠} \\ =0 \text{ 极限状态} \\ <0 \text{ 结构失效} \end{cases}$$

R—S 模型的几何解释见图 1 所示.

根据我国现行的《公路柔性路面设计规范》,路面设计采用了两个控制指标:一个是路表面的设计弯沉值 l_i ;一个是容许弯拉应力值 σ_{Ri} .为此,我们采用下面的可靠度分析数学模型(抗力—效应模型):

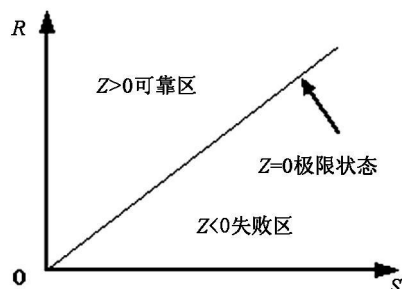


图 1 R—S 模型的几何解释

$$R_l = P(l_i - l_s > 0) \quad (1)$$

$$R_\sigma = P(\sigma_{Ri} - \sigma_{mi} > 0) \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

式中: R_l , R_σ 分别为弯沉和弯拉应力的可靠度;

l_i , σ_{Ri} (抗力)分别为设计弯沉值和各层容许弯拉应力值;

l_s , σ_{mi} (效应)分别为由交通荷载产生的路表弯沉值和各层底面弯拉应力值.

对于 l_i 和 σ_{Ri} 的计算公式如下^[3,6,7]:

$$l_i = 600 N_e^{-0.2} A_c A_s A_b \quad (3)$$

式中: N_e 为设计年限内一个车道上的累计当量轴次(标准轴载为 BZZ-100); A_c 为公路等级系数(高速公路、一级公路为 1.0, 二级公路为 1.1, 三、四级公路为 1.2); A_s 为面层类型系数(沥青混凝土面层 1.0, 热拌沥青碎石、乳化沥青碎石、上拌下贯或贯入式路面为 1.1, 沥青表面处治为 1.2; 中低级路面 1.3); A_b 为基层类型系数(对半刚性基层、底基层总厚度等于或大于 20 cm 时, $A_b=1.0$, 若面层与半刚性基层之间设置等于或小于 15 cm 级配碎石、沥青贯入碎石、沥青碎石的半刚性基层结构时, 仍为 1.0, 柔性基层、底基层或柔性基层厚度大于 15 cm, 底基层为半刚性下卧层时为 1.6).

$$\sigma_{Ri} = \frac{\sigma_{SP}}{K_S} \quad (4)$$

式中: σ_{Ri} 为路面结构层材料的容许拉应力, MPa; σ_{SP} 为结构层材料的极限抗拉强度, MPa, 由实验确定, 我国公路沥青路面设计规范采用极限劈裂强度; K_S 为抗拉强度结构系数, 参考《公路柔性路面设计规范》计算.

(2) 可靠度指标 β 的计算

按照《公路工程结构设计统一标准》, 可靠度采用可靠度指标作为衡量标准. 可靠度指标是结构功能函数的均值与标准差之比, 即功能函数的变异系数的倒数, 记作 β , 其表达式如下^[8]:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (5)$$

按照一次二阶矩法的中心点法, 路面可靠度指标 β 计算如下^[2,8]:

对于 R 和 S 服从正态分布模式

$$\beta=\frac{\mu_R-\mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2}}$$

(6)

对于 R 和 S服从对数正态分布模式

$$\beta=\frac{\ln\frac{\mu_R}{\mu_S}\sqrt{\frac{1+\delta_S^2}{1+\delta_R^2}}}{\sqrt{\ln[(1+\delta_R^2)(1+\delta_S^2)]}}$$

(7)

当 δ_R 和 δ_S 均小于 0.3或者近似相等时,式 (7)可以简化为

$$\beta=\frac{\ln(\mu_R/\mu_S)}{\sqrt{\delta_R^2+\delta_S^2}}$$

(8)

式中: μ_R 、 μ_S 分别为抗力和效应的均值; σ_R 、 σ_S 分别为抗力和效应的标准差; δ_R 、 δ_S 分别为抗力和效应的变异系数.

由此得可靠度

$$R=\Phi(\beta)$$

(9)

2 算例分析

基于设计弯沉为控制指标,对如下路面结构进行可靠度分析.

某汽车专用二级公路的路面结构及各层厚度和抗压模量 E的均值如表 1所示.

表 1 沥青路面结构各层厚度及抗压模量 E

沥青混凝土	$h_1=12\text{ cm}$	$E_1=1\,600\text{ MPa}$
沥青碎石	$h_2=20\text{ cm}$	$E_2=1\,500\text{ MPa}$
石灰土	$h_3=35\text{ cm}$	$E_3=500\text{ MPa}$
土 基		$E_0=50\text{ MPa}$

已知设计年限内累计当量轴次为: $N_e=3\,861\,428$ 次,按设计规范计算得设计弯沉值为 $l_k=0.346\,7\text{ mm}$,均方差为 $\sigma_R=0.012\,2\text{ mm}$,变异系数 $\delta_R=0.03$;用 Monte Carlo模拟得: $l_k=0.327\,3\text{ mm}$,均方差为: $\sigma_S=0.014\,6\text{ mm}$,变异系数 $\delta_S=0.048$.现以设计弯沉为控制指标,分析该路面结构的可靠度.

按正态分布模式计算得

$$\beta=\frac{\mu_R-\mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2}}=\frac{0.346\,7-0.327\,3}{\sqrt{0.012\,2^2+0.014\,6^2}}=1.019\,2$$

由此查正态分布表得可靠度

$$R=\Phi(\beta)=\Phi(1.0192)=84.6\%$$

按对数正态分布模式计算得

$$\beta=\frac{\ln(\mu_R/\mu_S)}{\sqrt{\delta_R^2+\delta_S^2}}=\frac{\ln(0.346\,7/0.327\,3)}{\sqrt{0.03^2+0.048^2}}=\frac{0.057\,58}{0.056\,6}=1.017$$

由此查正态分布表得可靠度

$$R=\Phi(\beta)=\Phi(1.017)=84.5\%$$

由以上计算可看出,当 δ_R 和 δ_S 均小于 0.3或者近似相等时,两种模式计算结果相差很小,可以简单按正态分布模式分析.

3 总结

应用概率论和随机过程理论,并考虑设计参数的随机性和变异性,阐述了沥青路面结构的可靠度概念.在此基础上,对路面质量的控制指标建立极限状态方程,提出了沥青路面结构可靠度分析方法,并结合算例加以分析.但由于影响路面结构可靠性的因素很多,尚有许多工作要做,在此只是做了初步探讨.在今后的工作中,将进一步深入研究考虑多参数影响的路面结构可靠度分析与设计方法.

参考文献:

- [1] 何兆益, 邓学钧. 柔性路面系统可靠度的分析 [J]. 东南大学学报, 1994, 24(1): 1—4.
- [2] 卢正宇, 张起森, 查旭东. 柔性路面结构可靠度指标研究 [J]. 长沙交通学院学报, 1995, 11(3): 67—68.
- [3] 孙长新. 柔性路面结构可靠性设计原理及方法 [J]. 广东公路交通, 1995, (1): 32—35.
- [4] 吴世伟. 结构可靠度分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [5] 张新培. 建筑结构可靠度分析与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] JTJ 014—97, 公路沥青路面设计规范 [S].
- [7] 李朝阳, 郭忠印, 许志鸿. 沥青路面结构的可靠性分析 [J]. 同济大学学报, 1996, 24 (6): 1—5.
- [8] GB/T 50283—1999, 《公路工程结构可靠度设计统一标准》[S].
- [9] Kim H. B. Framework for incorporating rutting prediction model in the reliability-Based design of flexible pavements [D]. Michigan State University, 1999.
- [10] Christian Becher. Reliability Applied to Slope Stability Analysis [J]. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 1994, 120 (1): 2180-2207.
- [11] Tim D. H., D. E. Newcomb. Incorporation of reliability into the minnesota mechanistic-empirical pavement design method [R]. Minnesota University, 1999.

An Analysis of Reliability of Asphalt Pavement Structure

CHEN Bai-ling, SONG Jian, KANG Yu-mei

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Many uncertain factors in the design process of pavement structure will greatly influence the reliability of the pavement structure. Based on “the Design Standard of Highway Flexible Pavement” and “Unified Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures” (GB/T 50283—1999), according to randomness and variability of all design parameters, this paper expounds the reliability concept of asphalt pavement by means of probabilistic method and stochastic process. Then, the limit equation of pavement control index is established. Finally, a reliability design method for asphalt pavement is presented and an example is given.

Key words: asphalt pavement; reliability design; probability; limit state

(责任编辑: 王建华 李 萍)