

水泥混凝土路面结构模糊随机可靠度设计方法研究

刘 文¹, 李清富², 胡群芳³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海市 200092; 2. 郑州大学环境与水利学院 郑州市 450002;

3. 同济大学地下建筑与工程系 上海市 200092)

摘 要: 我国水泥混凝土路面设计经历了3个发展阶段:经验法、力学—经验法和可靠度设计法。由于荷载、环境作用和结构设计参数的随机性和模糊性,它们都将影响路面结构的可靠度水平。为了更好地发展现有路面设计理论,系统地分析了现有水泥混凝土路面设计规范,对路面结构可靠度进行了定义和讨论。采用模糊随机可靠度理论,对水泥混凝土路面结构可靠度设计方法进行了系统分析,研究提出了路面模糊随机可靠度的设计公式,讨论了各个设计变量的变异性,并结合具体设计提出了详细的步骤和思路。

关键词: 水泥混凝土路面; 模糊随机可靠度; 设计方法

我国公路水泥混凝土路面结构设计经历了3个发展阶段:(1)经验法,凭经验决定路面厚度;(2)力学—经验法,采用结构分析理论(弹性地基板或弹性层状体系理论等)和数值计算方法(解析法或有限元法等)相结合;(3)可靠度设计法^[1]。在力学—经验设计方法中,虽然建立了荷载和环境作用与路面结构的应力、挠度之间的计算模式,分析了各设计变量对水泥混凝土路面损坏影响的程度,但是其设计思想仍是确定性的。事实上,由于荷载和环境作用的随机性以及结构设计变量的变异性,由理想化的结构分析模型计算得到的路面设计厚度往往与路面实际状况之间存在较大的差异,从而使较多的路面在实际使用中不能满足预定的使用性能要求,路面使用初期就出现大量的损坏。水泥混凝土路面结构可靠度设计方法充分考虑了路面材料、结构参数以及交通参数的变异性,较确定性设计方法有较大发展,但却忽略了路面结构设计中存在的大量模糊信息。本文将运用模糊随机可靠度理论对路面结构可靠度进行分析,并初步建立水泥混凝土路面结构模糊随机可靠度设计方法。

1 水泥混凝土路面结构可靠度定义

我国目前采用的规范^[2,3]是以行车荷载和温度

梯度综合作用产生的疲劳断裂作为设计标准,其极限状态设计表达式为:

$$Y_r(\sigma_p + \sigma_n) \leq f_r \quad (1)$$

可靠度表达式为:

$$P_s = P(Y_r(\sigma_p + \sigma_n) \leq f_r) \quad (2)$$

由于 $(\sigma_p + \sigma_n)$ 和 f_r 不相互独立,式(2)求解十分困难。因而,在保持控制失效模式不变的前提下,可采用路面结构所能承受的标准轴载作用次数 N 大于设计基准期内标准轴载累计作用次数 $n(N > n)$ 作为路面结构的功能函数,其可靠度表达式为:

$$P_s = P(N > n) \quad (3)$$

采用上述定义分析路面结构的可靠度,就有可能使不同路面类型或者采用不同设计方法和指标的可靠度计算值具有了可比性,从而有利于路面结构方案的比较和选择,有利于多指标路面设计方法中各设计指标间的平衡设计^[4,5]。

按照式(3)给出的水泥混凝土路面结构可靠度定义,路面结构极限状态方程可表示为:

$$Z = g(N, n) = N - n = 0 \quad (4)$$

式中: Z 为极限状态函数; N 为路面结构使用性能寿命期内标准轴载作用次数预估的综合随机变量; n 为设计使用期内标准轴载作用次数预估的综

合随机变量。

根据试验数据和经验,路面结构使用性能寿命预估变量 N 的概率分布服从对数正态分布或者威布尔(Weibull)分布,交通荷载预估变量 n 的概率分布服从对数正态分布。其中威布尔分布的分布函数为:

$$F_w(N) = 1 - \exp[-(N/\alpha)^\beta] \quad N > 0 \quad (5)$$

式中: α 为特征参数, β 为形状参数, 它们与威布尔分布变量 N 的均值 μ_N 和方差 σ_N^2 的关系式为式(6)和式(7)。

$$E(N) = \mu_N = \int_0^\infty N f(N) dN = \alpha \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (6)$$

$$D(N) = \sigma_N^2 = \int_0^\infty N^2 f(N) dN - [E(N)]^2 = \alpha^2 \times [\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)] \quad (7)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

对数正态分布的概率密度函数为:

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln n}^2} \cdot n} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln n - \mu_{\ln n}}{\sigma_{\ln n}}\right)^2\right] \quad n > 0 \quad (8)$$

式中: $\mu_{\ln n}$ 和 $\sigma_{\ln n}$ 为对数正态分布的特征参数, 分别是对数平均值和对数标准差, 与对数正态变量 n 的均值 μ_n 和方差 σ_n^2 的关系为式(9)和式(10)。

$$E(n) = \mu_n = \exp(\mu_{\ln n} + \sigma_{\ln n}^2/2) \quad (9)$$

$$D(n) = \sigma_n^2 = \exp(2\mu_{\ln n} + \sigma_{\ln n}^2) [\exp(\sigma_{\ln n}^2) - 1] \quad (10)$$

2 水混凝土路面结构模糊随机可靠度计算

随机性是路面结构设计中存在的一种主要的不确定性, 同样, 路面结构设计中存在模糊性, 随机性和模糊性对结构的可靠度均有影响。水混凝土路面结构的广义抗力和广义荷载效应既具有随机性又具有模糊性, 因而, 水混凝土路面结构的失效事件是模糊随机事件。模糊数学中对模糊随机事件的定义及概率测度的定义为: 在给定的概率空间 (Ω, W, P) 中, 如果 Ω 的模糊子集 A 中的元素为一个随机变量, 则称 A 为模糊随机事件。若 A 的隶属函数是布尔(Borel)可测的, 其中的元素 x_i 属于 A 的隶属度为 $\mu_A(x_i)$, x_i 发生的概率为 p_i , 则模糊随机事件 A 发生的概率为:

$$P(\underline{A}) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu_A(x_i) p_i \quad (11)$$

若 X 为连续模糊随机变量, 则:

$$P(\underline{A}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mu_A(x) f(x) dx \quad (12)$$

式中: $f(x)$ 为连续模糊随机变量 X 的密度函数。

根据上述定义可知, 路面结构的失效概率可表示为:

$$P_f = P(\underline{\Omega}_f) = P(\underline{R} \subseteq \underline{S}) = \int_0^{+\infty} f_{\underline{R}}(x) \mu_{\underline{S}}(x) dx \quad (13)$$

式中: $\underline{\Omega}_f$, \underline{R} 和 \underline{S} 分别为路面的模糊随机失效事件、广义抗力和广义荷载效应; $f_{\underline{R}}(x)$ 为描述路面结构失效事件随机性的概率密度函数; $\mu_{\underline{S}}(x)$ 为描述路面结构失效事件模糊性的隶属度函数。

如果路面结构的广义抗力 \underline{R} 和广义荷载效应 \underline{S} 相互独立, 则描述路面结构失效事件随机性的概率密度函数为 \underline{R} 和 \underline{S} 联合分布的概率密度函数, 路面结构失效事件的模糊性为 \underline{R} 和 \underline{S} 的交集^[6], 即有:

$$\begin{cases} f_{\underline{R}}(x) = f_{\underline{S}}(s) \cdot f_{\underline{R}}(r) \\ \mu_{\underline{R}}(x) = \mu_{\underline{S}}(s) \cap \mu_{\underline{R}}(r) = \mu_{\underline{R}}(r, s) \mu_{\underline{S}}(s) \end{cases} \quad (14)$$

相应的水泥混凝土路面结构的失效概率为:

$$P_f = P(\underline{\Omega}_f) = \int_0^{+\infty} f_{\underline{R}}(x) \mu_{\underline{S}}(x) dx = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f_{\underline{S}}(s) \cdot f_{\underline{R}}(r) \mu_{\underline{R}}(r, s) \mu_{\underline{S}}(s) dr ds \quad (15)$$

假设路面的设计标准荷载疲劳作用次数 N 和设计基准期内标准轴载累计作用次数 n 相互独立, 则可将式(15)变为:

$$P_f = P(\underline{Z}_f) = \int_0^{+\infty} f_{\underline{Z}}(z) \mu_{\underline{Z}}(z) dz = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} f_{\underline{n}}(n) \cdot f_{\underline{N}}(N) \cdot \mu_{\underline{Z}}(N, n) \cdot \mu_{\underline{Z}}(n) dN dn \quad (16)$$

假定路面结构使用性能寿命预估变量 N 服从威布尔分布, 交通荷载预估变量 n 服从对数正态分布, 且相互独立, 则:

$$f_{\underline{Z}}(z) = f_{\underline{n}}(n) \cdot f_{\underline{N}}(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln n}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln n - \mu_{\ln n}}{\sigma_{\ln n}}\right)^2\right] \cdot \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (N > 0, n > 0) \quad (17)$$

隶属度函数 $\mu_{\underline{Z}}(N)$ 和 $\mu_{\underline{Z}}(n)$ 的确定一般要通过模糊统计分析试验得到, 在缺少统计数据时, 可以暂凭经验假定一个隶属度函数, 文献^[7]详细地分析了路面使用性能的标准衰变方程的变化规律, 借鉴其规律令隶属度函数 $\mu_{\underline{Z}}(z)$ 的具体函数形式如下:

$$\mu_{\underline{Z}}(z) = 1 - \exp[-(a_0/n)^{\beta_0}] \quad (18)$$

式中: a_0 和 β_0 为模型参数, 具体数值可以通过

试验拟合分析得到。

将式(17)和式(18)代入式(16)可得路面结构模糊随机失效概率为:

$$P_f = P(Z_f) = \int_0^{+\infty} f_z(z) \mu_z(z) dz$$

$$= \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln n}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln n - \mu_{\ln n}}{\sigma_{\ln n}}\right)^2\right] \cdot$$

$$\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \{1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_f}{n}\right)^{\beta}\right]\} dndN$$
(19)

3 水泥混凝土路面使用性能寿命预估的变异

水泥混凝土路面结构疲劳寿命是在疲劳试验的基础上分析得到的,根据室内小梁弯曲试验结果可知:混凝土弯曲疲劳寿命服从两参数的威布尔分布,而且两参数威布尔分布的失效概率函数与路面的损坏规律比较一致,因此,可以假定路面结构疲劳寿命 N 的概率分布采用威布尔分布,其分布函数见式(5)。按照现行的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002)^[2]分析可知,路面疲劳寿命 N 与混凝土极限弯拉强度 f_t 、荷载应力 σ_p 和疲劳温度应力 σ_t 有关:

$$\lg\left(\frac{\sigma_p}{f_t - \sigma_t}\right) = \lg a - b \lg N \quad (20)$$

式中: a, b 为待定参数,与路面的失效概率有关。

影响混凝土路面结构的荷载应力 σ_p 和疲劳温度应力 σ_t 的因素很多,根据理论分析和实际调研资料^[8,9],其中对路面疲劳寿命 N 影响较为显著的因素有:混凝土板的厚度 h 、弹性模量 E_c 、弯拉强度 f_t 、基层顶面当量回弹模量 E_s 和路面最大疲劳温度梯度 T_g ,而且前4项因素的变异性很大(表1),分析时必须进行重点考虑。结合上述分析,水泥混凝土路面的疲劳寿命 N 的计算式可以近似地表示成:

$$N = f(h, f_t, E_c, E_s, T_g) \quad (21)$$

表1 水泥混凝土路面疲劳寿命 N 的预估变异系数范围

变异水平等级	低	中	高
水泥混凝土弯拉强度 f_t , 弯拉弹性模量 E_c	$C_v \leq 0.10$	$0.10 \leq C_v \leq 0.15$	$0.15 \leq C_v \leq 0.20$
基层顶面当量回弹模量 E_s	$C_v \leq 0.25$	$0.25 \leq C_v \leq 0.35$	$0.35 \leq C_v \leq 0.55$
水泥混凝土面层板厚度 h	$C_v \leq 0.04$	$0.04 \leq C_v \leq 0.06$	$0.06 \leq C_v \leq 0.08$

4 路面标准轴载累计作用次数预估的变异性

设计使用期内标准轴载的累计作用次数 n 是路面使用初期的平均日交通量 N_d 、交通量年平均增长率 γ 、方向分配系数、车道分配系数、货车交通量比例、轴载组成(各级轴重的分布频率或轴载谱)、轴载换算系数、轮迹横向分布等一系列设计参数的函数。目前我国现行《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002)^[2]采用的计算公式为:

$$n = \frac{N_d [(1+\gamma)^t - 1] \times 365}{\gamma} \quad (22)$$

式中:路面标准轴载累计作用次数 n 是 N_d 、 γ 和 t 的函数, n 的变异性由这些交通参数的变异性组成。

路面标准轴载累计作用次数 n 的预估标准差 σ_n^2 和变异系数 C_v 见表2。根据资料统计分析^[10,11],水泥混凝土路面标准轴载累计作用次数 n 的概率分布通常服从对数正态分布(式(8)),其参数统计特征公式为:

$$\begin{cases} \mu_{\ln n} = \ln(\mu_n / \sqrt{1 + C_v^2}) \\ \sigma_{\ln n} = \sqrt{\ln(1 + C_v^2)} \end{cases} \quad (23)$$

表2 水泥混凝土路面标准轴载累计作用次数的预估标准差和变异系数

公路等级	专用公路		一般公路	
	高速	一级、二级	二级	三、四级
设计基准期/年	30	20~30	20	20
标准差 σ_n^2		0.038 5	0.047	0.079 4
变异系数 C_v	0.304	0.252	0.146	0.197

利用式(6)、(7)和(23)分别计算各参数值后,可采用直接数值积分法或响应面法计算路面结构可靠度,计算过程可以按照图1所示框图^[1]进行。

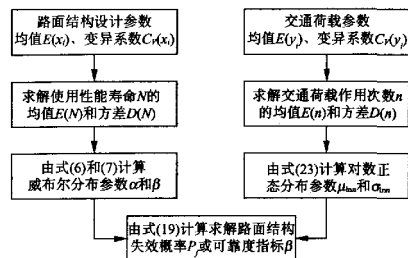


图1 水泥混凝土路面结构可靠度计算框图

5 水泥混凝土路面结构可靠度设计步骤

第一步:计算水泥混凝土路面设计使用期内标

准轴载累计作用次数 n_0 。

(1) 按照规范^[2]确定设计公路的设计基准期、安全等级、临界荷载处轮迹横向分布系数和交通量年平均增长率；

(2) 假定交通量预估设计参数 n 服从对数正态分布, 按照式 (22) 计算得到设计基准期内设计车道标准轴载累计作用次数的均值, 查表 2 确定标准差 σ^2 和变异系数 C_{V_n} ；

(3) 利用式 (23) 计算得到 μ_{1na} 和 σ_{1na} , 代入式 (8) 中得到其概率分布密度函数。

第二步: 初拟路面类型和结构层组合方案。

根据公路等级、交通等级和变异水平, 确定路基、路面、基层和垫层的材料类型和设计尺寸。

第三步: 确定设计路面结构的疲劳寿命 N 。

(1) 根据选定的路面结构, 假定式 (21) 中随机变量参数 h, f, E_c, E_t 均服从正态分布, 则由规范^[2]确定水泥混凝土路面板厚度的 μ_h 和 C_{V_h} , 普通混凝土面层弯拉强度的 μ_{f_c} 和 $C_{V_{f_c}}$, 相应弯拉弹性模量的 μ_{E_c} 和 $C_{V_{E_c}}$, 由选定的路面结构层材料按照现行规范^[2]方法计算基层顶面当量回弹模量的 μ_{E_r} 和 $C_{V_{E_r}}$ ；

(2) 假定水泥混凝土路面疲劳寿命 N 服从威布尔分布, 通过随机有限元模拟分析得到其分布特征值 μ_N 和 σ_N^2 , 利用式 (6) 和 (7) 求解其参数 α 和 β 。

第四步: 计算所设计水泥混凝土路面结构可靠度, 并确定最终方案。

假定隶属度函数式 (18) 中的参数 α_0 和 β_0 , 将上述参数代入式 (19) 中采用数值积分方法得到 P_f , 进一步得到可靠度指标 β , 综合各方面的分析和考虑, 选择确定最终方案。

6 结语

由于在水泥混凝土路面结构设计中存在大量随机模糊信息, 因此, 水泥混凝土路面结构的失效事件

是模糊随机事件。本文利用模糊随机可靠度理论对路面可靠度进行了系统研究, 建立了水泥混凝土路面可靠度设计方法并给出了设计步骤, 讨论了各个设计变量的变异性。可靠度设计方法的突出优点是能将设计和施工有机地结合在一起, 设计时既考虑了设计公路的等级和重要性, 又能根据不同的施工技术和管理水平提出不同的设计结果和要求, 从而便于对路面施工单位提出具体的要求, 并且在施工过程中通过控制某些技术参数能使路面结构实现预定的设计功能。当然, 本文作为对水泥混凝土路面设计方法改进的一种初步探讨, 其中还有许多问题有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999.
- [2] JTG D40—2002, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [3] GB/T 50288—1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [4] 刘伯莹, 姚祖康. 《公路水泥混凝土路面设计规范》修订综述[J]. 公路, 2002, (8).
- [5] Kulkarni R B. Rational approach in applying reliability theory to pavement structural design[R]. TRR—1449, 1993.
- [6] 李云贵, 赵国藩. 模糊随机可靠性理论及其应用[J]. 结构工程学报, 1991, (专刊).
- [7] 孙立军, 刘喜平. 路面使用性能的标准衰变方程[J]. 同济大学学报, 1995, 23(5).
- [8] 谈至明, 姚祖康, 汪亚干. 水泥混凝土路面结构可靠性设计方法[J]. 公路, 2001, (2).
- [9] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 水泥混凝土路面结构可靠性设计方法[J]. 公路, 2002, (8).
- [10] 黄晓明, 邓学钧, 战高峰. 用蒙特卡罗法分析水泥混凝土路面可靠度[J]. 中国公路学报, 1993, (3).
- [11] 黄晓明. 水泥混凝土路面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

A Study on Design Method of Fuzzy-Random Reliability of Cement Concrete Pavements

LIU Wen¹, LI Qing-fu², HU Qun-fang³

(1. Key Lab. of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The design of cement concrete pavement has experienced three phases such as empirical

万方数据

文章编号: 0451-0712(2005)09-0081-06

中图分类号: U416.1

文献标识码: B

珠海市公路软基处理技术浅谈

温武贤, 周华云, 谢应梅

(珠海中港路桥建设有限公司 珠海市 519000)

摘 要: 以珠海市建成的公路软基处理及沉降观测资料为基础, 分析指出地基处理不可能消除工后沉降, 选择地基处理方法应与地基条件、路堤高度相结合, 不同处理方法均需足够的预压, 地基沉降规律较符合双曲线关系, 工后沉降会引起横坡改变, 加筋土桥台是消除“三孔”跳车现象的有效方法。

关键词: 公路; 软土地基; 处理技术

1 珠海市公路软基处理发展过程概述

珠海地区高路堤软基处理的主要目的是减少高路堤工后沉降量, 路堤稳定性是地基处理的重点。

自 1986 年珠海市第一条一级公路——国道 105

珠海段公路开始修建以来, 至今已有省线 S111 港湾大道段、珠海大道及珠港大道等高等级公路相继建成或处于工程建设之中。表 1 列出了各条高等级公路的最大路堤高度与局部路段曾使用的地基处理方法。

表 1 珠海市高等级公路建设情况一览表

工程名称	长度/km	路堤最大高度/m	平均高度/m	建设期	地基处理	备注
105 国道珠海段	11.6	4.5	2.7	1986—07~1988—10	粉煤灰填筑, 砂井, 堆载预压	多数欠载预压, 部分试验路超载预压
港湾大道	30.59	7.5	3	1991—10~1993—12	粉煤灰路堤, 砂井, 塑料排水板	等载预压为主
珠海大道	45	8.9	3	1994—02~1997—12	粉煤灰路堤, 粉喷桩	粉喷桩处为欠载预压
珠港大道	26	7.5	4.3	2000—08~2003—10	粉煤灰路堤, 粉喷桩、钢渣桩	粉喷桩处主要是欠载预压
南新公路	16	7.5	4	2002—12~2004—01	粉煤灰路堤, 塑料排水板, 粉喷桩、钢渣桩	

1986 年 105 国道主要采用袋装砂井处理软土, 最大路堤高度控制在 4.5 m 以下, 在部分试验段进行了超载预压, 多数路段为欠载预压, 且预压时间不

足。试验路还进行不同砂井间距的对比, 在不同间距砂井处理段之间设过渡段。有些路堤采用粉煤灰填筑, 约减少了路堤自重的 1/4。1991 年港湾大道一级

收稿日期: 2005—05—10

method, mechanistic-empirical method and reliability design method. The random and fuzzy quality in the load, environment and design parameters will affect the reliability of pavement structure. In order to develop design theory more reasonable, the current design specification code of cement concrete pavement is systematically analyzed and the definition of reliability of pavement structure discussed. On the basis of the fuzzy-random reliability, the design formula for the fuzzy-random reliability of pavement is established and the variability of various design variables is discussed. Last, the detailed design steps and the practical design process are put forward.

Key words: cement concrete pavement; fuzzy-random reliability; design method