

水泥混凝土路面设计风险预警系统的研究

周 直¹, 戴宠丝¹, 方明准²

(1. 重庆交通大学 重庆市 400074; 2. 温州苍南交通设计事务所 温州市 325000)

摘 要:从工程项目风险管理角度出发,结合水泥混凝土路面可靠度设计的理论和方法,系统地分析了水泥混凝土路面设计中存在的不确定性因素,建立了水泥混凝土路面设计风险指标体系,确定了水泥混凝土路面设计风险预警指标及其阈值和相应的风险预警信号。应用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟的理论和方法,建立了水泥混凝土路面设计风险预警模型,从而增强了抵抗水泥混凝土路面设计风险的能力。

关键词:水泥混凝土路面;设计;可靠度;风险分析;风险预警;蒙特卡罗模拟

我国公路水泥混凝土路面设计经历了 3 个发展阶段:(1)经验法,凭经验决定路面结构各层的厚度和材料;(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,考虑了综合应力(温度应力和荷载应力)、路面材料性能、几何尺寸、结构参数以及交通参数等因素的不确定性。随着我国 1999 年 10 月 1 日《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)的颁布,为我国公路桥梁整体结构及结构构件、高速公路路面、一级公路路面、二级公路路面等结构的设计,提供了统一的基于可靠性理论的设计方法和原则,以及目前国内外学者对路面结构可靠度设计方法和理论的研究和探讨,路面设计中存在的各种不确定因素正在被广泛关注和研究。目前尚无真正意义上的从风险的角度对水泥混凝土路面设计进行研究和探讨的文章和著作,本文结合水泥混凝土路面可靠度设计的原理和方法,运用风险分析的方法和理论,建立基于可靠度理论的水泥混凝土路面设计风险预警系统。

1 系统概述

水泥混凝土路面设计风险预警系统(Concrete Pavement Design Risk Early Warning System,简称 CPDREWS),是通过对水泥混凝土路面设计过程中的风险因素的识别、评估、评价,建立预警指标体系,从而监测水泥混凝土路面设计过程中某种指标偏离

预警阈值的程度,发出预警信号,并采取预防、控制和改进措施的系统。它通过对水泥混凝土路面设计过程的监控和参数的调整,将因设计原因造成的路面使用功能和结构功能风险损失降低,从而达到设计既合理又经济的目的。

水泥混凝土路面设计风险预警系统既是一个复杂的系统,又是一个通过循环而不断获得改进和优化的系统,在建立此预警系统时应遵循以下指导思想 and 原则。

(1)科学的防范性。预警是为了给设计人员提供风险可能发生的有效信息,指导设计人员及时采取相应的防范措施,因而整个预警系统必须具有较为严密的科学性。

(2)系统原则。预警系统吸收了原有管理理论和方法的精髓,作为一种新的管理思想和方法,是对现有管理系统的完善和发展。它是对水泥混凝土路面设计的全过程管理,因此必须将水泥混凝土路面设计风险视为一个系统作为研究对象,在预警系统中坚持系统性原则。

(3)实用、易操作原则。任何一种方法在实际应用中必须以实用为其生存的根本要求,基于可靠度理论的水泥混凝土路面设计风险预警系统必须体现实用、易操作的原则。

2 水泥混凝土路面设计风险预警系统的建立

2.1 水泥混凝土路面设计风险分析模块

2.1.1 风险分析简述

在水泥混凝土路面结构设计中存在许多风险因素,这些风险因素一方面反映了客观的实际情况,同时又会给路面结构的可靠度和经济合理产生严重的影响。为了全面认识路面设计中的风险,对路面设计进行风险分析,是建立合理、科学的预警系统的首要任务。基本的风险分析过程和方法如图 1 所示。

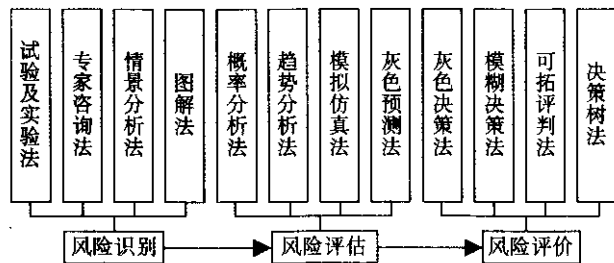


图 1 风险分析基本过程和方法

2.1.2 水泥混凝土路面设计风险指标体系的建立

目前国内外对结构可靠度的研究和我国现行有关可靠度设计的规范,主要是以大量的试验数据和调查实测资料为基础,对影响路面设计的各个不确定因素(风险源)进行识别和分析。据此,本文建立如图 2 所示的水泥混凝土路面设计风险指标体系。

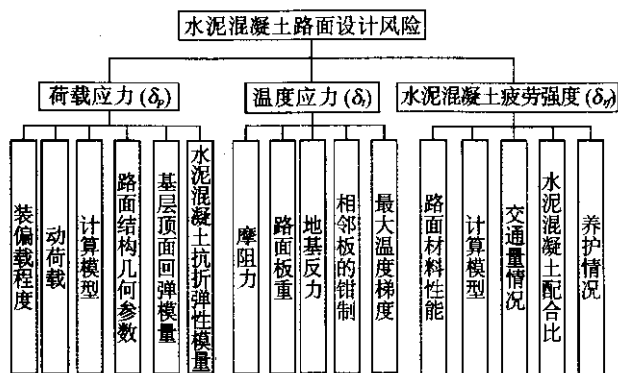


图 2 水泥混凝土路面设计风险指标体系

2.2 水泥混凝土路面设计风险预警模块

2.2.1 预警指标的选择

建立科学合理的指标体系,是进行水泥混凝土路面设计风险预警的首要环节,而其中正确选择和确定预警指标是关键。选择预警指标应遵循以下的基本原则:(1)可测性;(2)客观性;(3)全面性;(4)灵敏性;(5)可比性;(6)直观性。本文从工程结构可靠度的理论、方法及其应用角度,选择预警指标。

定义 1: 结构可靠度是指结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率。

我国颁布的《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)和目前一些国内外对结构可靠度的研究成果中,对结构可靠度的分析采用极限状态方程来描述,指出结构按极限设计的表达式为:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0 \quad (1)$$

或:

$$Z = g(R, S) = R - S \geq 0 \quad (2)$$

可靠度的表达式为:

$$P_s = P(g(X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0) \quad (3)$$

或:

$$P_s = P(g(R, S) = R - S \geq 0) \quad (4)$$

$$P_f = 1 - P_s \quad (5)$$

式中: $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为影响结构的基本变量; Z 或 $g(\bullet)$ 为结构功能函数; R 为结构的抗力; S 为综合作用的效应; P_s 为结构的可靠度,即可靠概率; P_f 为结构的失效概率。

定义 2: 水泥混凝土路面结构可靠度是指在设计使用年限内,在将遇到的环境条件和荷载条件下,水泥混凝土路面能够发挥其预期功能的概率。

我国现行的水泥混凝土路面设计规范中,采用的结构设计方法是以水泥混凝土路面板在车辆荷载应力和温度应力的综合作用下,在纵缝中部出现纵向疲劳开裂作为临界损坏状态,设计时以荷载应力和温度应力的叠加小于等于水泥混凝土疲劳强度作为设计标准。路面结构极限状态函数表达式为:

$$Z = \delta_p + \delta_t \leq \delta_{rf}$$

路面设计可靠度的表达式为:

$$P_s = P(Z) = P(\delta_p + \delta_t \leq \delta_{rf})$$

式中: δ_p 为荷载应力, MPa; δ_t 为温度应力, MPa; δ_{rf} 为水泥混凝土疲劳强度, MPa。

目前,在结构可靠度分析中一般采用结构的失效概率(P_f)、可靠度(P_s)或可靠度指标(β)作为结构可靠度的度量指标,进行结构设计。在假设 $R(\delta_p, \delta_t \text{ 的综合作用效应}) \sim N(\mu_R, \sigma_R)$, $S(\delta_{rf}) \sim N(\mu_S, \sigma_S)$ 都服从正态分布的条件下,则 P_f 、 P_s 、 β 之间的对应表达式为:

$$P_s = 1 - P_f = \phi(\beta) \quad (6)$$

其中:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (7)$$

P_f 、 P_s 和 β 的统计关系如表 1 和图 3 所示。

表 1 可靠度指标 β 、失效概率 P_f 、可靠度 P_s 的对应关系

β	1.00	1.64	2.00	3.00	3.71	4.00	4.50
$P_f/\%$	15.87	5.05	0.27	0.135	0.010 4	0.003 17	0.000 34
$P_s/\%$	84.13	94.95	99.73	99.865	99.989 6	99.996 83	99.999 66

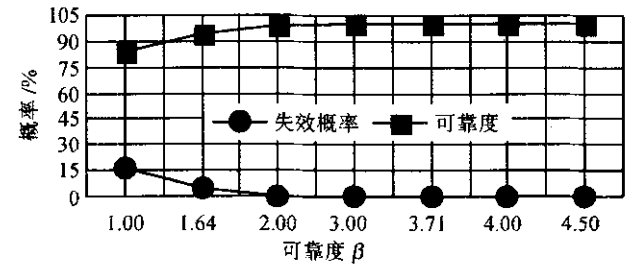


图 3 可靠度、失效概率、可靠度对应关系

根据水泥混凝土路面设计的特点以及对 3 个可靠度指标的探讨,在 3 个指标中,选择可靠度(P_s)指标作为水泥混凝土路面设计风险系统的预警指标。

预警指标(P_s)与水泥混凝土路面设计的风险成反比,即 P_s 越大,水泥混凝土路面在设计使用年限内,因路面设计原因造成的路面破坏、维护等的风险越小,反之越大。

2.2.2 预警指标阈值的确定

从水泥混凝土路面结构的可靠性角度出发,预警指标 P_s 阈值取值越大,路面结构越稳定和安全;反之,路面结构耐久性越差,容易遭到破坏。从经济的角度出发,预警指标 P_s 阈值取值越大,工程投入的费用越大,造成浪费;反之,投资越少,设计质量低。从人的角度出发,预警指标 P_s 阈值取值越大,设计人员在设计过程中的警惕性和责任感越高;反之,设计人员会出现敷衍和草率的情况。因此,恰如其分地确定预警指标 P_s 阈值,是一项复杂的课题。

水泥混凝土路面设计的可靠度,不仅涉及公路等级和经济因素,而且同社会因素有关。通过调查计算和综合分析,考虑到我国沥青混凝土路面和水泥混凝土路面设计的隐含可靠度情况以及国外分析数据,我国目前采用的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2002)规定了各级公路水泥混凝土路面的可靠度设计标准,如表 2 所示。

表 2 可靠度设计标准

公路技术等级	高速公路	一级公路	二级公路	三、四级公路
安全等级	一级	二级	三级	四级
目标可靠度/%	95	90	85	80
变异水平等级	低	低~中	中	中~高

综合考虑我国《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2002)的可靠度设计标准、《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)中关于各级公路服务水平的规定以及国内外对可靠度和预警系统的研究,并借鉴红绿灯在道路交通中的作用,确定水泥混凝土路面设计预警指标阈值处于不同范围时预警系统发出红灯、黄灯、绿灯 3 种不同的预警信号,如表 3 所示。

表 3 水泥混凝土路面设计风险预警指标与预警阈值

预警信号	红灯	黄灯	绿灯
高速公路	$92.5 > P_s$	$95 > P_s \geq 92.5$	$P_s \geq 95$
一级公路	$90 > P_s$	$92.5 > P_s \geq 90$	$P_s \geq 92.5$
二级公路	$87.5 > P_s$	$90 > P_s \geq 87.5$	$P_s \geq 90$
三、四级公路	$82.5 > P_s$	$87.5 > P_s \geq 82.2$	$P_s \geq 87.5$
综合评价	风险大	风险一般	风险小

2.2.3 Monte Carlo(蒙特卡罗)模拟预警模型

(1)蒙特卡罗方法简介。

蒙特卡罗(Monte Carlo)方法又称随机抽样技巧或统计试验方法,是一种模拟技术,即通过对每一随机变量进行抽样,将其输入数据模型中,经模拟计算输出函数值。经过 N 次独立模拟试验后,得到函数的 N 组样本数据。通过对这些样本数据的统计分析,将 N 次模拟的结果用累计频率曲线和直方图来表示,最终可以确定函数的概率分布特征,包括函数的分布曲线,以及函数的数学期望、方差等重要的数学特征。

假设已知 n 个输入随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 服从某种概率分布,分别为 $P_1(X_1), P_2(X_2), \dots, P_n(X_n)$; m 个输出随机变量 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 服从某种概率分布,分别为 $P_1(Y_1), P_2(Y_2), \dots, P_m(Y_m)$,则蒙特卡罗模拟的一般模型如图 4 所示。

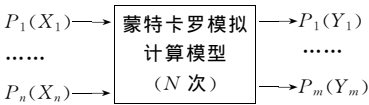


图 4 蒙特卡罗模拟模型

(2)模拟预警模型建立。

本预警系统的预警模型采用蒙特卡罗模拟的方法,通过对水泥混凝土路面设计中风险因素的分析 and 预警指标的确定,根据现行规范的规定,选择温度应力(δ_t)、荷载应力(δ_p)和水泥混凝土疲劳强度(δ_{rf})作为模拟模型的输入随机变量,选择预警指标

(P_s) 作为随机输出变量。

假设已知 $\delta_i \sim X_i(\mu_i, \sigma_i)$ 、 $\delta_p \sim X_p(\mu_p, \sigma_p)$ 、 $\delta_{rf} \sim X_{rf}(\mu_{rf}, \sigma_{rf})$, 则第 i 次模拟的水泥混凝土路面结构设计功能函数的值可表示为:

$$Z_i = \delta_{rf} - (\delta_p + \delta_i) \quad (8)$$

设经过 N 次蒙特卡罗模拟, 那么预警指标(P_s)可表示为:

$$P_s \approx \frac{n(Z \geq 0)}{N} \quad (9)$$

式中: $n(Z \geq 0)$ 为在模拟仿真中 $Z \geq 0$ 的次数。

根据上述分析, 建立水泥混凝土路面设计风险预警系统的模拟预警模型, 如图 5 所示。

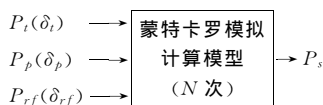


图5 水泥混凝土路面设计风险预警系统蒙特卡罗模拟预警模型

水泥混凝土路面设计风险预警系统蒙特卡罗模拟的基本步骤如图 6 所示。

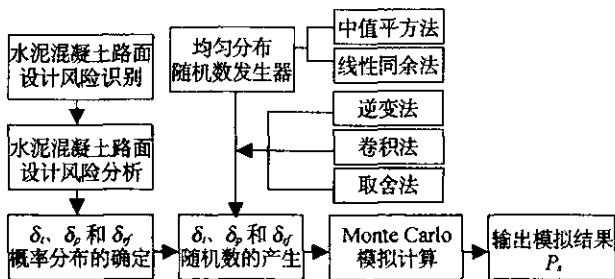


图6 水泥混凝土路面设计风险预警系统蒙特卡罗模拟步骤

2.3 水泥混凝土路面设计风险对策模块

通过以上的分析和模拟, 根据预警信号和决策者的风险偏好, 需采取不同的应对风险的对策, 指导水泥混凝土路面设计。

(1) 预防风险。

①教育法。加强设计人员在法规、规范、标准、前沿理论成果和设计方法等方面的教育。

②项目组织优化法。合理地选择设计小组的组成人员(比如在专业角度和能力角度上考虑)和领导方式。

(2) 减轻风险。

此对策的目标是降低风险发生的可能性或减少后果的不利影响。对于已知风险, 在最大程度上加以控制。例如, 在路面设计过程中, 出现红灯预警信号时, 可考虑增加水泥混凝土面板的厚度或增加基层

的强度等措施来优化设计。

(3) 自留风险。

自留风险是指项目主体自愿承担风险后果的一种风险应对策略。如当三、四级公路路面在设计过程中出现黄灯预警信号时, 项目主体认为可以接受, 这样就由其主体承担风险损失。

(4) 后备措施。

有时候在实际的施工过程中, 会出现地质或水文条件跟勘察时不一致的风险。为了预防此风险, 可以在设计时先制定后备方案或措施。

2.4 水泥混凝土路面设计风险后评价模块

通过对水泥混凝土路面设计风险的分析、风险预警模块的建立以及风险对策的实施后, 需要对路面设计的效果进行后评价。水泥混凝土路面设计风险后评价, 主要包括以下几个内容。

(1) 对水泥混凝土路面风险指标体系进行测评, 查漏补缺, 完善该指标体系, 使该体系在不断改进的过程中全面化和系统化。

(2) 对风险预警模型的评价, 通过改进模型, 尽量减少因模型假设、输入变量不全等引起的风险, 提高预警模型的预警准确度。

(3) 核对采取的对策和措施的实际效果是否与预见的相同, 寻找机会改善和细化风险规避计划, 获取反馈信息, 以便将来的决策更符合实际。

(4) 当那些新出现的以及预先制定的策略或措施不见效, 或性质随着时间的推延而发生变化的风险进行控制。

(5) 对进行风险预警所投资的费用和减少风险所带来的收益, 进行经济效益后评价。

3 结语

水泥混凝土路面设计风险预警系统, 是在结合路面可靠度设计理论和工程项目风险管理理论、方法的基础上提出的, 既是对路面设计风险管理的一种创新和扩展, 同时又是对此的一种探索, 具有很强的实用性、指导性和实践性, 值得广泛研究和尝试。

参考文献:

- [1] GB/T 50283—1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [2] JTG D40—2002, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [3] 黄晓明. 水泥路面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[4] 姚祖康. 公路设计手册——路面[M]. 北京:人民交通出版社,1999.

[5] R E Melchers. Structural reliability analysis and prediction [M]. Chichester: EllisHorwood Limited, 1987.

[6] 李硕,王秉纲,戴经梁. 可靠度理论和方法在水泥混凝土路面设计中的应用[J]. 西安公路学院学报,1991,(2).

[7] 侯子仪. 水泥混凝土路面结构在承载力极限状态下的可靠度分析[J]. 中国公路学报,1991,(4).

[8] Michael I Darter. Application of Statistical methods to the design of pavement system[R]. TRR report 575, 1976.

[9] 林忠民. 工程结构可靠度设计与估计[M]. 北京:人民交通出版社,1990.

[10] 交通部公路规划设计院,同济大学. 水泥混凝土路面设计理论和方法参数研究[Z]. 1986.

[11] 袁士斌. 路面结构可靠度分析及应用[J]. 公路与汽运,2005,(8).

[12] JTG B01—2003,公路工程技术标准[S].

[13] 王卓甫. 工程项目风险管理——理论、方法和应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[14] 卢有杰,卢家仪. 项目风险管理[M]. 北京:清华大学出版社,1998.

[15] 李惠强,吴静. 深基坑支护结构安全预警系统研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2002,(1).

[16] 黎毅,黄辉,顾丽琴. 铁路运输业预警信号系统的研究[J]. 铁道运输与经济,2001,(12).

A Study on Risk Early Warning System of Cement Concrete Pavement Design

ZHOU Zhi¹, DAI Chong-si¹, FANG Ming-zhun²

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Wehzhou Cangnan Communication Design Institute, Wenzhou 325000, China)

Abstract: In terms of project risk management and on the basis of the theory and method of cement concrete pavement reliability design, the uncertain factors in the process of cement concrete pavement design are systematically analyzed, the index system of cement concrete pavement design risk is established, the risk early warning index, its threshold value and relevant risk early warning signal are defined. The theory and method of Monte Carlo are applied to establish design risk early warning model of the cement concrete pavement, which improve the capacity to withstand the cement concrete pavement design risk.

Key words: cement concrete pavement; design; reliability; risk analysis; risk early warning; Monte Carlo simulation

沿海高速公路成苏北经济推进器

沿海高速公路是江苏首轮规划建设的“四纵四横四联”高速公路主骨架中的“纵一”的重要组成部分,2006年11月2日建成通车。该路竣工通车后,公路建设效应凸显。依托沿海黄金走廊的交通优势,江苏连云港化工产业园、全国知名船舶建造集中区拔地而起,已有12个超亿元企业陆续落户沿线的灌南县化工园区,中化、中港、中通等“中”字头大型企业等一大批项目也纷至沓来,灌河临港产业带步入了发展的快车道。沿海高速公路的建成也促使苏北县域经济快速融入了“长三角”,加速了苏北经济振兴进程,位于公路旁的连云港化工产业园去年新引进项目32个,投资总额29.5亿元,同比增长35%,公路沿线的灌南县农村人均纯收入也首次达到4200元。