

文章编号:1671-6833(2005)04-0066-03

水泥混凝土路面结构耐久性设计研究

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 200092; 2. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002; 3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 确保路面结构的使用寿命是当前道路工程领域面临的重要研究课题. 在前人研究成果的基础上, 通过引入动态可靠度指标和路面结构耐久性设计系数, 建立了水泥混凝土路面结构耐久性设计验算模型, 该模型与我国现行的《公路水泥混凝土路面设计规范》给出的设计表达式相协调, 便于实际应用, 并结合应用示例进行验证.

关键词: 水泥混凝土路面; 路面设计; 耐久性

中图分类号: TU 416.216; U 414.18 **文献标识码:** A

0 引言

在交通运输事业快速发展的今天, 一直被认为耐久性良好的水泥混凝土已成为公路建设中最广泛的材料之一^[1]. 但随着水泥混凝土的广泛使用, 越来越多的工程事例表明: 水泥混凝土并非是一种长寿命的工程材料, 除了超载和施工质量可能引起现役路面发生破坏之外, 水泥混凝土的耐久性是否得到保证也是个关键问题. 由于公路路面结构所处的使用环境与自然环境复杂、恶劣, 除承受车辆荷载作用外, 还不断地承受着温度变化、冲刷、磨耗、冰冻、水的渗入等作用, 导致许多水泥混凝土路面的使用寿命往往达不到设计寿命就出现了不同程度的损坏, 不得不投入巨额资金进行维修或重建. 由此可见, 水泥混凝土的耐久性问题已成为确保混凝土道路质量的核心问题之一^[2]. 水泥混凝土路面耐久性的研究主要包括水泥混凝土路面材料研究和路面结构组合设计方法研究, 目前大量研究主要集中在路面材料方面, 而对路面结构耐久性设计方法研究的较少. 本文将在前人研究成果的基础上, 对水泥混凝土路面结构耐久性设计方法进行探讨.

1 水泥混凝土路面结构耐久性设计方法

1.1 水泥混凝土路面结构耐久性定义

我国《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)^[3]中对结构可靠性的预定功能

定义为结构的安全性、适用性和耐久性, 所谓结构的耐久性是指结构在要求的目标使用期内, 不需要花费大量资金加固处理而能保证其安全性和适用性的能力^[4]. 结构的耐久性主要反映结构使用的时间问题, 即反映了结构动态可靠性的变化过程. 参照混凝土结构耐久性的定义, 水泥混凝土路面结构耐久性可以表述为: 路面结构在设计使用年限内, 不需花费大量维修费用而保持其行车安全性、适用性和外观要求的能力.

1.2 水泥混凝土路面耐久性设计方法

根据现行的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D 40—2002)^[5], 水泥混凝土路面结构设计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的极限状态, 其表达式为

$$\gamma(q_r + q_t) \leq f_r \tag{1}$$

式中: γ 为可靠度系数, 依据所选的目标可靠度及变异水平等级可按照规范^[5]确定; q_r 为行车荷载疲劳应力, MPa; q_t 为温度梯度疲劳应力, MPa; f_r 为水泥混凝土弯拉强度标准值, MPa, 具体的 q_r, q_t, f_r 计算方法可参见文献^[5].

定义 $S_{pr} = \gamma(q_r + q_t)$ 为水泥混凝土路面的广义荷载效应, $R_{pr} = f_r$ 为水泥混凝土路面的广义抗力, 则有

$$S_{pr} \leq R_{pr} \tag{2}$$

参考文献^[4]引入水泥混凝土路面结构耐久性设计系数, 式(2)可改写为

收稿日期: 2005-08-14; 修订日期: 2005-10-08

基金项目: 河南省杰出青年科学基金资助项目(0412002500); 河南省教育厅自然科学研究项目(2001580001).

作者简介: 刘文(1978-), 女, 山西晋中人, 同济大学在读博士研究生, 主要从事道路与机场工程研究.

$$S_{pr} \leq \eta_b R_{pr} \tag{3}$$

式中： η_b 为水泥混凝土路面结构耐久性设计系数，可用数字表格或函数的形式在规范中给出， η_b 的计算方法如下。

根据文献 [4] 和 [9] 的研究，耐久性系数 η_b 可表示成可靠度指标 $R(t)$ 的函数，即

$$\eta_b = f(R(t)) \tag{4}$$

具体的函数表达式为 [4]

$$\eta_b = \eta_b(t) = \frac{\beta_0}{\beta_0 + \beta_{T_s} - R(t)} \tag{5}$$

式中： β_0 为现行规范设计公式的可靠度指标，可从规范查得； β_{T_s} 为设计路面结构服役期 T_s 年时应具有的可靠度指标，根据文献 [7] 并参考已有的路面结构耐久性研究成果，可假定拟设计的高等级水泥混凝土路面（高速公路或一级公路）初期结构可靠度指标不下降（前 10 年），设计基准期 30 年后期的可靠度指标由 β_0 线性递减到 $0.9\beta_0$ ，即有

$$\beta_{T_s} = \begin{cases} \beta_0 & (t < 10) \\ [\beta_0(1 - 0.005(t - 10))] & (10 \leq t \leq 30) \end{cases}$$

式中： $R(t)$ 为路面结构可靠度指标随时间变化函数，与结构的作用、结构抗力、环境因素等客观条件有关，一般按指数规律进行衰减 [8~10]，其规律需做大量的路况调查和观测来确定。一般形式为

$$R(t) = \alpha_1 \beta_0 \{1 - \exp[-(\alpha_2/t)^{\alpha_3}]\} \tag{6}$$

式中： α_1 为统计参数，利用路段状况调查数据统计回归给出； α_2 、 α_3 为交通轴载、结构强度、面层厚度、基层类型、环境状况、材料类型等的函数。其中 α_2 为路面寿命因子，数学含义是可靠度 $R(t)$ 衰减到初值的 63.2% 时的路面使用年数，其大小反映了路面使用寿命的长短，结合实测数据的分析和工程经验，一般取值 3~15 之间； α_3 为路面性能衰变模式因子，决定了路面可靠度衰变曲线的形状，其大小决定了路面的可靠度衰变模式，一般取值 0.2~2.0 之间。

2 应用举例

公路自然区划 II 区拟建一条二级公路，路基为粘质土，采用普通混凝土路面，路面宽 9 m。经交通调查得知，设计车道使用初期标准轴载日作用次数为 2 100，试设计该路面厚度。

(1) 交通分析：查规范 [3] 可知，二级公路的设计基准期为 20 年，安全等级为三级，设计基准期内设计车道标准荷载累计作用次数为 9.885×10^6

次，属重交通等级。

$$N_e = \frac{N_s[(1 + g_r)^t - 1] \times 365}{g_r}$$
$$\eta = \frac{2\,100 \times [(1 + 0.05)^{20} - 1] \times 365}{0.05} \times 0.39$$
$$= 9.885 \times 10^6 \text{ 次}$$

式中： N_e 为标准轴载累计作用次数； t 为设计基准期； g_r 为交通量年平均增长率，可按公路等级和功能以及所在地区的经济和交通发展情况通过调查分析确定，这里取 0.05； η 为临界荷位处的车辆轮迹横向分布系数，按文献 [5] 的规范选用，本文取 0.39。

(2) 初拟路面结构：根据设计经验，初拟普通混凝土面层厚度为 $h = 0.24 \text{ m}$ ，基层选用水泥稳定粒料厚 0.18 m，垫层为厚 0.15 m 低剂量无机结合料稳定土，混凝土板的平面尺寸为宽 4.5 m，长 5.0 m。纵缝为设拉杆平缝，横缝为设传力杆的假缝。

(3) 路面材料参数确定：取普通混凝土面层的弯拉强度标准值 $f_r = 5.0 \text{ MPa}$ ，相应的弯拉弹性模量标准值为： $E_c = 31 \text{ GPa}$ ，经计算可知： $E_t = 156 \text{ MPa}$ ，普通混凝土面层的相对刚度半径为 $r = 0.537h^3 \sqrt{E_c/E_t} = 0.738 \text{ m}$ 。

(4) 荷载疲劳应力：据规范 [5]，标准轴载在临界荷位处产生的荷载应力为 $q_s = 0.077r^{0.6}h^{-2} = 0.077 \times 0.738^{0.6} \times 0.24^{-2} = 1.114 \text{ MPa}$ 。

因纵缝为设拉杆平缝，接缝传荷能力的应力折减系数 $k_r = 0.87$ ；考虑设计基准期内荷载应力累计疲劳作用的疲劳应力系数 $k_f = N_e = (9.885 \times 10^6)^{0.057} = 2.504$ ，其中 v 为与混合料性质有关的指数，对于普通混凝土、钢筋混凝土取 $v = 0.057$ ；根据公路等级，由文献 [5] 中表 B.1.2，考虑偏载和动载等因素对路面疲劳损坏影响的综合系数 $k_c = 1.2$ ，则荷载疲劳应力为

$$q_r = k_r k_f k_c q_s = 2.912 \text{ MPa}$$

(5) 温度疲劳应力：按照规范 [3] 可知，对于自然区划：II 区最大温度梯度取 $T_g = 88^\circ\text{C}/\text{m}$ ， $l/r = 6.502$ ，查普通混凝土板厚 $h = 0.24 \text{ m}$ 对应的温度应力系数 $B_x = 0.64$ ，最大温度梯度时混凝土板的温度翘曲应力为

$$q_m = \frac{\alpha E_c h T_g}{2} B_x = \frac{1 \times 10^{-5} \times 31\,000 \times 0.24 \times 88}{2} \times 0.64$$
$$= 2.095 \text{ MPa}$$

式中： α 为混凝土的线膨胀系数，通常取 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。温度疲劳应力系数为

$$k_t = \frac{f_r}{q_m} \left[a \left(\frac{q_m}{f_r} \right)^c - b \right] = \frac{5.0}{2.095} \times \left[0.828 \times \left(\frac{2.095}{5.0} \right)^{1.323} - 0.041 \right] = 0.527.$$

式中: a, b, c 为回归系数, 按所在地区公路自然区划查规范确定.

路面的温度疲劳应力为: $q_t = k_r q_m = 1.105 \text{ MPa}$.

(6) 耐久性计算: 按规范^[3]规定, 二级公路三级安全等级中级变异水平相应的目标可靠度为 85%, 可靠度系数 $\beta_0 = 1.13$, 近似取 $\beta_{Ts} = \beta_0$, 根据统计资料^[2, 8, 9, 10]得到 $R(t)$ 的计算公式为

$$R(t) = 1.94734 \cdot \beta_0 \{ 1 - \exp[-(9.031/t)^{0.60359}] \}.$$

由公式(5)计算得到耐久性设计系数 $\eta = 0.9079$. 按照式(3): $S_R = r_r(q_r + q_t) = 4.539 < \eta R_r = \eta f_r = 4.5395 \text{ MPa}$, 满足要求. 因而, 所选普通混凝土面层厚度 ($h = 0.24 \text{ m}$) 可以承受设计基准期内荷载应力和温度应力的综合疲劳作用.

3 结束语

随着时间的推移, 水泥混凝土路面结构使用性能在不断恶化, 路面结构可靠度指标随时间也在不断衰减. 因此, 为了确保路面结构的使用年限, 对路面结构进行耐久性设计十分必要. 根据混凝土结构耐久性设计的概念, 通过引入耐久性设计系数 η 的途径, 建立了水泥混凝土路面结构耐

久性设计方法, 文末结合某地区的局部实测数据和设计要求, 进行了应用研究. 结果表明: 应用建议的模型进行水泥混凝土路面结构的耐久性设计是可行的. 当然, 由于影响水泥混凝土路面耐久性的因素较多, 目前还缺乏大量的水泥混凝土路面结构使用性能的检测数据, 因此本文中所建立的模型和取得的参数尚有待于进一步完善.

参考文献:

[1] 陈拴发, 胡长顺. 公路结构物水泥混凝土耐久性研究动态[J]. 公路, 2003, (5): 122~127.
[2] 傅智, 罗翥. 公路工程混凝土结构耐久性新规定[J]. 公路, 2003, (2): 98~103.
[3] GB 50068-2001. 建筑结构可靠度设计统一标准[S].
[4] 李田, 刘西拉. 混凝土结构的耐久性设计[J]. 土木工程学报, 1994, 27(2): 47~55.
[5] JTG D40-2002. 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
[6] 战高峰. 冰冻区水泥混凝土路面病害防治及结构可靠性优化设计方法研究[D]. 长春: 吉林工业大学, 2000.
[7] 战高峰. 公路水泥混凝土路面耐久性分析方法[J]. 东北公路, 2000, 23(3): 16~18.
[8] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
[9] 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): 512~518.
[10] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.

The Study of Durability Design of Cement Concrete Pavement

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: Doing research on the life-span of pavement structure is an important task in the field of road engineering. Based on some former researches, the paper proposes a durability design model of cement concrete pavement through the dynamic reliability index and the durability coefficient. The established model corresponds well with the design expression of the current design specification code of cement concrete pavement in China. And it is easy to use for practical application in design. A case study about the durability design method of cement concrete pavement is shown in the end.

Key words: cement concrete pavement; pavement design; durability