

文章编号:1671-8879(2009)01-0050-04

在役混凝土桥梁可靠度分析

闫磊¹, 吕颖钊², 贺拴海¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 杭州市公路管理局, 浙江 杭州 310004)

摘 要:桥梁结构在环境荷载与服役荷载的共同作用下,随着龄期的延长,出现耐久性能退化、承载能力降低的现象,利用可靠度方法研究了结构抗力的时变性能。通过建立荷载效应概率模型,实现对在役混凝土桥梁可靠度的分析。采用该方法对一座服役 32 年的钢筋混凝土简支 T 型梁桥进行了分析。结果表明,评估基准期内该桥梁结构的可靠指标的降低与抗弯抗力衰减规律一致,继续服役 6 年后结构的抗弯可靠指标不符合要求,需进行抗弯维修加固。

关键词:桥梁工程;可靠度;抗力时变概率模型;荷载效应概率模型;变量随机性

中图分类号:U448.33 **文献标志码:**A

Reliability of existing concrete bridge

YAN Lei¹, LU Ying-zhao², HE Shuan-hai¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. Hangzhou City Administration of Highway, Hangzhou 310004, Zhejiang, China)

Abstract: Under the action of natural environment and service load, the concrete bridges have the degeneration of durability and the degradation of bearing capacity. The features of time-variety for the structural anti-force are studied by reliability analysis. A load effect probability model is developed to evaluate the reliability of existing concrete bridge. A 32-year-old concrete bridge is evaluated by this method as an example. The results show that the decay discipline of reliability is consistent with the one of bending resistance, its reliability indices of bending bearing capacity can not meet the demand of Chinese standard, the existing concrete bridge needs to be strengthened. 5 figs, 9 refs.

Key words: bridge engineering; reliability; time-variety probability model for bearing capacity; loading effect probability model; random of variable

0 引 言

在役混凝土桥梁在自然环境和不断增加的交通量及车辆荷载作用下,随着时间的推移,将会出现不同程度的损伤。这些损伤的累积,必然导致桥梁性能劣化和耐久性降低、承载能力下降,影响其正常使用。利用可靠度方法对在役桥梁的服役性能进行评

价,并在此基础上进行维修加固,已引起广泛关注^[1,2]。国内外学者^[3]通过研究后续服役期可变荷载的取值时发现,以设计时的抗力与荷载概率模型来分析具有一定龄期的混凝土桥梁可靠度,不能反映结构的真实服役状态。桥梁自建设阶段开始,结构的抗力就表现出明显的时变特征,同时,荷载交通量及超重车辆的逐渐增加^[4],使得对在役桥梁可靠

收稿日期:2008-02-15

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2007 318 822 31)

作者简介:闫磊(1979-),男,山西运城人,讲师,工学博士研究生,E-mail:YI.96955@126.com。

度分析显得十分复杂。为此,本文综合现有的研究成果,从服役桥梁耐久性损伤及荷载变化规律的角度出发,通过建立结构的抗力时变概率模型和荷载效应概率模型,进一步分析结构的可靠度,在一定程度上能较真实地反映结构的可靠度水平。

1 抗力时变概率模型

服役桥梁自建成时就受环境荷载的作用,桥梁构件会随着时间变化出现不同程度的耐久性损伤,具体包括:混凝土碳化、混凝土抗压强度经时变化、钢筋截面锈蚀、锈蚀钢筋屈服强度降低和锈蚀钢筋-混凝土协同工作性能下降等因素。这些累计损伤达到一定程度时,将对结构抗力造成影响。以抗力衰减函数来反映各个因素的共同作用是一个较综合的方法,其原理可表述为

$$R(t) = \varphi(t)R(t_0) \quad (1)$$

式中: $R(t)$ 为构件抗力随机过程; $\varphi(t)$ 为抗力衰减函数; $R(t_0)$ 为当前时刻抗力; t_0 为当前时刻。

本文在考虑抗力计算时各个参数随时间变化的基础上,利用混凝土耐久性计算模型对各个参数进行修正,从而建立考虑耐久性损伤的在役桥梁构件的抗力衰减概率模型

$$R(t) = K_{TF}(t)K_P R_P(f_{mi}(t), a_i(t), k_{bs_i}(t)) \quad (2)$$

式中: $K_{TF}(t)$ 为考虑抗力参数测试及预测影响的随机过程; K_P 为抗力计算模式不定性随机变量; $R_P(\cdot)$ 为《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定的抗力函数; $f_{mi}(t)$ 、 $a_i(t)$ 分别为基于测试的第 i 种材料性能和几何参数的预测值; $k_{bs_i}(t)$ 为第 i 根钢筋协同工作系数的预测值。

以 T 型截面为例,依据式(2),其抗弯抗力模型 $R_M(t)$ 可表示为

$$R_M(t) = K_{TF}(t)K_P k_c(t)r_{atio} f_{ck} \{b(t)x(t)[h_0(t) - \frac{x(t)}{2}] + [b'_1(t)b(t)]h'_1(t)[h_0(t) - \frac{h'_1(t)}{2}]\} \quad (3)$$

$$x(t) = \{k_{bs}(t)k_{ys}(t)f_{sk}[1 - \eta_s(t)]A_s - k_c(t)r_{atio} f_{ck} h'_1(t)[b'_1(t) - b(t)]\} / [k_c(t)r_{atio} f_{ck} b(t)] \quad (4)$$

式中: $k_{bs}(t)$ 为锈蚀钢筋-混凝土协同工作系数; $k_{ys}(t)$ 为锈蚀钢筋屈服强度降低系数; $\eta_s(t)$ 为钢筋截面锈损率; $k_c(t)$ 为混凝土强度修正系数; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值(MPa); $h'_1(t)$ 、 $b'_1(t)$ 分别为受压区翼缘厚度和宽度(mm); $h_0(t)$ 、 $b(t)$ 分别为截面有效高度和宽度(mm); A_s 为受拉区纵向普通钢筋的截面面积(mm²); r_{atio} 为受弯构件受压区混凝土

矩形应力图所取应力与混凝土轴心抗压标准强度的比值,建议取值 0.8 ~ 0.9。

通常假定构件抗力服从对数正态分布。

2 荷载及荷载效应概率模型

2.1 恒载及恒载效应

恒载属于永久荷载,随时间的变化很小,可近似认为在继续使用期内保持恒定的值,可以选用随机变量概率模型来描述。一般认为,结构恒载服从正态分布,依据文献[5],恒载的统计参数 $k_G = 1.0148$, $\delta_G = 0.0431$ 。恒载效应与恒载之间一般按线性关系考虑,恒载效应概率模型 $F_{SG}(x)$ 选取与恒载相同的概率模型,其概率分布和统计参数为

$$F_{SG}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{SG}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x - \mu_{SG})^2}{2\sigma_{SG}^2}\right] dx \quad (5)$$

$$\mu_{SG} = k_{SG} S_{GK}, \sigma_{SG} = \mu_{SG} \delta_{SG} \quad (6)$$

式中: S_{GK} 为构件恒载效应标准值; μ_{SG} 、 σ_{SG} 、 δ_{SG} 分别为构件恒载效应的平均值、标准差和变异系数; k_{SG} 为统计参数。

2.2 活载及活载效应

对于可变荷载,在各种组合中,汽车荷载占有重要地位,且随时间变异性较大,本文重点针对汽车荷载概率模型进行研究。在桥梁的实际运营状态中,汽车荷载随时间变化而变化,应采用随机过程模型来描述,以满铺平稳二项随机过程描述汽车荷载,见图1。其中: $S(t)$ 为活载效应随机过程; t 为时间。

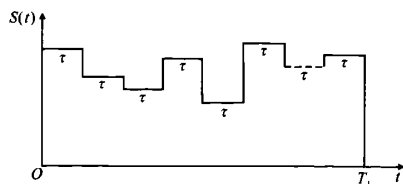


图1 满铺平稳二项随机过程

但在可靠度分析中,极限状态功能函数的各个基本变量都采用随机变量来描述,为了分析上统一,需将汽车荷载随机过程转换成随机变量。对于满铺平稳二项随机过程,荷载在每一时段 τ 上必然出现,那么在评估基准期内,汽车荷载最大值随机变量的概率分布函数为

$$F_{qT_1}(x) = [F_q(x)]^r \quad (7)$$

式中: T_1 为评估基准期(年); $F_q(x)$ 为汽车荷载的截口概率分布; r 为时段数, $r = T_1/\tau$; τ 为时段长度,一般取 1 年。

式(7)表明,实际桥梁的汽车荷载与评估基准

期密切相关。另外,实际桥梁的汽车荷载与相应的标准汽车荷载(如公路-I级标准荷载)之间的差异也是明显的,在桥梁的运营过程中,特别是在一些特殊线路上的桥梁,超载现象是存在的。考虑这两方面因素,在役桥梁汽车荷载效应的概率模型可描述为

$$S_q(T_1) = K_{sq}(T_1)\zeta_q S_{qk} \quad (8)$$

式中: $S_q(T_1)$ 为汽车荷载效应评估值; $K_{sq}(T_1)$ 为考虑评估基准期 T_1 的汽车荷载效应与 S_{qk} 比值的随机变量,服从极值I型分布; ζ_q 为活载影响修正系数; S_{qk} 为按标准汽车荷载计算的效应值,一般运行状态采用公路-II级标准荷载,密集运行状态采用公路-I级标准荷载。

由式(8)可得汽车荷载效应的统计参数

$$\mu_{S_q(T_1)} = \mu_{K_{sq}(T_1)} \zeta_q S_{qk} \quad (9)$$

$$\delta_{S_q(T_1)} = \delta_{K_{sq}(T_1)} \quad (10)$$

式中: $\mu_{S_q(T_1)}$ 、 $\delta_{S_q(T_1)}$ 分别为汽车荷载效应的均值和变异系数; $\mu_{K_{sq}(T_1)}$ 、 $\delta_{K_{sq}(T_1)}$ 分别为汽车荷载效应与 S_{qk} 比值的均值和变异系数。

这里,评估基准期 T_1 为确定评估荷载的时间参数,可由“等超概率准则”得出

$$T_1 = MT/N \quad (11)$$

式中: T 为设计基准期; M 为继续使用期; N 为设计使用期。

$K_{sq}(T_1)$ 的概率分布可由汽车荷载的截口概率分布函数与评估基准期内最大值的概率分布函数关系得到

$$F_{sq}(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (12)$$

$$F_{sq}(x, T_1) = \exp\left[-\exp\left(\frac{x-\beta_{T_1}}{\alpha_{T_1}}\right)\right] \quad (13)$$

式中: $F_{sq}(x)$ 、 $F_{sq}(x, T_1)$ 分别为截口概率分布函数和评估基准期内最大值的概率分布函数; α 、 β 均为截口分布参数; α_{T_1} 、 β_{T_1} 均为评估基准期最大值分布参数,对应关系为

$$\alpha_{T_1} = \alpha, \beta_{T_1} = \beta + \alpha \ln(T_1) \quad (14)$$

对于活载影响修正系数 ζ_q ,根据已有研究成果,并考虑局部区域的重载交通量的影响,可表示为

$$\zeta_q = \sqrt[3]{\zeta_{q1}\zeta_{q2}\zeta_{q3}} \quad (15)$$

式中: ζ_{q1} 为交通量的活载影响修正系数; ζ_{q2} 为大吨位车辆混入率的活载影响修正系数; ζ_{q3} 为轴荷分布的活载影响修正系数。

3 可靠度指标计算

在恒载与汽车荷载的基本组合下,在役混凝土

桥梁的极限状态方程 $Z(t)$ 可表示为

$$Z(t) = R(t) - S_G - K_{sq}(T_1)\zeta_q S_{qk} \quad (16)$$

其中 S_G 为构件恒载效应值。

根据式(16),可按照点可靠度的方法计算在役混凝土梁桥的可靠指标。

研究发现,JC法(验算点法)在计算可靠指标时,只适用于验算点附近功能函数非线性程度不高的情况。当功能函数的非线性程度(当量正态化后)较高时,这种方法有时不能保证收敛,计算结果会出现不稳定的摆动^[6]。本文经过编程及大量试算发现,文献[6]的优化方法具有较好的适用性,其原理是,利用映射变换法将原来的随机变量转换到标准正态空间,然后通过选取适当的步长 λ ,使得迭代过程趋于收敛,且计算结果能满足工程精度要求。

4 实例分析

某钢筋混凝土简支T型梁桥始建于1975年,单孔计算跨径为16.8 m,桥宽为8.5 m,横桥向5片T型梁。该桥所处环境年平均相对湿度为71%,年平均温度为13.3℃。当前评估荷载等级为公路-II级。试对该桥进行可靠性评价。

根据外观检查和初步计算,选取状况较差的主梁进行可靠度分析,限于篇幅,仅对抗弯可靠指标进行分析。

设桥梁的设计使用期 N 为50年,继续使用期 M 为30年,则由式(11)可知评估基准期 T_1 为60年,由此确定评估荷载,抗力取预测时点的抗力。

根据实测数据并结合计算,T型梁桥的 k_c 、 η_s 、 k_{bs} (钢筋协同工作系数预测值)、 k_{ys} 随时间变化规律如图2所示。其中:混凝土碳化计算采用牛荪涛碳化模型; k_c 计算采用牛荪涛的一般大气环境下混凝土强度经时变化模型; η_s 计算采用牛荪涛钢筋锈蚀简化模型; k_{bs} 计算采用牛荪涛协同工作系数简化模型^[7]; k_{ys} 计算采用惠云玲钢筋屈服强度降低系数模型。

根据正截面受弯抗力预测概率模型,抗弯抗力的均值和标准差随时间变化规律见图3(见下页)。 K_P 的统计参数为:均值1.098,变异系数0.071; $K_{TF}(t)$ 的统计参数为:均值1,变异系数 $0.1 \times (1 + 0.01t)$ 。

恒载效应:均值为572.3 kN·m,标准差为24.7 kN·m;可变荷载效应:考虑结构层次损伤(横向连接局部失效等),建立桥跨结构有限元分析模型,计算不利主梁横向分布系数;汽车荷载效应:按公路-II级计算,继续使用期内汽车荷载效应随时间的增长规律见图4(见下页)。

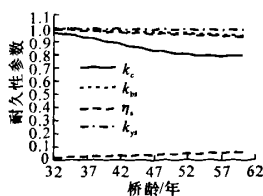


图2 耐久性参数随时间变化的曲线

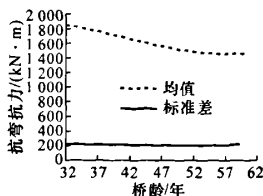


图3 抗弯抗力随时间变化的曲线

在评估时,显然应采用 $T_1 = 60$ 年(即 $M = 30$ 年)的汽车荷载效应,因为不能保证自当前时刻起第1年内就不出现10年乃至30年一遇的荷载。因此,评估基准期活载效应均值为 $406.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$,标准差为 $68.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。年活载效应极大值均值为 $189.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$,标准差为 $68.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。这里不考虑人群荷载作用。

主梁抗弯可靠指标随时间变化曲线如图5所示。由图5可见,抗弯抗力与抗弯可靠指标时变曲线的规律是一致的。主梁从当前到服役51年,抗弯抗力和抗弯可靠指标下降速度较快;在服役51年以后,由于纵向受力主筋锈蚀深度超过 0.3 mm ,锈蚀处钢筋与混凝土的粘结强度基本失效, k_{bs} 不再下降,因此抗弯抗力和抗弯可靠指标下降速度减缓^[8-9]。

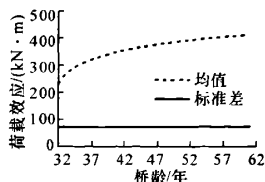


图4 汽车荷载效应随时间变化的曲线

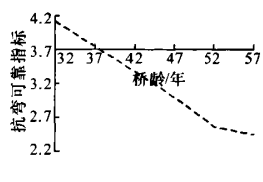


图5 主梁抗弯可靠指标随时间变化的曲线

当前主梁抗弯可靠指标为 4.2 左右,满足最低可靠指标要求;但在38年后主梁的抗弯可靠指标降至 3.7 以下,小于规范^[5]规定的延性破坏三级可靠度水平,故可认为该桥主梁抗弯剩余寿命为6年。

5 结 语

(1)考虑构件耐久性参数随时间变化,建立了在役桥梁构件的抗力时变概率模型,以T型截面抗弯抗力为例,给出了抗力预测模型的具体表达式。

(2)基于可变荷载样本函数为平稳二项随机过程,确定在役桥梁可变荷载效应模型;根据在役桥梁汽车荷载的特点,考虑评估基准期和活载影响修正系数两方面因素,建立了在役桥梁汽车荷载效应的概率模型。

(3)以一座服役32年的混凝土梁桥为例,采用

本文提出的抗力时变概率模型及汽车荷载效应概率模型,对其进行可靠度分析,结果表明,结构可靠指标的时变规律与抗弯抗衰减规律一致,该桥继续服役6年后结构的抗弯可靠指标小于规范要求,需进行抗弯维修加固。算例分析表明,本文方法可为在役混凝土桥梁运营状态的安全评估提供科学依据。

参考文献:

References:

- [1] 张健仁,王磊.既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法[J].中国公路学报,2006,19(2):49-55.
ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated approach to carrying capacity of existing reinforced concrete bridge member[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 49-55.
- [2] 刘小云,丛芳媛,王小陈.模糊可靠性疲劳寿命的分析与计算[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(1):99-102.
LIU Xiao-yun, CONG Fang-yuan, WANG Xiao-chen. Analysis and calculation of reliability fatigue life under fuzzy accumulative damage[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(1): 99-102.
- [3] 张俊芝,高兑现,李桂青.服役建筑结构可靠性评估的可变荷载取值研究[J].工业建筑,2000,30(12):58-61.
ZHANG Jun-zhi, GAO Dui-xian, LI Gui-qing. Study on the variable load value of reliability evaluation for existing architectural structures[J]. Industrial Construction, 2000, 30(12): 58-61.
- [4] 索清辉,钱永久.服役公路桥梁的时变可靠指标计算[J].交通运输工程学报,2006,6(1):69-71.
SUO Qing-hui, QIAN Yong-jiu. Time-dependent reliability index calculation of existed highway bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 69-71.
- [5] GB/T 50283—1999,公路工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [6] 贡金鑫.结构可靠指标求解的一种新的迭代方法[J].计算结构力学及其应用,1995,12(3):369-373.
GONG Jin-xin. A new algorithm for solving the structural reliability index[J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1995, 12(3): 369-373.
- [7] 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.
- [8] Animesh D, Sankaran M. Reliability estimation with time-variant loads and resistances[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(5): 612-620.
- [9] 迪特莱夫森,麦德林.结构可靠度方法[M].何军,译.上海:同济大学出版社,2005.