

钢筋混凝土桥梁抗力模型的建立及应用

张俊娟¹, 穆卓辉²

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 内蒙古自治区交通建设工程质量监督局, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:对在役钢筋混凝土桥梁进行可靠度评估和寿命预测中,抗力是可靠度计算的重要因素,建立抗力模型至关重要。针对建立在役钢筋混凝土桥梁抗力模型的这一问题,分析了混凝土强度变化、钢筋锈蚀、混凝土与钢筋的粘结能力变化3大因素及其时变规律。考虑了锈蚀引起的钢筋力学性能降低,引入了基于纤维模型的计算模式不确定性参数,采用数学方法建立了钢筋混凝土桥梁抗力随时间衰减模型。引入某钢筋混凝土简支T梁桥进行了抗力模型的计算,验证了模型的可靠性。抗力衰减模型的建立为结构可靠性评估打下了基础。

关键词:在役结构; 抗力; 衰减模型; 可靠度评估; 钢筋混凝土桥梁

中图分类号:TV313

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)05-0186-06

Establishment and application of resistance decay model for reinforced concrete bridge

ZHANG Junjuan¹, MU Zhuohui²

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling 712100, China; 2. Bureau of Traffic Construction Engineering Quality Supervision of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China)

Abstract: In the reliability assessment and life prediction of existing reinforced concrete bridge in service, the resistance is an important factor for reliability calculation. So it is very important to establish resistance model. Aimed at the problem of building the resistance decay model of reinforced concrete bridge, the paper analyzed three factors such as concrete strength change, steel bar corrosion and the change of bond capability between concrete and steel bar and their time varying regularity. Considering the decay of steel bar mechanics property caused by corrosion was considered, it introduced the computational model of uncertainty parameter based on fiber model. The resistance decay model of reinforced concrete bridge was built by mathematical method. The paper introduced a simple bridge of existing reinforced concrete to calculate the resistance model, and verified the reliability of the model. The building of resistance decay model can lay the foundation for the reliability assessment of bridge.

Key words: existing structure; resistance; decay model; reliability assessment; reinforced concrete bridge

20世纪50年代以来,我国修建了大量的公路桥梁,在这些桥梁中,混凝土桥梁占有相当大的比例,然而随着服役期的增长,不少桥梁的性能在不断劣化,原因主要有材料的老化病害、公路荷载超限运输、以及设计标准的改变(依据旧规范设计的桥梁承担这新规范规定的增大的设计荷载)。桥梁性能的劣化引起使用寿命的缩短,因此对既有混凝土桥梁现状的评估和维修加固引起了工程技术人员的广

泛关注。

桥梁的评估方法有很多种,归纳起来有确定性方法和概率方法^[1],概率方法更为客观与科学,因此以概率理论为基础的可靠度评价法成为目前的研究热点,这一方法的本质是数学建模问题,如果建立了结构的抗力概率模型、荷载概率模型,就可以根据结构的功能函数计算出结构的失效概率,进而评估结构的可靠性。本文的研究内容即为抗力概率模型

的建立。要建立抗力概率模型,必须知道抗力的各影响因素。

钢筋混凝土桥梁抗力的主要影响因素为钢筋与混凝土的特性及两者间的相互作用。拟建结构的可靠性分析中,影响抗力的几个因素为随机变量。而现役结构的可靠性分析则必须考虑抗力的衰减,影响抗力的各因素为与时间有关的随机过程^[2]。为了获得抗力影响因素的时变规律,很多学者开展了研究,牛荻涛等^[3]统计分析了国内外暴露试验和实测数据,得出了混凝土强度的时变模型。李广慧等^[4]给出了钢筋锈蚀深度的时变模型,牛荻涛等^[5]给出了腐蚀钢筋屈服强度的时变模型。彭建新等^[6]给出了钢筋与混凝土粘结能力的衰减规律。李运生等^[7]提出了根据实测值对预测模型的修正方法。

王晓明等^[8]给出了在役结构抗力计算模式不定性统计参数。这些研究都为抗力衰减概率模型的建立打下了基础。有些学者也已经建立了抗力概率模型,如:Stewart^[9]、Coronelli等^[10],这些模型的缺陷是:未考虑锈蚀钢筋力学行为的改变;未考虑计算模式的不定性,或者沿用可靠度标准给定拟建结构的计算模式不定性系数,这个值只适合于主筋为Ⅱ级钢筋的矩形截面构件。

本文在总结前人研究的基础上,分析了抗力的各影响因素,考虑了锈蚀钢筋力学行为的改变,引用了王晓明等^[8]提出的在役结构计算模式的不定性系数,建立了钢筋混凝土桥梁抗力随时间衰减的概率模型。完成了结构的可靠性评估中的一个重要环节。

1 不考虑时变的抗力模型

材料性能、截面的几何尺寸、计算模式是影响强度计算的主要因素,在求解抗力统计参数前,必须确定这些因素的统计参数,然后利用误差传递求得结构抗力的统计参数。

1.1 材料性能统计参数

材料性能即强度、弹性模量、泊松比等物理性能,这些因素都具有随机性,所以材料性能为随机变量,本文主要用到的材料是钢筋与混凝土,其统计参数可直接查阅规范。

1.2 计算模式的统计参数

计算模式的不定性是指结构实际抗力与计算公式所求抗力之间的出入。结构计算模式的不定性如下:

$$\Omega_p = R^0/R^c \quad (1)$$

式中: R^0 为结构构件的实际抗力值; R^c 为按规范公式计算所得的抗力值(R^0 、 R^c 如果为弯矩则单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}$,如果为剪力则为 kN),对拟建结构, Ω_p 的均值与方差可直接查阅规范[11]。在役结构的可靠性评估中,抗力计算模式不确定性影响最大^[12],王晓明等^[8]给出了在役结构受弯构件基于纤维模型的参数。表1所示分别为两种方法的统计参数。

表1 计算模式不定性 Ω_p 的统计参数

各统计参数	μ_{Ω_p}	δ_{Ω_p}	σ_{Ω_p}
规范[11]方法	1.098	0.071	0.078
文献[8]方法	1.029	0.003	0.003

1.3 几何参数的统计参数

结构构件几何参数的不定性可用随机变量 Ω_a 表达:

$$\Omega_a = a/a_k \quad (2)$$

式中: a 为构件几何参数的实际值, mm ; a_k 为构件几何参数的标准值, mm 。对拟建结构, Ω_a 的统计参数可查规范[11],对已建结构,则可直接实测出构件几何尺寸的平均值 μ_a 及标准差 σ_a 。

1.4 抗力模型建立

抗力的模型可表达如下:

$$R = \Omega_p R(f_i, a_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: $R(f_i, a)$ 为规范公式抗力值(如果为弯矩单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}$,如果为剪力则为 kN); f_i 为第 i 种材料的材料强度标准值, MPa ; a_i 为相应第 i 种材构件的几何参数标准值, m 。得出抗力的均值 μ_R 与标准差 σ_R 如下:

$$\mu_R = \mu_{\Omega_p} R(\mu_{f_i}, \mu_{a_i}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$\sigma_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \right) \Big|_{\mu} \right]^2 \cdot \sigma_{X_i}^2 \quad (5)$$

式中: μ_{Ω_p} 为计算模式不定性参数的平均值; μ_{f_i} 为第 i 种材料强度的平均值, MPa ; μ_{a_i} 为第 i 种材料几何参数平均值, mm ; $\frac{\partial R}{\partial X_i} \Big|_{\mu}$ 表示函数 $R(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_i})$,对 X_i 的偏导数在平均值 $\mu(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_i})$ 处赋值; σ_{X_i} 为变量 X_i 的标准差; μ_R 、 σ_R 如为弯矩,则单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}$,如为剪力则单位为 kN 。

2 影响抗力衰减的主要因素

桥梁结构的抗力衰变为—复杂的不可逆过程,由于荷载的影响,结构会产生可见或者不可见的损伤。由于环境的影响,混凝土会产生碳化,混凝土碳

化主要是指 CO₂ 通过混凝土颗粒间的间隙侵入到结构内部,与水泥石中的碱性物质发生化学反应,碳化导致混凝土碱性的降低,最终导致钢筋表面钝化膜遭到破坏而腐蚀。而腐蚀会降低钢筋与混凝土之间粘结性,进而影响两者共同受力。本文主要考虑的因素为混凝土碳化、钢筋锈蚀、钢筋与混凝土之间粘结能力降低。

2.1 混凝土强度在一般大气条件下的经时变化

混凝土强度随时间变化有较明显变化,变化可分为上升段和下降段,在建成后 10 年左右的时间段内是随时间上升,而后逐渐降低,下降段的下降速度非常缓慢;强度标准差随时间增大。

牛荻涛等^[3] 统计分析了国内外暴露试验和实测数据,得出经年建筑物混凝土强度仍服从正态分布,于是建立了混凝土强度非平稳正态随即过程,得出混凝土强度平均值和标准差的模型,经过修正后得到以下模型。

$$\mu_{f_c}(t) = 1.4529\mu_{f_{c0}} e^{[-0.0246(\ln t - 1.7154)^2]} \quad (6)$$

$$\sigma_{f_c}(t) = \sigma_{f_{c0}}(0.0305t + 1.2368) \quad (7)$$

式中: $\mu_{f_{c0}}$ 为混凝土 28 d 强度平均值,MPa; $\sigma_{f_{c0}}$ 为混凝土 28 d 强度标准差,MPa, t 为时间,a。

2.2 钢筋截面面积衰减模型及统计参数

钢筋的锈蚀引起钢筋截面面积减小。在一般大气环境中,一般认为碳化到钢筋表面时钢筋表面钝化膜会破坏,从而引起钢筋锈蚀。碳化到达钢筋表面的时间 t_c (年) 为:

$$t_c = \frac{c^2}{k_c^2} \quad (8)$$

式中: c 为保护层厚度,mm; k_c^2 为碳化系数,计算公式^[8] 如下:

$$k_c = k_1 k_2 k_3 (24.48 / \sqrt{f_{cu,k}} - 2.74) \quad (9)$$

式中: k_1 为地区影响系数,北方取 1.0; k_2 为室内外影响系数,取 1.0; k_3 为考虑养护时间的系数,一般结构取 1.5。 $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值,MPa。

文献[4] 给出了开始锈蚀后钢筋锈蚀深度 $\delta(t)$ 的均值 $\mu_\delta(t)$,mm 和标准差 $\sigma_\delta(t)$,mm:

$$\mu_\delta(t) = \mu_\delta(t_0) e^{0.0004(t-t_0)^2} \quad (10)$$

$$\sigma_\delta(t) = \sigma_\delta(t_0) [1 + 0.025(t - t_0)] \quad (11)$$

式中: $\sigma_\delta(t_0)$,mm 和 $\mu_\delta(t_0)$,mm 分别为在 t_0 年的钢筋实测锈蚀深度均值和标准差; $t \in [t_0, t_0 + T']$, a; T' 为结构的评估目标基准期,a。根据误差传播原理,钢筋截面面积损失率的均值 $\mu_\eta(t)$ 和标准差 $\sigma_\eta(t)$

分别为:

$$\mu_\eta(t) = \frac{4\mu_\delta(t)}{d} - \frac{4\mu_\delta^2(t)}{d^2} \quad (12)$$

$$\sigma_\eta(t) = \sigma_\delta(t)^2 \left[\frac{16}{d^2} - \frac{32\mu_\delta(t)}{d^4} \right] \quad (13)$$

式中: d 为未锈蚀钢筋直径,mm。

2.3 钢筋锈蚀引起的力学性能改变

钢筋也会影响钢筋的力学性能,比如钢筋屈服强度、伸长率等指标均会降低。牛荻涛等^[5] 综合分析了实验资料,给出了腐蚀钢筋屈服强度均值 $\mu_{f_s}(t)$ 与标准差 $\sigma_{f_s}(t)$ 统计参数:

$$\mu_{f_s}(t) = (1 - 1.077\mu_\eta(t))\mu_{f_s} \quad (14)$$

$$\sigma_{f_s}^2(t) = [1 - 1.077\mu_\eta(t)]^2 \sigma_{f_s}^2 + 1.077\mu_{f_s}^2 \sigma_\eta^2(t) \quad (15)$$

式中: μ_{f_s} 、 σ_{f_s} 为未腐蚀钢筋屈服强度的均值与标准差,MPa,其值可查规范[11]。

2.4 混凝土碳化、钢筋锈蚀引起两者之间粘结能力改变

钢筋锈层会破坏钢筋表面与混凝土之间的化学胶结力、摩擦力、机械咬合力,所有这些因素都将导致钢筋和混凝土之间的粘结性能退化。试验证实,锈蚀量小于 5% 的构件,粘结力反而略有增加;锈蚀量较大的构件,应对抗力乘以一个粘结力衰减系数 $\phi(t)$,彭建新等^[6] 根据实验得出了随机变量 $\phi(t)$ 的统计参数:

$$\mu_\phi(t) = \begin{cases} 1.0 + 6.67\mu_\eta, & 0 \leq \mu_\eta \leq \mu_{\eta\text{limi}} \\ 1.21e^{(-1.06\mu_\eta)}, & \mu_\eta \geq \mu_{\eta\text{limie}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\sigma_\phi(t) = 0.12\mu_\phi(t) \quad (17)$$

式中: $\mu_{\eta\text{limi}} = 3\%$ 。

2.5 抗力衰减模型的修正

2.5.1 截面尺寸修正 混凝土截面尺寸应以实测为准,对损伤严重处(如混凝土风化剥落、撞击受损及可探测到的内部较大孔洞等)适当予以折减。折减方法为:可测出实际尺寸的平均值及标准差代入抗力模型进行计算。

2.5.2 材料强度的修正 如在 t_0 年统计出混凝土强度均值 $\mu_{f_{cu}(\text{实})}$ 及标准差 $\sigma_{f_{cu}(\text{实})}$,由预测模型式(6)、(7)计算出 $t = t_0$ 时刻的预测值为 $\mu_{f_{cu}}(t_0)$ 、 $\sigma_{f_{cu}}(t_0)$,则取

$$\Delta\mu_{f_{cu}}(t_0) = \mu_{f_{cu}(\text{实})} - \mu_{f_{cu}}(t_0) \quad (18)$$

$$\Delta\sigma_{f_{cu}}(t_0) = \sigma_{f_{cu}(\text{实})} - \sigma_{f_{cu}}(t_0) \quad (19)$$

据此对后续使用期混凝土强度进行同幅修正,修正后的强度均值 $\mu'_{f_{cu}}(t_0)$ 和标准差 $\sigma'_{f_{cu}}(t_0)$ 为^[7]:

$$\mu'_{f_{cu}}(t_0) = \mu_{f_{cu}} + \Delta\mu_{f_{cu}} \quad (20)$$

$$\sigma'_{f_{cu}}(t_0) = \sigma_{f_{cu}} + \Delta\sigma_{f_{cu}} \quad (21)$$

式中: $\mu_{f_{cu}(\text{实})}$ 、 $\sigma_{f_{cu}(\text{实})}$ 、 $\mu_{f_{cu}}(t_0)$ 、 $\sigma_{f_{cu}}(t_0)$ 、 $\Delta\mu_{f_{cu}}(t_0)$ 、 $\Delta\sigma_{f_{cu}}(t_0)$ 、 $\mu'_{f_{cu}}(t_0)$ 、 $\sigma'_{f_{cu}}(t_0)$, 单位均为 MPa。

3 考虑抗力时变的公路桥梁基本受力构件抗力模型

考虑上述因素,根据式(3)可得抗力衰减模型为:

$$R(t) = \Omega_p \phi(t) R(f'_i(t), a_i(t)) \quad (22)$$

式中: Ω_p 为计算模式不定性系数; $\phi(t)$ 为钢筋与混凝土之间粘结力衰减系数; $R(f_i, a_i)$ 为规范公式抗力值(抗力为弯矩时单位为 $\text{kN} \cdot \text{m}$,为剪力时则为 kN); $f'_i(t)$ 为第 i 种材料材料性能修正值, MPa; a_i 为相应第 i 种构件的几何参数实测值, mm。

在役结构抗力可以采用非平稳随机过程来描述,仍服从对数正态分布。抗力的平均值 $\mu_R(t)$ 与标准差 $\sigma_R(t)$ 分别为:

$$\mu_R(t) = \mu_{\Omega_i} \mu_{\phi}(t) R(\mu'_{f_i}(t), \mu_{a_i}(t)) \quad (23)$$

($i = 1, 2, \dots, n$)

$$\sigma_R(t) = \left[\left(\frac{\partial R(t)}{\partial X_i} \right)_{\mu} \right]^2 \times \sigma_{X_i}^2(t) \quad (24)$$

式中: $\mu_R(t)$ 、 $\sigma_R(t)$ 如为弯矩,则单位为 $\text{kN} \cdot \text{m}$,如为剪力则为 kN 。

4 实例计算

某钢筋混凝土简支 T 梁桥,横向由 5 片 T 梁组成,计算跨径为 19.5 m,混凝土标号为 25 号,钢筋采用 II 级钢筋,纵向主筋为 8 ϕ 32。T 梁横截面尺寸如图 1 所示。

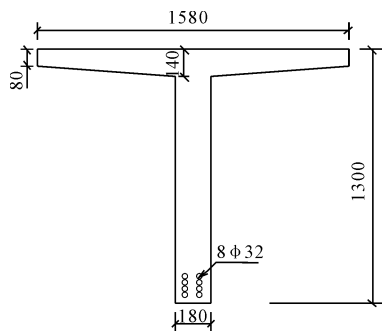


图 1 T 梁截面配筋图

此桥已使用 30 a,经实测,钢筋平均锈蚀深度 $\mu_{\delta}(t_0) = 0.04 \text{ mm}$, $\sigma_{\delta}(t_0) = 0.05 \text{ mm}$;采用回弹仪测试得到抗压强度实测值 $\mu_{f_{cu}(\text{实})} = 43.68 \text{ MPa}$,

$\sigma_{f_{cu}(\text{实})} = 10.5 \text{ MPa}$;梁外观尺寸经检测与标准值相等,要求:

(1)建立此梁弯曲抗力衰减模型,并求出不同年份抗力统计参数;

(2)本例中混凝土标号如果为 30 号,其他不变,求解不同年份的抗力统计参数。

4.1 老规范混凝土标号换算

老规范混凝土标号换算为新规范[13]混凝土强度等级可查阅文献[14],25 号混凝土对应 C23 混凝土。由规范[13]并经换算得 C23 混凝土 $\mu_{f_{cu}} = 32 \text{ MPa}$,由文献[15]经换算得 $\delta_{f_{cu}} = 0.17$,则 $\sigma_{f_{cu}} = 5.44 \text{ MPa}$ 。30 号混凝土对应 C28 混凝土,同理可求得 C28 混凝土 $\mu_{f_{cu}} = 37 \text{ MPa}$, $\delta_{f_{cu}} = 0.15$, $\sigma_{f_{cu}} = 5.55 \text{ MPa}$ 。

4.2 混凝土强度的统计参数

代入 C23 混凝土的 $\mu_{f_{cu}}$ 、 $\sigma_{f_{cu}}$ 、 $t = 30$ 到公式(5)、(6)式中,得 $\mu_{f_{cu}}(t_0) = 43.35 \text{ MPa}$, $\sigma_{f_{cu}}(t_0) = 11.7 \text{ MPa}$,再由式(18)、(19)得 $\Delta\mu_{f_{cu}} = 0.33 \text{ MPa}$, $\Delta\sigma_{f_{cu}} = -1.20 \text{ MPa}$,所以此梁混凝土立方体抗压强度

$$\begin{aligned} \mu'_{f_{cu}}(t) &= \mu_{f_{cu}}(t) + \Delta\mu_{cu} \\ &= 1.4529 \times 32e^{[-0.0246(\ln t - 1.7154)^2]} + 0.33 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{f_{cu}}(t) &= \sigma_{f_{cu}}(t) + \Delta\sigma_{f_{cu}} = 5.44(0.0305t + \\ &1.2368) - 1.20 \end{aligned} \quad (26)$$

然后换算为轴心抗压强度。表 2 为不同时刻 C23 混凝土强立方体抗压强度与轴心抗压强度的统计参数。

时间/a	立方体抗压强度		轴心抗压强度	
	$\mu'_{f_{cu}}(t)$	$\sigma'_{f_{cu}}(t)$	$\mu'_{f_c}(t)$	$\sigma'_{f_c}(t)$
30	43.68	10.51	28.99	7.83
40	42.57	12.16	28.25	8.13
50	41.62	13.82	27.61	9.24

4.3 钢筋截面面积衰减模型及统计参数

本例钢筋已经锈蚀,把实测 $\mu_{\delta}(t_0) = 0.04$ 、 $\sigma_{\delta}(t_0) = 0.05$ 及 $t_0 = 30$ 代入式(10)、(11),得:

$$\mu_{\delta}(t) = 0.04e^{0.0004(t-30)^2} \quad (27)$$

$$\sigma_{\delta}(t) = 0.05[1 + 0.025(t - 30)] \quad (28)$$

由式(12)、(13)得钢筋截面面积的损失率为:

$$\mu_{\eta}(t) = \frac{4\mu_{\delta}(t)}{32} - \frac{4\mu_{\delta}^2(t)}{32^2} \quad (29)$$

$$\sigma_{\eta}(t) = \sigma_{\delta}(t)^2 \left[\frac{16}{32^2} - \frac{32\mu_{\delta}(t)}{34^2} \right] \quad (30)$$

表3为不同时间钢筋截面面积损失率的统计参数。

表3 不同时间钢筋截面面积损失率的统计参数

时间/a	$\mu_\eta(t)$	$\sigma_\eta(t)$
30	0.0050	0.00004
40	0.0052	0.00006
50	0.0059	0.00009

4.4 钢筋锈蚀引起的力学性能改变

由规范查得 $\mu_{f_s} = 388.28$ MPa, $\sigma_{f_s} = 26.6$ MPa, 代入公式(14)、(15), 得:

$$\mu_{f_s}(t) = 388.28(1 - 1.077\mu_\eta(t)) \quad (31)$$

$$\sigma_{f_s}^2 = [1 - 1.077\mu_\eta(t)]^2 \times 26.6^2 + 1.077 \times 388.28^2 \times \sigma_\eta^2(t) \quad (32)$$

表4为不同时间钢筋屈服强度的统计参数。

表4 不同时间钢筋屈服强度的统计参数 MPa

时间/a	$\mu_{f_s}(t)$	$\sigma_{f_s}(t)$
30	386.19	26.46
40	386.11	26.63
50	385.81	26.71

4.5 钢筋与混凝土之间粘结能力的改变

由表3知, $\mu_\eta(t) < 3\%$, 由公式(16)、(17)可求得粘结力衰减系数 $\phi(t)$ 的统计参数如表5所示:

表5 不同时间粘结力衰减系数 $\phi(t)$ 的统计参数

时间/a	$\mu_{\phi(t)}$	$\sigma_{\phi(t)}$
30	1.033	0.124
40	1.035	0.124
50	1.040	0.125

4.6 正截面弯曲抗力衰减模型

(1)模型建立及不同年份统计参数求解。此梁横截面为T型截面, 经验算, 属于第一类T型截面。第一类T形截面正截面抗弯承载力为:

$$M_u = f_{sd}A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (33)$$

受压区高度为:

$$x = f_{sd}A_s / (f_{cd}b'_f) \quad (34)$$

所以梁的实际抗力为:

$$R(t) = \Omega_p \phi(t) f_{sd}(t) A_s(t) \left(h_0 - \frac{f_{sd}(t) A_s(t)}{2 f_{cd}(t) b'_f} \right) \quad (35)$$

抗力的统计参数为:

$$\mu_R(t) = \mu_{\Omega_p} \mu_{\phi(t)} \mu_{f_s}(t) (1 - \mu_\eta(t)) \mu_{A_s} \cdot \left(h_0 - \frac{\mu_{f_s}(t) (1 - \mu_\eta(t)) \mu_{A_s}}{2 \mu_{f_c}(t) b'_f} \right) \quad (36)$$

$$\sigma_R^2(t) = \left(\frac{\partial R}{\partial \Omega_p} \Big|_\mu \right)^2 \sigma_{\Omega_p}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \phi(t)} \Big|_\mu \right)^2 \sigma_{\phi(t)}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial f_{sd}(t)} \Big|_\mu \right)^2 \sigma_{f_s}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \eta(t)} \Big|_\mu \right)^2 \sigma_{\eta(t)}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial A_s} \Big|_\mu \right)^2 \sigma_{A_s}^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial f_{cd}(t)} \Big|_\mu \right)^2 (\sigma'_{f_c}(t))^2 \quad (37)$$

限于篇幅, 公式未完全展开。根据模型, 就可以求出 t_0 以后任一年的抗力平均值和标准差。由表1~5查得 μ_{Ω_p} 、 σ_{Ω_p} 、 $\mu'_{f_c}(t)$ 、 $\sigma'_{f_c}(t)$ 、 $\mu_\eta(t)$ 、 $\sigma_\eta(t)$ 、 $\mu_{f_s}(t)$ 、 $\sigma_{f_s}(t)$ 、 $\mu_{\phi}(t)$ 、 $\sigma_{\phi}(t)$ 的值, 由规范[11]查得: $\mu_{A_s} = 1.0A_s$, $\sigma_{A_s} = 0.035A_s$; 由图知 $A_s = 6434$ mm², $h_0 = 1201$ mm², $b'_f = 1580$ mm², 代入以上数据, 求得跨中弯曲抗力不同年份的统计参数如表6所示:

表6 不同时间弯曲抗力 $R(t)$ 的统计参数 kN·m

时间/a	$\mu_R(t)$	$\sigma_R(t)$
30	2986.710	229.9667
40	2983.722	232.6681
50	2976.428	233.0551

(2)混凝土标号换为30号时不同年份的抗力统计参数。

30号混凝土对应C28混凝土, 均值与方差已在4.1求出, 重复4.2的内容, 计算出C28混凝土不同年份的强度统计参数。代入4.6所建立的抗力衰减模型中, 求出不同年份的弯曲抗力统计参数见表7。

表7 30号混凝土不同时间弯曲抗力统计参数 kN·m

时间/a	$\mu_R(t)$	$\sigma_R(t)$
30	3053.641	240.0978
40	3049.443	243.9562
50	3041.612	249.5742

由表6~7均可看出, 抗力的均值是随时间下降的, 标准差随时间是增长的(即抗力统计数据越来越离散), 这是符合结构的衰减规律的, 也证明了所建模型是可靠的。如果知道荷载统计参数, 就可以根据结构的功能函数计算出结构可靠指标, 进而判断结构在任一时刻的可靠性。这也正是建立抗力衰减模型的目的。

5 结 语

对在役钢筋混凝土桥梁进行可靠度评估,寿命预测中,抗力是可靠度计算的重要因素,建立抗力模型至关重要。围绕这一问题,本文主要解决了以下问题:

(1)总结了影响钢筋混凝土桥梁抗力的3大因素。分析了各因素随时间的变化规律,分析中考虑了钢筋锈蚀引起的强度的降低。

(2)建立了钢筋混凝土桥梁抗力随时间衰减的模型,模型中的计算模式不定性参数引用了更符合在役结构基于纤维模型的参数。

(3)以所建模型为基础,建立了某在役钢筋混凝土简支T梁桥弯曲抗力随时间衰减模型,计算出了两种混凝土强度下不同年份的弯曲抗力均值与标准差,所求结果符合结构的衰减规律。

(4)本文所建模型可为类似的抗力模型的建立提供参考,也为钢筋混凝土结构可靠性评估、寿命预测打下基础。

本文只考虑了一般大气环境下钢筋混凝土桥梁的衰减,腐蚀环境下钢筋混凝土桥梁的衰减和预应力混凝土桥梁的衰减是以后进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 闫磊. 服役期砼桥梁加固前后的可靠度研究[D]. 陕西:长安大学, 2010, 2-3.
- [2] 张建仁, 秦权. 现有混凝土桥梁的时变可靠度分析[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 90-95.
- [3] 牛荻涛, 陈亦奇. 混凝土结构的碳化模式与碳化寿命分

析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1995, 27(4): 365-369.

- [4] 李广慧, 杜朝, 蒋晓东. 在役建筑结构的剩余寿命预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 1999, 20(3): 6-9.
- [5] 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, 15-20.
- [6] 彭建新, 张建仁, 张克波, 等. 锈蚀RC桥梁弯曲抗力时变概率模型与试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 125-131.
- [7] 李运生, 张彦玲. 在役公路钢筋混凝土梁剩余寿命估算方法研究[J]. 铁道标准设计, 2003, (1): 13-16.
- [8] 王晓明, 石雪飞, 阮欣. 在役梁桥弯曲抗力概率模型的确定方法[J]. 结构工程师, 2013, 29(4): 51-55.
- [9] Stewart M G. Mechanical behaviour of pitting corrosion of flexural and shear reinforcement and its effect on structural reliability of corroding RC beams [J]. Structural Safety, 2009, 31(1): 19-30.
- [10] Coronelli D, Gambarova P. Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(8): 1214-1224.
- [11] 中华人民共和国交通部. GB/T50283-1999. 公路工程施工结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [12] 石雪飞, 王晓明, 阮欣, 等. 考虑空间变异性的在役钢筋混凝土梁桥失效概率评估[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 74-79.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTG D62-2004. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范. [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] 张树仁. 桥梁设计规范学习与应用讲评[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. 26-27.

(上接第185页)

参考文献:

- [1] 李晓. 上海地区晚新生代地层划分与沉积环境演化[J]. 上海地质, 2009(1): 1-7.
- [2] 周学明, 袁良英, 蔡坚强, 等. 上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J]. 上海地质, 2005(4): 6-9+61.
- [3] 李敏, 柴寿喜, 杜红普, 等. 麦秸秆加筋土的合理布筋位置和抗剪强度模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3923-3929.
- [4] Prabakar J, Sridhar R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(2): 123-131.
- [5] 王伟, 王中华, 曾媛, 等. 聚丙烯纤维复合土抗裂补强特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 703-708.
- [6] 姜睿, 董香军, 刘鑫. 聚乙烯醇纤维高强混凝土的配制及基

本力学性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(9): 106-110.

- [7] 周霖. 聚乙烯醇纤维在混凝土中的应用[J]. 四川纺织科技, 2003(3): 27-29.
- [8] 中华人民共和国交通部. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [9] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 610-614.
- [10] 张旭东, 战永亮, 张艳美, 等. 纤维土强度特性的试验研究[J]. 路基工程, 2001(1): 36-38.
- [11] Qu Jili, Li Chencai, Liu Baoshi, et al. Effect of random inclusion of wheat straw fibers on shear strength characteristics of Shanghai cohesive soil [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(2): 511-518.