文章编号:1007-6492(1999)03-0006-04

在役建筑结构的剩余寿命预测

李广慧,杜　朝,蒋晓东

(郑州工业大学土木建筑工程学院,河南 郑州 450002)

摘　要:讨论有关在役建筑结构寿命的若干概念,利用在役结构抗力衰减研究的最新成果,在将在役建筑结构截面抗力看成一非平稳随机过程和定义结构服役可靠度的基础上,根据截面效应约束极限状态,直接计算在役结构的服役可靠度,并基于可接受的最低服役可靠度,提出了在役建筑结构剩余寿命计算的新方法,从而为在役建筑结构的全寿命优化决策奠定了基础.

关键词:在役建筑结构;剩余寿命;预测;服役可靠度

中图分类号:TU 317.9　　**文献标识码**:A

0　引言

如何合理确定在役建筑结构的鉴定基准期,已成为目前耐久性研究中迫切需要解决的课题之一.因为结构的鉴定基准期的长短直接影响到荷载效应大小,所以它也会对在役建筑结构可靠性鉴定的结果有影响.若选取的鉴定基准期与在役建筑结构的实际剩余寿命相差过多,则可靠性鉴定结果或偏于保守,或偏于危险,失去了可靠性鉴定的意义.因此,只有在确定了在役建筑结构剩余寿命的基础上,才可能准确地选取合适的鉴定基准期,进而对其可靠性有一个正确的评价.

1　基本概念与定义

建筑结构的服役期、剩余寿命等都是关于时间的概念,为了更好地讨论问题,重新定义这些概念如下[1]:

(1) 设计基准使用期:即设计基准期,是指为确定荷载取值、计算结构可靠度而采用的基准时间,并记为 T.

(2) 鉴定基准期:是由业主和鉴定者根据结构、环境状况及使用要求,确定荷载取值、计算在役结构服役可靠度采用的基准时间,记为 T_a.

(3) 承载能力寿命:指结构从建成投入使用后,因自然原因(物理、化学变化等)达到承载能力极限状态而不能继续使用的年限,并记为 T_b.

(4) 正常使用寿命:指结构从建成投入使用开始到结构不能满足使用功能要求为止的一段时间,但经维修加固或改造后仍可继续使用,常用于经济分析中.

(5) 耐久寿命:指结构从投入使用开始到达到耐久性失效所经历的时间.

为了更好地进行在役结构剩余寿命预测,引入如下3个概念:

(1) 服役可靠度:指结构在承载能力寿命终止之前的预期服役期内,随时间增加而动态变化的可靠度,并记为 $\Psi(t,T_a)$, $t\in[t_1,T_b]$.

(2) 可靠寿命:考虑到结构抗力衰减后,结构的服役可靠度 $\Psi(t,T_a)$ 将是随时间降低的函数,当可靠度降低到一个可接受的最低可靠度水平以下时,即认为达到结构的可靠寿命.

(3) 剩余寿命:是以当前鉴定时间 t_1 为起点,截止到可靠寿命末尾的使用年限,并记为 L_r.

2　基于服役可靠度的结构寿命预测

2.1　基本假定

为了计算服役可靠度,作以下假定:

(1) 结构工作环境仅考虑一般大气环境;

(2) 对于结构服役期中的任一时刻 τ,结构的鉴定基准期 T_a 都取一定值(如本文取50 a).

收稿日期:1999-03-08;**修订日期**:1999-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59608008);河南省科技攻关项目(981150305)

作者简介:李广慧(1970-),男,河南省商丘市人,郑州工业大学讲师,博士,主要从事结构与系统可靠性方面的研究.

万方数据

(3) 在结构的鉴定基准期 T_a 内，只考虑非物理的结构常规维护、保养措施而不考虑任何维修、加固措施.

2.2 在役结构构件抗力的随机过程模型

就目前来看，结构剩余寿命的预测还限于构件水平上. 对于在役结构，若采用基于可靠度分析的极限状态方程进行寿命预测的话，则必须建立构件抗力的经时变化模型[2].

2.2.1 抗力计算模型

在进行结构设计时，采用随机变量作为抗力的概率模型，并认为抗力服从对数正态分布. 由于服役结构的抗力随服役时间变化，因此本文仍采用非平稳随机过程模型描述服役构件的抗力，并假定服役构件的抗力仍服从对数正态分布.

2.2.2 在役结构构件抗力的统计参数

2.2.2.1 混凝土立方体抗压强度的统计参数

据文献[2]，混凝土立方体抗压强度的平均值函数和标准差函数可以由下式表示：

$$\mu_{f_{cu}}(t) = \mu_{f_{cu0}} \cdot 1.4529e^{-0.0246(\ln t - 1.7154)^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{f_{cu}}(t) = \sigma_{f_{cu0}}(0.0305t + 1.2368). \quad (2)$$

式中：$\mu_{f_{cu0}}$ 和 $\sigma_{f_{cu0}}$ 分别为混凝土 28 天抗压强度的平均值和标准差.

2.2.2.2 钢筋截面锈蚀损失率的统计参数

当混凝土碳化至钢筋表面时，钢筋即开始发生锈蚀. 据文献[3]，在室外或室内潮湿环境中的混凝土构件，其中钢筋锈蚀的开始时间可以表示为

$$t_p = \left(\frac{c}{K_c}\right)^2. \quad (3)$$

式中：t_p 为钢筋锈蚀时间，a；c 为混凝土保护层厚度，mm；K_c 为混凝土碳化系数，mm/$\sqrt{a}$，可以由下式求得

$$K_c = K_{el}K_{ei}K_t\left(\frac{24.48}{\sqrt{f_{cuk}}} - 2.74\right). \quad (4)$$

式中：K_{el} 为地区影响系数(北方地区为 1.0，南方地区及沿海地区为 0.5～0.8)；K_{ei} 为室内外影响系数(室内为 1.87，室外为 1.0)；K_t 为养护时间影响系数(一般施工情况取为 1.50).

钢筋开始锈蚀后，锈蚀深度的平均值及标准差均随时间的增长而增长，根据耐久性的要求，在综合分析的基础上给出以下模型

$$\mu_\delta(t) = \mu_\delta(t_1) \cdot e^{0.0004t^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_\delta(t) = \sigma_\delta(t_1)(1 + 0.025t), \quad (6)$$

式中：$\mu_\delta(t)$ 和 $\sigma_\delta(t)$ 分别为随时间变化的钢筋锈蚀深度的平均值及标准差函数，$t \in [t_1, T_a]$；$\mu_\delta(t_1)$ 和 $\sigma_\delta(t_1)$ 分别为构件在工作至 t_1 年时实测的钢筋锈蚀深度平均值及标准差.

根据误差传递公式，钢筋截面面积损失率的平均值 $\mu_{\eta_s}(t)$ 和标准差 $\sigma_{\eta_s}(t)$ 分别为

$$\mu_{\eta_s}(t) = \frac{4\mu_\delta(t)}{d} - \frac{4\mu_\delta(t)^2}{d^2}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\eta_s}(t) = \sigma_\delta(t)^2\left[\frac{16}{d^2} - \frac{32\mu_\delta(t)}{d^4}\right], \quad (8)$$

式中，$t \in [t_1, T_a]$.

2.2.2.3 锈蚀钢筋的名义屈服强度

文献[4]定义锈蚀钢筋的名义屈服强度为

$$f_{ycor} = f_y(0.986 - 1.038\eta_s), \quad (9)$$

据此，定义锈蚀钢筋的名义屈服强度标准值为

$$f_{ykcor} = f_{yk}(0.986 - 1.038\eta_s). \quad (10)$$

式中：f_{ycor} 为锈蚀钢筋的名义屈服强度；f_{ykcor} 为锈蚀钢筋的名义屈服强度标准值；f_{yk} 为未锈钢筋的屈服强度标准值；η_s 为钢筋截面面积损失率.

2.2.3 锈蚀钢筋的名义屈服拉力的统计参数

对于在役结构构件，为求其锈蚀钢筋的名义屈服拉力，使用名义屈服强度的标准值，这样，锈蚀钢筋的名义屈服拉力可以表示为

$$F_{Yk}(t) = F_{Yk0}[0.986 - 1.038\eta_s(t)][1 - \eta_s(t)]. \quad (11)$$

其中，F_{Yk0} 是未锈钢筋的屈服拉力.

锈蚀钢筋的名义屈服拉力的平均值及标准差函数可以表示为

$$\mu_{F_{Yk}}(t) = \mu_{F_{Yk0}}[0.986 - 1.038\mu_{\eta_s}(t)] \cdot [1 - \mu_{\eta_s}(t)], \quad (12)$$

$$\sigma_{F_{Yk}}(t) = \delta_{F_{Yk}}(t) \cdot \mu_{F_{Yk}}(t), \quad (13)$$

$$\delta_{F_{Yk}}(t) = \sqrt{\delta^2_{F_{Yk0}} + \left[\frac{(2.076\mu_{\eta_s}(t) - 2.024)\delta_{\eta_s}(t)}{0.986 - 2.024\mu_{\eta_s}(t) + 1.038\mu_{\eta_s}(t)}\right]^2}, \quad (14)$$

式中：$\mu_{F_{Yk0}}$ 和 $\delta_{F_{Yk0}}$ 分别为钢筋初始屈服拉力标准值的平均值及变异系数，分别表示为

$$\mu_{F_{Yk0}} = \mu_{f_{yk}}\mu_{A_s}, \quad (15)$$

$$\delta_{F_{Yk0}} = \sqrt{\delta^2_{f_{yk}} + \delta^2_{A_s}}. \quad (16)$$

式中：$\mu_{f_{yk}}$ 和 $\delta_{f_{yk}}$ 分别为钢筋屈服强度标准值的平均值和变异系数.

2.2.4 在役构件截面抗力分析

对于在役构件，其截面抗力应由材料强度标

万方数据

准值计算得来,若计入计算模式的不定性,其截面抗力可以表示为

$$R(t) = K_p \cdot R_k(t) . \tag{17}$$

式中:K_p 是计算模式不定性随机变量;$R(t)$是考虑计算模式不定性的抗力随机过程;$R_k(t)$是由标准值计算得到的抗力随机过程.

截面抗力的平均值及标准差函数由下式求得

$$\mu_R(t) = \mu_{K_p} \cdot \mu_{R_k}(t) , \tag{18}$$

$$\sigma_R(t) = \delta_R(t) \cdot \mu_R(t) , \tag{19}$$

$$\delta_R(t) = \sqrt{\delta_{K_p}^2 + \delta_{R_k}^2(t)} . \tag{20}$$

式中:μ_{K_p} 和 δ_{K_p} 分别为随机变量的平均值和变异系数;$\mu_{R_k}(t)$和 $\delta_{R_k}(t)$分别为计算抗力的平均值和变异函数,可以表示为

$$\mu_{R_k}(t) = [\mu_{f_{ck}}(t), \mu_{\omega}(t)] , \tag{21}$$

$$\delta_{R_k}(t) = \frac{\sigma_{R_k}(t)}{\mu_{R_k}(t)} , \tag{22}$$

$$\sigma_{R_k}(t) = \left\{ \sum_i \left[\frac{\partial R_k(t)}{\partial X_i} \bigg|_{\mu} \right]^2 \sigma_{X_i}^2(t) \right\}^{\frac{1}{2}} . \tag{23}$$

式中:X_i 表示 $R_k(t)$中的变量;$|_{\mu}$ 表示偏导数在平均值处取值.

若不计构件截面宽度和有效高度的经时变化,且构件受损后仍符合平截面假定,则在役钢筋混凝土受弯构件时变抗力可以表示为

$$R_k(t) = F_{Yk}(t)\left[h_0 - \frac{F_{Yk}(t)}{2bf_{cmk}(t)} \right] , \tag{24}$$

式中:$F_{Yk}(t)$为锈蚀钢筋的经时屈服拉力;h_0 为截面有效高度;b 为构件截面宽度;$f_{cmk}(t)$为混凝土的经时弯曲抗压强度,可由下式求得

$$f_{cmk}(t) = 0.737 f_{cuk}(t) , \tag{25}$$

其平均值和标准差可由下式给出

$$\mu_{f_{cmk}}(t) = 0.737 \mu_{f_{cuk}}(t), \tag{26}$$

$$\sigma_{f_{cmk}}(t) = 0.737 \sigma_{f_{cuk}}(t) . \tag{27}$$

2.3 在役结构荷载效应计算

在役结构荷载效应的计算主要考虑永久作用(荷载)和可变作用(荷载)这两种作用(荷载). 当在役结构的鉴定基准期 T_a 不同于设计基准期 T 时,由荷载规范查得的可变荷载标准值不可直接应用,而应乘以相应的修正系数,文献[5]在大量的统计分析基础上给出楼面活荷载的修正系数,见表1.

表1 楼面活荷载的修正系数

鉴定基准期/a	10	30	50	60	70	100
修正系数	0.8	0.85	1.0	1.02	1.05	1.1

3 算例

已知一在役钢筋混凝土简支梁,处于我国北方地区室内潮湿环境,混凝土强度等级为C20,受力钢筋为II级,直径 $d = 25$ mm,设计基准期 $T = 50$ a,恒荷载标准值 $q_{GK} = 37.4$ kN/m,活荷载标准值 $q_{LK} = 6$ kN/m,设计目标可靠指标 $\beta_k = 3.2$,施工质量一般,当构件服役至20 a时,经实际检测得钢筋平均锈蚀深度 $\mu_\delta(t_1 = 20\ a) = 0.05$ mm,$\sigma_\delta(t_1 = 20\ a) = 0.07$ mm,且无混凝土强度检测资料. 若取 $\beta_{min}^{ser} = 2.7$,假定恒载和活载均为正态随机变量,相互独立,$\delta_G = 0.07$,$\delta_L = 0.292$,试求该构件的剩余寿命 L_r.

为了计算方便,本文只考虑钢筋混凝土简支梁跨中截面的受弯失效,由于抗力 $R(t)$在后续服役期内各个时间截口的样本函数仍服从对数正态分布,经转换后仍可求得构件任意时点的服役可靠度 $\Psi(t, T_a)$及服役可靠度指标 $\beta^{ser}(t)$.

由已知条件:$K_{el} = 1.0$,$K_{ei} = 1.87$,$K_t = 1.50$,$f_{cuk} = 20$ N/mm^2,由式(4)可得 $K_c = 7.6686$,由式(3)可得 $t_p = 15.3$ a,可取为15 a,即该钢筋混凝土简支梁在工作至15 a时,梁中钢筋开始发生锈蚀.

据题设可得 $\mu_G = 202$ kN·m;$\sigma_G = 14.14$ kN·m;$\mu_L = 38$ kN·m;$\sigma_G = 11.1$ kN·m,并令

$$\beta^{ser}(t) = \beta_{min}^{ser} = \frac{\mu_R(t) - \mu_G - \mu_1}{\sigma_R^2(t) + \sigma_G^2 + \sigma_L^2} = 2.7 .$$

利用计算机程序可以求解出 t_1 年后各年的服役可靠指标及可靠度,根据求得的各年的服役可靠度,可以绘出如图1所示的曲线.

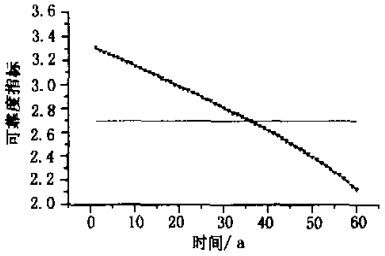

图1 算例服役可靠度衰减示意图

由图中曲线可知,该钢筋混凝土受弯构件的剩余寿命应为36 a,即 $L_r = 36$ a,这样,该受弯构件的全部寿命为56 a.

另外,从图1可以看出,若考虑结构抗力衰减的影响时,该钢筋混凝土受弯构件的服役可靠度(可靠指标)呈近似指数下降趋势. 若取可接受的

万方数据

最低可靠度水平为 $\beta^{ser}(t)=\beta_{min}^{ser}=2.5$，则其剩余寿命应为 $L_r\approx 45$ a，其全部寿命为 65 a.

4　结论

本文将在役建筑结构构件的抗力作为随机过程，根据截面效应约束极限状态直接计算在役结构的服役可靠度，以可接受的最低服役可靠度水平为基准，给出了在役建筑结构构件的剩余寿命的估算方法.

算例分析表明，当考虑结构抗力衰减的影响时，钢筋混凝土受弯构件的服役可靠度（可靠指标）呈近似指数下降的趋势.

参考文献：

[1] 蒋晓东，赵　卓，霍　达. 建筑结构的设计寿命及其广义耐久性[J]. 郑州工业大学学报，1998，19(2)：53－56.

[2] 牛获涛，王庆霖. 一般大气环境下混凝土强度经时变化模型[J]. 工业建筑，1995，25(6)：36－38.

[3] 牛获涛，王庆霖，王林科. 锈蚀开裂前混凝土中钢筋锈蚀量的预测模型[J]. 工业建筑，1996，26(4)：8－10.

[4] 张平生，卢　梅. 锈损钢筋的力学性能[J]. 工业建筑，1995，25(9)：41－44.

[5] 王永维. 民用建筑可靠性鉴定时的荷载标准值取值研究[J]. 四川建筑科学研究，1995(1)：11－14.

The Prediction of Residual Life for Existing Building Structures

LI Guang－hui, DU Chao, JIANG Xiao－dong

(College of Civil & Building Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Some concepts about lives of existing building structures are first reviewed in this paper. Using the state－of－art research achievements on structural resistance, on the basis of taking structural resistance as a non－smooth stochastic process and the definition of service reliability, a new calculation method of residual life for existing building structures is presented based on the definition of acceptable minimal service reliability according to the limit state of sectional constraints, providing a theoretical basis for the whole－life optimization of existing building structures.

Key words: existing building structures; residual life prediction; service reliability

万方数据