

文章编号 :1007 - 649X(2000)02 - 0018 - 03

# 基于介质腐蚀性模糊分级的结构设计可靠度

郭院成<sup>1</sup>, 赵 卓<sup>1</sup>, 霍 达<sup>2</sup>

(1. 郑州工业大学土木建筑工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 北京工业大学土木建筑工程学院, 北京 100022)

摘 要: 化工结构由于受到外部腐蚀性介质环境的影响, 其承载能力及动态可靠度水平随使用时间衰减过快, 按照普通结构设计可靠度水平设计的工业建筑常难以顺利完成设计使用功能。因此, 在设计基准期预先确定条件下, 化工结构的设计可靠度水平应综合考虑腐蚀性环境及其对建筑结构的影响特点来决策。根据介质腐蚀性模糊分级, 提出了工业建筑设计可靠度水平的一种实用决策方法。

关键词: 抗力衰减; 模糊可靠度; 优化设计

中图分类号: TU 352.3 文献标识码: A

我国建筑结构设计规范统一将工业和民用建筑按其重要程度分为一、二、三级, 并分别将其设计目标可靠指标设定为 2.7、3.2、3.7 (延性破坏) 及 3.2、3.7、4.2 (脆性破坏)。对化工结构等处于特殊使用环境中的建筑结构, 规范主要是从被动防腐和增加钢筋保护层厚度等方面来处理, 在结构设计阶段同普通建筑结构设计完全一样。

一般情况下, 工业建筑在其服役过程中始终处在具有腐蚀性介质的使用环境中, 导致结构构件的截面抗力随结构使用时间的延长而逐渐降低, 结构服役动态可靠度也处于单调下降状态。在结构设计基准时间预先确定情况下, 要使所设计结构顺利完成其预定使用功能, 仅仅依靠被动防腐处理显然是不够的, 其设计可靠度水平必须依据未来使用环境及其对结构影响特点来进行综合决策。

外界腐蚀性介质对化工结构的影响主要体现为结构构件截面抗力水平的衰减, 在建筑功能保持不变条件下, 由此可能导致结构荷载效应发生相应的变化。因此化工结构的设计可靠度指标必须考虑外界侵蚀环境因素和其他荷载作用的综合影响。文献 [1] 提出了最优设防荷载的概念, 并证明了在同样条件下按最优设防荷载设计得到的结构可靠度水平与最优设防可靠度水平决策结果是

一致的。从“工程实用优化”设计的角度出发, 可将腐蚀性介质对结构本身抗力水平的影响等效化为相应荷载效应, 使化工结构的设计可靠度水平决策与现行结构可靠性设计统一起来。实际工程中通过腐蚀性介质的模糊分级来综合反映外部介质对建筑结构的腐蚀影响, 由此修正普通结构设计可靠度水平即得化工结构的模糊设计可靠度。

## 1 在役结构的动态可靠度

腐蚀性介质使用环境中的在役钢筋混凝土结构, 由于外部腐蚀性介质的影响, 随着结构使用年限的增长, 结构构件的几何参数包括结构构件的截面几何特征 (如截面高度、宽度、面积、面积矩、惯性矩、抵抗矩、混凝土保护层厚度等) 以及结构构件的长度、跨度、偏心距等和诸如钢筋屈服强度、延伸率等材料性能均处在不断的变化当中, 是时变的。由此导致结构抗力成为一个具有强烈模糊性、随机性和不确定性的时间过程, 每一时间截面表现为一个模糊随机变量。采用一次二阶矩方法计算结构构件的模糊动态可靠性指标公式则为 [2]

$$\beta(t_1, T_1) = \frac{\mu_R(t_1) - \mu_S(t_1, T_1)}{\sqrt{\sigma_R^2(t_1, T_1) + \sigma_S^2(t_1, T_1)}} \quad (1)$$

工程实际中, 为简化起见, 可近似认为任一时

收稿日期: 2000 - 01 - 11; 修订日期: 2000 - 02 - 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59878006); 河南省科技攻关项目 (991090337)

作者简介: 郭院成 (1965 - ) 男, 河南省辉县市人, 郑州工业大学副教授, 博士, 主要从事工业建筑结构可靠性评估及维修加固决策理论方面的研究。

间截口荷载效应变量的统计特征均不随服役时间而改变,则化工结构动态可靠度水平实际上就是结构抗力变量的函数,而结构抗力变量又表现为随服役时间而逐渐衰减的函数,故化工结构的动态可靠度即是结构服役时间的函数:

$$\beta(t_1, T_1) = \frac{\mu_R(t_1) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(t_1) + \sigma_S^2}} \quad (2)$$

因此,结构在其设计基准期时间点( $t_1 = T$ ,  $T_1 = 0$ )结构可靠度水平可表示为

$$\beta(T, 0) = \frac{\mu_R(T) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(T) + \sigma_S^2}}$$

结构在其开始使用时刻( $t_1 = 0$ ,  $T_1 = T$ )结构设计可靠度水平可表示为

$$\beta(0, T) = \frac{\mu_R(0) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(0) + \sigma_S^2}}$$

若以  $\beta_k$  表示工业建筑的设计可靠度指标,则有

$$\begin{aligned} \beta_k &= \beta(t, 0) + \frac{\mu_R(0) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(0) + \sigma_S^2}} - \\ &\quad \frac{\mu_R(T) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(T) + \sigma_S^2}} = \beta(T, 0) \left[ 1 + \frac{1}{\beta(T, 0)} \times \right. \\ &\quad \left. \left( \frac{\mu_R(0) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(0) + \sigma_S^2}} - \frac{\mu_R(T) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(T) + \sigma_S^2}} \right) \right] \quad (3) \\ \text{令 } \zeta &= 1 + \frac{1}{\beta(T, 0)} \left( \frac{\mu_R(0) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(0) + \sigma_S^2}} - \right. \\ &\quad \left. \frac{\mu_R(T) - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2(T) + \sigma_S^2}} \right) \end{aligned}$$

对于承载能力极限状态,采用荷载效应的基本组合进行设计时,若建筑结构本身及其所受外部作用已经确定,则与结构构件截面设计抗力  $R_0^*$  相对应的荷载效应则为

$$R_0^* = \bar{\gamma}_G(\gamma_G C_G G_k + \gamma_Q C_Q Q_k + \sum_{i=2}^n \gamma_Q C_Q \Psi_{ci} Q_{ik}), \quad (4)$$

若设结构投入使用时间为  $T_k^*$  时,构件截面实际抗力水平的衰减量为  $\Delta R(\gamma_R f_k, \alpha_k, \wedge)$  则

$$R_0^* = R_k^* + \Delta R(\gamma_R f_k, \alpha_k, \wedge), \quad (5)$$

显然,工业建筑结构承载能力在其使用过程中的衰减幅度除受结构使用时间影响外,关键是外界防腐蚀介质环境的腐蚀影响。当介质腐蚀性等级较高时,其对建筑结构的腐蚀影响较强,在相同时间内结构抗力的衰减幅值相应就大;反之腐蚀影响较弱,抗力衰减幅值就小。一般情况下,根据结构设计规范要求,建筑结构使用过程中的最低可

靠度水平是有限制的,其浮动幅度较小,当建筑结构使用功能确定后,可认为结构最低可靠度水平限制值是唯一确定的。因此,可认为工业建筑设计可靠度水平修正系数是外界腐蚀性介质对建筑结构承载能力影响特点在结构可靠性设计中的体现,当结构使用环境对其承载能力无不利影响时,结构使用过程中抗力水平的衰减量趋近于零,结构设计可靠度的修正系数等于1。

## 2 介质腐蚀性的模糊分级

气态介质对建筑材料的腐蚀性分级按照介质类型、介质含量及环境温度、湿度条件采用确定性“一刀切”方法划分,明显存在不合理成份。使在相同环境温度、湿度条件下介质界限含量两侧的不同环境对建筑材料的腐蚀性分属不同腐蚀等级;同样,在介质含量相同条件下,环境温度、湿度在界限湿度附近变化时,其对建筑材料的腐蚀性也分属不同腐蚀性等级,最终导致结构防腐设计采用截然不同的两种方案。而实际上,化工建筑结构服役过程中的环境温度湿度及介质含量等影响因素都是根据实测、统计平均而得的,显然,环境温度、湿度和介质含量在结构使用过程中是随时间而变化的,在介质界限含量及界限环境湿度附近浮动的不同环境对建筑材料的腐蚀性也应该是连续变化的,也即从腐蚀介质对建筑结构材料的实际腐蚀结果来看,介质腐蚀性分级应该是模糊的。

对较为复杂的气态腐蚀性介质,在腐蚀介质类别确定后,介质腐蚀性等级决定于介质含量及环境湿度两个因素。对不同介质,介质含量因素的划分区间相差很大,即在不同含量区间范围内介质腐蚀性的差别是很大的。因此对单因素进行模糊化处理时,其隶属函数形式应该是不同的。以气态介质“氯”为例<sup>[3]</sup>,  $Q_1$  的介质含量区间为:  $1 \sim 5 \text{ mg/m}^3$  而  $Q_2$  的介质含量区间为:  $0.1 \sim 1 \text{ mg/m}^3$  环境湿度区间划分为:  $> 75$ 、 $60 \sim 75$  和  $< 60$ , 针对各区间特点分别采用戒上型、戒下型或正态型隶属函数。且由于这里介质含量与环境湿度两因素的耦联关系,模糊化处理后的影响因素也必须同时存在才具有实际意义,使得将此两耦联因素的联合隶属函数用显式表达更为困难。为与规范对介质腐蚀性分级方法相适应,文献[4]以“氯”对钢筋混凝土材料的腐蚀性为例,将腐蚀性级别“强、中、弱、无”记为“Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ”,分别定义了具有耦联因素影响的介质腐蚀性模糊分级的联合隶

属函数.

根据上述腐蚀性耦联影响因素联合隶属函数的定义,即可确定工程实际中任一耦联因素向量  $(\rho_k, S_k)$  所对应的模糊腐蚀性等级向量

$$B_k = [b_{k1}, b_{k2}, b_{k3}, b_{k4}] ,$$

式中:  $b_k (j = 1, 2, 3, 4)$  为因素向量  $(\rho_k, S_k)$  对各腐蚀性等级的隶属度指标. 如当环境中氯介质含量为  $1.5 \text{ kg/m}^3$ , 常温下环境相对湿度为  $70\%$  时, 其对应的腐蚀性模糊等级向量则为

$$B_k = [0.2, 0.7, 0.1, 0.0] .$$

### 3 基于介质腐蚀性模糊分级的设计可靠度

根据设计结构本身(钢筋混凝土、素混凝土或砖砌体等)特点及其重要性程度,定义各腐蚀性等级的权重  $\alpha_i (i = 1, 2, 3, 4)$ , 得各腐蚀性等级的权重向量

$$A = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4] .$$

从工程实际出发,在“弱、无”腐蚀条件下,结构防腐仅通过“构造防腐”处理即可满足规范的设计要求,而对“强、中”腐蚀条件,结构防腐应根据结构本身特点及其重要性程度,采取“构造防腐”与“设计防腐”相结合方法来满足设计要求.

腐蚀环境下建筑结构的破坏过程较短,控制截面出现裂缝后受力钢筋与腐蚀介质直接接触,使结构承载力水平急剧下降,直至破坏.类似于普通环境下结构的脆性破坏特点,因此可以认为腐蚀介质不仅使钢筋与混凝土材料性质变脆,且使整个结构构件的破坏呈现脆性破坏特点.规范要求脆性结构设计可靠度水平要适当提高,一级脆性结构  $\beta_k = 4.2$ ; 二级脆性结构  $\beta_k = 3.7$ ; 三级脆性结构  $\beta_k = 3.2$ . 相当于受腐蚀结构的重要性程度提高,因此可定义:在强腐蚀环境下,结构设计可靠度水平的调整系数为  $1.1$ ,在中腐蚀环境下调整系数定为  $1.05$ ,在弱或无腐蚀环境下调整系数仍取为  $1.0$ . 则环境腐蚀性等级的权重向量为

$A = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4] = [1.1, 1.05, 1.0, 1.0]$ , 显然,此腐蚀性等级的权重向量从一定程度上表

示了腐蚀环境对结构目标设计可靠指标的影响水平,由此可计算得单介质腐蚀环境下工作的建筑结构,当按普通环境下建筑结构设计理论进行计算时,其设计目标可靠度指标修正系数为

$$\zeta = AB_k^T = \sum_{j=1}^4 \alpha_j b_{kj} .$$

对前述氯介质,腐蚀性模糊等级向量  $B_k = [0.2, 0.7, 0.1, 0.0]$  的使用环境,结构设计可靠度水平的修正系数则为

$$\zeta = AB_k^T = 1.055 ,$$

由此计算得结构设计可靠度指标  $\beta_k = 1.055 \times 3.2 = 3.375$ .

显然,通过科学地选择各腐蚀性等级的权重向量,可使腐蚀环境因子的实质含义表达为“考虑腐蚀环境不利影响条件下,建筑结构重要性程度(系数)的修正系数”,据此修正后的结构重要性系数即可部分实现腐蚀环境下建筑结构“设计防腐”与“被动维修”的最佳组合.

### 4 结语

考虑实际腐蚀介质环境对建筑结构抗力衰减规律的影响,对强、中、弱和无 4 种腐蚀性级别进行模糊处理,是实现设计防腐的重要步骤.本文主要在环境模糊性对设计可靠度的影响方面进行了初步研究,结合工程实际检测方法和手段特点,提出了一种工程适用的设计模糊可靠度决策方法,对实现工业建筑结构设计防腐和腐蚀控制具有一定的应用价值.

### 参考文献:

- [1] 王光远. 抗灾结构的最优设防荷载与最优可靠度[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 12-19.
- [2] 郭院成, 霍达, 赵卓. 化工钢筋混凝土结构设计抗力水平的优化决策[J]. 固体力学学报, 1999, 20(计算力学专集): 232-235.
- [3] GB 50046-95, 工业建筑防腐蚀设计规范[S].
- [4] 郭院成, 赵卓, 李广慧. 气态介质腐蚀性的模糊分级[J]. 河南科学, 2000, 18(1): 21-24.

## The Structural Design Reliability Based on the Agents' Corrosiveness Fuzzy Classification

( 1. College of Civil & Building Engineering ,Zhengzhou University of Technology ,Zhengzhou 450002 ,China ;2. College of Civil & Building Engineering ,Beijing University of Technology ,Beijing 100022 ,China )

**Abstract** Due to the influence of the corrosive agents in the outer environment , the resistance and dynamic reliability of the chemical structures declined with time very fast . And it is difficult for the chemical structures that with the normal design reliability level to fulfil their structural functions . On the condition that the design service life is confirmed , the design reliability level of the chemical structures should include the corrosive environment and its effect on the structures . Based on agents ' corrosiveness fuzzy classification , this paper suggests a practical method on design reliability level decision – making of the industrial structures , which is very useful for the anti – corrosion design of the industrial structures .

**Key words** : resistance decline ; fuzzy reliability ; optimum design

万方数据