

国家自然科学基金
资助项目论文

砼结构耐久性可靠度的模糊概率分析

吴成清 乔润德

合肥工业大学土木系
一九九四年十月

目 录

一、引言

二、影响结构耐久性的主要因素

(一)碳化作用

(二)氯盐腐蚀

(三)裂缝

(四)其他情况

三、各因素对耐久性的损伤

(一)损伤的模糊性

(二)耐久性损伤的模糊概率分析数学模型

(三)耐久性损伤的综合评估

四、算例

五、结束语

主要参考文献

砼结构耐久性可靠度的模糊概率分析

吴成清 乔润德

一、引言

目前国际上现行的工程结构可靠性评估标准可分为两大类:一类是采用可靠性鉴定评级方法,即要把鉴定的结构划分成不同层次,每个层次划分等级然后综合评估。另一类是采用可靠度计算的方法,即通过实测和统计,用可靠度数学理论,计算出结构的可靠度指标,从而得出评估结果。我国现行的工程结构可靠性评估标准是采用第一类方法,它与我国现行的以近似概率为基础的结构设计标准不相协调。可靠度的计算能给出结构当前的安全程度的定量结论,但是计算可靠度需要大量可信的结构损耗情况的原始数据,收集大量的数据是困难的,因此很难解决这一问题。针对这一情况,本文选择结构的耐久性进行可靠度分析,因为计算耐久性的可靠度所需的数据较易获得,可通过一般的检测手段就能得到。对结构耐久性可靠度分析,为今后的结构可靠度计算提供了有益的帮助。

二、影响结构耐久性的主要因素

砼结构的耐久性是结构在使用过程中抵抗各种破坏因素的作用。影响砼结构耐久性因素很多,如碳化作用、裂缝、冻融破坏、碱骨料反应、冲磨空蚀、氯离子侵蚀等,其中最主要的是砼内埋置钢筋的锈蚀,砼开裂导致的构件承载能力不足引起的结构耐久年限的降低。

1、碳化作用

碳化是空气中的 CO_2 等酸性气体渗入砼,与砼孔隙中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生中和反应,使碳化区内部碱度降低,当碳化深度到达钢筋时,钢筋周围的钝化保护膜遭到破坏,在水和空气的作用下,钢筋就开始腐蚀,因此碳化对结构的耐久性有不可低估的影响。

2、氯盐腐蚀

氯盐是一种强电解质,氯离子具有穿透钢筋表面钝化保护膜的能力,形成电化学腐蚀。氯离子可能从原材料中带入,它能使整体结构钢筋腐蚀。氯离子也可能从环境中侵入,特别是海洋环境。氯盐是使结构耐久性失效的重要影响因素之一。

3、裂缝

直观上说,裂缝的存在为侵蚀性物质,特别是氯离子进入钢筋表面破坏钝化膜和产生腐蚀提供了一个相对容易的通道,裂缝越宽、分布密度越大,穿越砼渗至钢筋的腐蚀介质、水份和氧气就越多,从而引起钢筋的腐蚀并使腐蚀逐渐发展,许多国家的规范都是通过限制裂缝的宽度来限制裂缝对结构耐久性的不利影响。实际工程和调查结果表明,在结构使用初期,裂缝引起的砼局部腐蚀是显著的,但经过数年的使用,由于碳化作用、氯离子侵蚀及裂缝的自弥合作用,结构开裂部分与未开裂部分之间的差异变得很小,裂缝对腐蚀的影响程度将逐渐消失。需要指出的是,顺筋裂缝是由于钢筋锈蚀后引起的,这种裂缝在腐蚀产物的膨胀压力作用下进一步增加裂缝的数量,加大裂缝的宽度,加剧腐蚀的发展。但顺筋裂缝主要是由于碳化作用和氯离子侵蚀等因素造成的,评估时主要考虑原因,对结果可不考虑。裂缝是引

起结构耐久性失效的影响因素之一。

4、其它情况

SO_4^{2-} 离子或其它酸性介质侵蚀使砼碱度降低,钝化膜破坏而使钢筋腐蚀,耐久性降低。冻融破坏使砼表面剥落,冲磨空蚀能使结构过水表面破坏,从而使耐久性失效,当砼中掺加大量活性混合材料或采用低碱度水泥时,可导致钢筋腐蚀,耐久性失效。碱骨料反应破坏是耐久性失效的因素之一。此外,砼本身浇筑质量差也能加速耐久性失效。

三、各因素对耐久性的损伤

1、损伤的模糊性

模糊性是事物的不确定性。客观世界存在着亦此亦彼的模糊性。各因素对耐久性的损伤存在着模糊性,这就要求我们要用模糊的方法去处理。

1.1 碳化深度对耐久性损伤的模糊性。

碳化深度越深,它对结构的耐久性损伤越严重。现行规范中,是通过限制允许碳化深度来保证结构的耐久性。作为碳化效应的碳化深度是一个随机变量,而作为砼抗碳化能力的允许碳化深度却是模糊的,当实际碳化深度大于允许值时,不一定会引起耐久性失效,而当实际碳化深度小于允许值时,也不能保证结构耐久性可靠的,允许碳化深度客观上存在中间过渡,具有模糊性。

若以 D_1 表示碳化深度损伤结构耐久性的集合,则 D_1 是一个模糊集合,可以用模糊特征函数 μ_{D_1} 表示碳化深度对耐久性的影响程度。 μ_{D_1} 接近 1,说明属于 D_1 的程度高一些,该碳化深度对耐久性损伤程度大一些。若 μ_{D_1} 接近 0,表示明属于 D_1 的程度很小,对耐久性损伤程度也很小。模糊特征函数 μ_{D_1} 的确定,一般要通过模糊试验,也可以凭经验假定,当然这种假定的模糊特征函数有一定的主观性。本文参照文献[1,2,7],笔者取下述函数表示碳化深度对结构耐久性损伤程度的模糊特征函数。

$$\mu_{D_1} = \begin{cases} x^2/a_0^2 & x < a_0 \\ 1 & x \geq a_0 \end{cases}$$

式中参数 a_0 可凭经验并参考文献[3]的允许碳化深度确定。

1.2 氯离子扩散深度对耐久性损伤的模糊性

氯离子扩散深度越深,它对结构的耐久性损伤越严重。氯离子的扩散深度是一个随机变量,而抗氯离子侵蚀的允许扩散深度却是模糊的。以 D_2 表示氯离子扩散深度损伤结构耐久性的集合,用模糊特征函数 μ_{D_2} 表示氯离子扩散深度对耐久性的影响程度。参照允许碳化深度的模糊特征函数,取

$$\mu_{D_2} = \begin{cases} x^2/b_0^2 & x < b_0 \\ 1 & x \geq b_0 \end{cases}$$

式中, b_0 参照氯离子侵蚀深度临界值确定。

1.3 裂缝对耐久性损伤的模糊性。

裂缝越宽,它对耐久性损伤越严重,许多国家的规范都是通过限制最大裂缝宽度来保证结构的耐久性,显然,这种限制带有一定的盲目性和主观性。由作用效应引起的裂缝宽度值是一个随机变量,而作为抗力的允许最大裂缝宽度却是模糊的,当实际裂缝宽度大于允许值

时,不一定产生结构的耐久性失效,而实际裂宽小于允许值时,并不一定能保证结构的耐久性可靠。文献[4,5]的调查结果证实了这一点。因此,只能说较宽的裂缝比较小的裂缝对结构耐久性损伤的程度要大一些。

以 D_1 表示裂缝损伤结构耐久性集合,其模糊特征函数参照文献[6]可取为:

$$\mu_{D_1} = \begin{cases} 0 & 0 < x \leq a_1 \\ (x - a_1) / (a_2 - a_1) & a_1 < x < a_2 \\ 1 & x \geq a_2 \end{cases}$$

式中参数 a_1, a_2 可凭工程经验并参照规范确定。一般 a_1 取0.1mm, a_2 取0.4mm。

1. 其它因素对耐久性的损伤

SO_4^{2-} 离子或其它酸性介质的侵蚀与氯离子的侵蚀类似,对耐久性损伤具有模糊性。冻融破坏是一种局部破坏,它能使砼表面剥落,剥落深度由浅入深,存在着过渡性,它对耐久性损伤也存在着不定性。还有其它因素,这里就不再一一讨论。以下本文对最重要也是最常见的碳化、裂缝和氯离子的侵蚀三种因素进行讨论。

2. 耐久性损伤的模糊概率分析数学模型。

根据可靠度理论,把荷载效应 S 和抗力 R 作为随机变量进行近似概率分析,此时结构的功能函数为 $Z = R - S$,其极限状态方程为 $R - S = 0$

结构的失效概率为

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(x) f_s(x) dx$$

式中 $F_R(x)$ 为抗力 R 的概率分布函数, $f_s(x)$ 为荷载效应 s 的概率密度分布函数。

对于碳化对耐久性的损伤,功能函数 $Z = [d_0] - d$, $[d_0]$ 为允许碳化深度, d 为实测碳化深度。传统的观点认为,允许碳化深度是定值($[d_0]$ 为定值),代表结构的抗碳化能力,当实际碳化深度 d 大于 $[d_0]$ 时,结构的耐久性失效。模糊数学的观点则认为,当 d 大于 $[d_0]$ 时,耐久性也不一定失效, d 小于 $[d_0]$ 时,耐久性也不一定可靠,可用下列数学式表示耐久性失效状态方程

$$d \geq [d_0]$$

式中,带下波浪号“~”的量表示在该运算中包含有模糊事物。我们已经知道,砼抗碳化能力对耐久性损伤的模糊特征函数为 $\mu_{D_1}(x)$,而实际碳化深度是一个随机变量,其分布函数为 $f_s(x)$,则这一模糊随机事件的概率可表示为[8]:

$$P_{D_1} = \int_0^{\infty} \mu_{D_1}(x) f_s(x) dx$$

其中 $f_s(x)$ 可由统计结果确定,一般可近似地取为对数正态或正态分布,分布特征值可由被评估结构实测结果确定。

同样氯离子对耐久性损伤度 P_{D_2} 可由下式计算:

$$P_{D_2} = \int_0^{\infty} \mu_{D_2}(x) g_s(x) dx$$

式中 $g_s(x)$ 为氯离子扩散深度分布函数。

裂缝对耐久性的损伤,耐久性失效的状态方程可表示为:

$$\delta \geq [\delta_0]$$

式中 $[\delta_0]$ 是使裂缝正常使用失效时的允许裂缝宽度,具有“抗力”的性质,它对耐久性的损伤

的模糊特征函数为 $\mu_{D_1}(x)$ ，而实际裂宽是一个随机变量，其分布函数为 $\varphi_i(x)$ ，则这一模糊事件发生的概率为：

$$P'_{D_1} = \int_0^{\infty} \mu_{D_1}(x) \varphi_i(x) dx$$

其中 $\varphi_i(x)$ 可由统计结果确定。

裂缝对耐久性的损伤程度不单是裂缝宽度决定的，还应包括裂缝的类型、方向、分布密度等因素。

单类裂缝对结构耐久性损伤程度

$$P_{D_{i\lambda}} = \int_0^{\infty} \lambda_i \theta_i \mu_{D_i}(x) \varphi_i(x) dx$$

式中： $P_{D_{i\lambda}}$ 为 i 类裂缝对结构耐久性的损伤度， λ_i 为裂缝方向的综合影响系数，当几乎所有裂缝与受力主筋平行时，取 $\lambda_i = 1$ ，一般情况下可根据与主筋平行的裂缝数量比例在 1.0~0.4 范围内取值。 θ_i 为裂缝密度综合影响系数，很密时取 1.0，稀疏时取 0.1。

考虑裂缝的种类、宽度、方向和密度等因素，损伤度可按式计算

$$P_{D_i} = \sum_{j=1}^n K_j P_{D_{ij}} = \sum_{j=1}^n K_j \lambda_j \theta_j \int_0^{\infty} \mu_{D_j}(x) \varphi_i(x) dx$$

式中 K_i 为 i 类裂缝的数量占总数量比例。

3 耐久性损伤的综合评估

在实际工程中，碳化作用、氯离子侵蚀、裂缝对耐久性的损伤往往同时存在，共同作用，因此需要综合考虑它们对耐久性的损伤。我们已经知道，碳化对耐久性损伤的集合为 $\underline{D}_1$ ，氯离子对耐久性的损伤集合为 $\underline{D}_2$ ，裂缝对耐久性损伤集合为 $\underline{D}_3$ 。则：

$$\underline{D}_1 = \int_{a_1}^{\infty} \mu_{D_1}(x)/x = \int_0^{a_1} x^2/a_1^3/x + \int_{a_1}^{\infty} 1/x$$

$$\underline{D}_2 = \int_{b_1}^{\infty} \mu_{D_2}(x)/x = \int_0^{b_1} x^2/b_1^3/x + \int_{b_1}^{\infty} 1/x$$

$$\underline{D}_3 = \int_{a_1}^{\infty} \mu_{D_3}(x)/x = \int_{a_1}^{a_2} (x-a_1)(a_2-a_1)/x + \int_{a_2}^{\infty} 1/x$$

假设结构的耐久性损伤集合为 $\underline{D}$ ，则

$$\underline{D} = \underline{D}_1 \cup \underline{D}_2 \cup \underline{D}_3$$

$$\mu_D(x) = \max[\mu_{D_1}(x), \mu_{D_2}(x), \mu_{D_3}(x)]$$

那么耐久性失效的模糊概率为：

$$P_D = \int_0^{\infty} \mu_D(x) f(x) dx = \int_0^{\infty} \max[\mu_{D_1}(x), \mu_{D_2}(x), \mu_{D_3}(x)] f(x) dx$$

其中 $f(x)$ 为对应 $\mu_D(x)$ 的概率密度分布函数。

需要指出的是，我们评估时只考虑对整体结构造成耐久性损伤的因素，如碳化、裂缝、氯离子侵蚀等，而对于仅在局部产生耐久性失效的因素，如冻融破坏、冲磨空蚀破坏等，可根据实际情况考虑。

结构耐久性综合评估结果得出后，就可划分耐久性的等级。评定结果一般可分为四级：第一级，结构整体耐久性严重丧失， P_D 建议取大于 0.5；第二级，中度损伤，建议 $0.1 \leq P_D < 0.5$ ；第三级，轻度损伤，建议 $0.01 \leq P_D < 0.1$ ；第四级，基本完好，建议 $P_D < 0.01$ 。

上述四等级的分法的确定带有一定的主观性。实际上分级是对大量结构耐久性进行计

算,通过统计并与实际情况对照后才能确定,这需要以后进一步做工作。

四、算 例

峰山闸位于江苏省宿迁县内,六零年基本建成,八六年对上部结构(胸墙、工作桥、公路桥)进行了检测,用本文论述的方法计算该水闸的耐久性损伤度。

峰山闸上部结构碳化检测值见表1。将各结构碳化深度进行无量纲化处理,结果见表2,无量纲化后相对碳化深度分布直方图见图1。

碳化深度对耐久性的损伤,其耐久性损伤的模糊特征函数:

$$\mu_D(x) = \begin{cases} x^2/a_0^2 & x < a_0 \\ 1 & x \geq a_0 \end{cases}$$

模糊特征函数见图2。

式中 a_0 可按下列方法确定。公路桥保护层厚度 $a_1=46\text{mm}$,碳化深度实测点数 $n_1=36$,工作桥 $a_2=48\text{mm}$, $n_2=26$,胸墙大梁 $a_3=42\text{mm}$, $n_3=12$,胸墙面板 $a_4=28\text{mm}$, $n_4=11$ 。

$$a_0 = \frac{\sum a_i n_i}{\sum n_i} = \frac{46 \times 36 + 48 \times 26 + 42 \times 12 + 28 \times 11}{(36 + 26 + 12 + 11)} = 43.7\text{mm}$$

因而有

$$\mu_D(x) = \begin{cases} x^2/43.7^2 & x < 43.7 \\ 1 & x \geq 43.7 \end{cases}$$

实际计算中可近似按概率分布图中 x_i/a_i 取值。

由碳化导致的耐久性失效概率(损伤度)为:

$$\begin{aligned} P_{D_1} &= \int_0^{\infty} \mu_D(x) f(x) dx \\ &= \sum_{i=1}^{11} \mu_D(x_i) f(x_i) \Delta x_i \\ &= \sum_{i=1}^{11} \frac{x_i^2}{a_0^2} f(x_i) \Delta x_i \\ &= (0.7)^2 \times 0.035 + (0.9)^2 \times 0.2 + 0.141 \times 1^2 + 0.153 \times 1^2 + 0.165 \times 1^2 + 0.106 \times 1^2 \\ &\quad + 0.094 \times 1^2 + 0.047 \times 1^2 + 0.024 \times 1^2 + 0.012 \times 1^2 + 0.012 \times 1^2 \\ &= 0.944 \end{aligned}$$

该闸裂缝资料不详,只有顺筋裂缝的描述,公路桥36根大梁中,14根出现顺筋裂缝,工作桥72根大梁,27根大梁出现顺筋裂缝,胸墙共72根大梁,45根大梁有顺筋裂缝。实际上,该闸已运行二十多年,碳化深度大多数已超过保护层厚度,并出现了大量的顺筋裂缝,而顺筋裂缝主要是由于保护层碳化引起的。因此,碳化作用是使本水闸耐久性失效的主要原因,耐久性损伤度主要考虑碳化作用。即 $P_D = P_{D_1} = 0.944$ 。

该水闸上部结构整体耐久能力严重丧失,应立即进行维修。

五、结束语

砼结构耐久性受到众多因素影响的复杂问题,本文提出多因素共同作用损伤耐久性的综合评估方法,给出了建议公式,它对结构的评估鉴定是非常有帮助的。但由于现有的试验和实测数据不很充分,模型中所用到的统计参数的取值、模糊特征函数带一定的主观性,

有待于今后进一步研究。

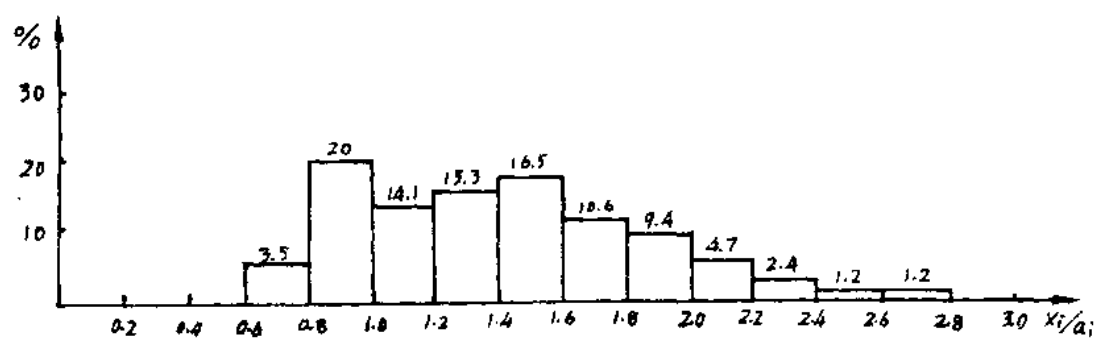


图1 碳化深度分布直方图

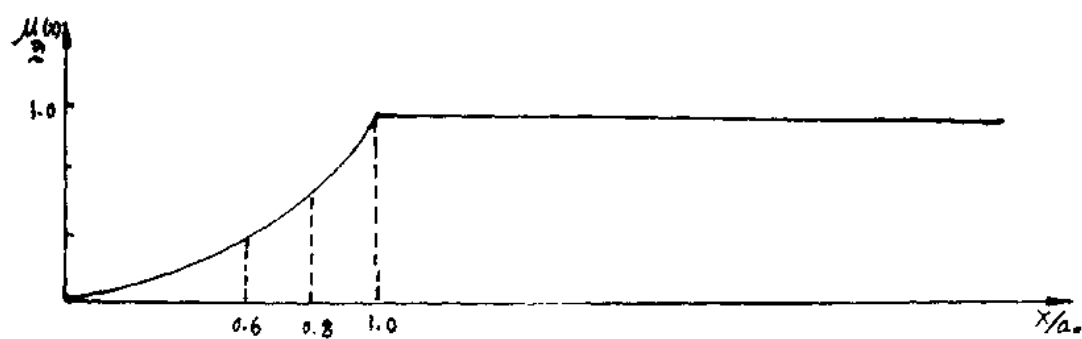


图2 模糊特征函数图

表 1

孔号	公路桥大梁	工作桥大梁	胸墙大梁	胸墙面板
	碳化深度(mm)	碳化深度	碳化深度	碳化深度
8	110.80.76.100.86			82.76
	71.81.77.69.78			
9		59.47	38.52.36.35	
10	86			52.67
16	57.64.56			54.55
18	116	58.51		46
19	51.71.57.52.61		41.56.40.50	
	48.38.56.60			
20		55.47.61.67.69.44. 37		
		30.40		
22	88			56.55
29	72.66.72.72.72.77	62.68.45	35.34.45.44	
	72.79.92.68.76			
28		34.43.45.54.69.44. 41		57.53
		50.52.57		

表 2

编 号	碳化深度	无量纲化 (x_i/a_i)
1	110	2.39
2	80	1.74
3	76	1.65
4	100	2.17
5	86	1.87
6	71	1.54
7	81	1.76
8	77	1.67
9	69	1.5
10	78	1.79
11	86	1.87
12	57	1.24
13	64	1.39
14	56	1.22
15	116	2.52
16	51	1.11
17	71	1.54
18	57	1.24
19	52	1.13
20	61	1.33
21	38	0.83
22	48	1.04
23	56	1.22
24	60	1.30
25	88	1.91
26	72	1.57
27	66	1.43
28	72	1.57
29	72	1.57
30	72	1.57
31	77	1.67
32	72	1.57
33	79	1.72
34	92	2.0
35	68	1.47
36	76	1.65
37	59	1.23
38	47	0.98
39	58	1.21
40	51	1.06
41	55	1.15
42	47	0.98
43	61	1.27

编 号	碳化深度	无量纲化 (x_i/a_i)
44	67	1.40
45	69	1.44
46	44	0.92
47	37	0.77
48	30	0.63
49	40	0.83
50	62	1.29
51	68	1.42
52	45	0.94
53	34	0.71
54	43	0.90
55	45	0.94
56	54	1.13
57	69	1.44
58	44	0.92
59	41	0.86
60	50	1.04
61	52	1.08
62	57	1.19
63	38	0.90
64	52	1.24
65	36	0.86
66	35	0.83
67	41	0.98
68	56	1.33
69	40	0.95
70	50	1.19
71	35	0.83
72	34	0.81
73	45	1.07
74	44	1.05
75	82	2.93
76	76	2.71
77	52	1.86
78	67	2.39
79	54	1.93
80	55	1.96
81	46	1.64
82	56	2.0
83	55	1.96
84	57	2.03
85	53	1.90

保护层厚平均值:公路桥 $a_1=46\text{mm}$,工作桥 $a_2=48$,
胸墙大梁 $a_3=42$,胸墙面板 $a_4=28\text{mm}$

主要参考文献

- 1、高丹盈等 混凝土碳化控制可靠度的模糊概率分析,工业建筑,1993年第3期
- 2、高丹盈等 混凝土碳化速度系数的概率模型研究,工业建筑,1992,(5)
- 3、龚洛书等 混凝土的耐久性及其防护修补,中国建筑工程出版社,1990
- 4、A. W. Beeby. Cracking Cover and Corrosion of Reinforcement, Concrete International, (2)1983
- 5、王铁梦 建筑物裂缝的控制,上海科技出版社,1987
- 6、唐铁羽,钢筋混凝土构件裂缝控制可靠度的模糊概率分析,大连理工大学学报,1986,(6)
- 7、王光远等 结构模糊优化设计 计算结构力学及其应用,1984,(1)
- 8、汪培庄 模糊集合论及其应用 上海科学技术出版社,1983