文章编号 1000-5013(2005)04-0369-04

Monte-Carlo 法氯离子侵蚀下砼构件寿命预测

施 养 杭

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 根据结构寿命及其预测概念,提出基于概率极限状态的预测模型,建立以裂缝宽度达到规范限值为耐久的失效判据.介绍极限状态方程的一般求解方法,建立基于 Monte-Carlo (M-C) 法的耐久寿命预测模型,阐述求解步骤.结果说明,计算值与实际值吻合,反映模型的正确性.

关键词 寿命预测, 混凝土构件, 氯离子侵蚀, 耐久失效判据, Monte-Carlo 法

中图分类号 TU 370.1; TU 311.2 **文献标识码** A

本文提出氯离子侵蚀环境下混凝土结构寿命预测模型,以期解决建筑物及混凝土基础设施的耐久性破坏问题.耐久寿命预测已有一定的研究,最典型的是 Tuutti 模型[1,2].即耐久寿命 $T = t_1 + t_2$, t_1 为混凝土中钢筋钝化膜破坏所需时间, t_2 为钢筋锈蚀导致混凝土保护层开裂,构件达到耐久极限所需时间.耐久寿命的预测则转化为对 t_1, t_2 的计算.目前,寿命预测常采用确定性的方法[3],它不考虑不确定因素的影响,故与现行的设计理论不符.

1 混凝土构件耐久寿命预测的极限状态方程

极限状态是指结构处于某一临界工作状态,定义为失效准则.目前,大多失效准则是以钢筋锈蚀致使混凝土开裂为准,耐久失效年限仅是个经验年限或关于钢筋截面损失的确定值,与混凝土开裂没有直接关系,不能反映混凝土实际损伤.为此,本文提出以裂缝宽度达到规定限值为极限状态,则混凝土构件耐久失效极限状态方程为

$$W - w(x_1, x_2, \cdots, x_n, t) < 0. \tag{1}$$

在式(1)中, W 为裂缝宽度限值,即允许值[4]; $w(x_1, x_2, \cdots, x_n, t)$ 为裂缝宽度函数; x_i $(i = 1, \cdots, n)$ 为影响裂缝宽度的因素; t 为使用时间.设结构的基本随机变量为 $X_1, X_2, \cdots, X_n$,概率密度函数为 $f_x(x_1, x_2, \cdots, x_n)$,失效概率[5]为

$$p_f = P(Z < 0) = \iint_{z<0}\cdots\int f_{x_1}(x_1) f_{x_2}(x_2) \cdots f_{x_n}(x_n)\, \mathrm{d}x_1 \mathrm{d}x_2 \cdots \mathrm{d}x_n. \tag{2}$$

结构抗力 R 和荷载效应 S 的概率密度函数分别为 $f_R(r)$, $f_S(s)$,概率分布函数分别为 $F_R(r)$, $F_S(s)$, R 与 S 相互独立,功能函数为 $g(R, S)$.则结构极限状态方程为 $Z = g(R, S) = R - S$,其失效概率为

$$p_f = P(Z < 0) = \iint_{r<s} f_R(r) f_S(s)\, \mathrm{d}r \cdot \mathrm{d}s = \int_0^{+\infty}\Big[\int_0^{s} f_R(r)\, \mathrm{d}r\Big] f_S(s)\, \mathrm{d}s = \int_0^{+\infty} F_R(s) f_S(s)\, \mathrm{d}s. \tag{3}$$

设 R 和 S 服从正态分布,则可得失效概率 p_f 和可靠度指标 β 的关系为

$$p_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{t^2}{2}\right)} \mathrm{d}t = \Phi(-\beta), \qquad \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = (\mu_R - \mu_S) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}. \tag{4}$$

由此可见,本法简便,但对非正态分布随机变量和非线性极限状态函数的求解将有较大误差.对非函数型极限状态,则无能为力.

收稿日期 2005-05-15

作者简介 施养杭(1961-),男,教授,博士,主要从事土木工程抗震与结构寿命的研究. E-mail: d.s666@163.com

基金项目 国家自然科学基金资助项目(59979018); 建设部国家混凝土规范第 6 批科研基金资助项目(GBKY6001)

2 M-C 法的耐久寿命预测模型

2.1 M-C 法的主要特点及计算过程

M-C 法收敛速度快,与随机变量的数量及相关性无关,其模拟过程与极限状态函数的复杂程度无关,可直接解决问题. 同时,数值模拟的误差容易确定,特别适用于非函数方程. 氯离子侵入混凝土的计算模型采用有限差分法求解[6],其方程属非函数型. 故采用 M-C 法求解,预测耐久寿命. 计算过程为参数采样、初锈时间 t_1 计算、保护层开裂限值历时 t_2 分析、失效判断及失效概率计算.

2.2 参数抽样

由随机 Matlab 程序包产生参数,得到服从指定概率分布的样本,其结构失效概率为 $p_f = P(G(X) < 0) = \int_{D_f} f(X)\,\mathrm{d}X$. 按照 M-C 法,则可变换为

$$\hat{p}_f = (1/N)\sum_{i=1}^{N} I[G(\hat{X})_i]. \tag{5}$$

在式(5)中, N 为抽样总数. 当 $G(\hat{X})_i < 0$ 时, $I[G(\hat{X})_i] = 1$;反之, $I[G(\hat{X})_i] = 0$. ;冠标"^"表示抽样值. 那么,抽样方差为 $\sigma^2 = (1/N)\hat{p}_f(1 - \hat{p}_f)$. 为保证抽样误差足够小,取置信度为 95 %,即有 $|\hat{p}_f - p_f| \le z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma = 2\sqrt{(\hat{p}_f(1 - \hat{p}_f))/N}$. 又设 ε 相对误差,则有 $\varepsilon = (|\hat{p}_f - p_f|)/p_f < 2\sqrt{(1 - \hat{p}_f)/(N \cdot \hat{p}_f)}$. 因 $\hat{p}_f$ 通常为一小量,则可近似表示为 $\varepsilon = 2/\sqrt{N \cdot \hat{p}_f}$, $N = 4/(\hat{p}_f \cdot \varepsilon^2)$. 当 $\varepsilon = 0.2$ 时,抽样数必须满足 $N = 100/\hat{p}_f$. 其中, N 为对应于 $\hat{p}_f$ 的抽样数. 为对 p_f 有足够的可靠估计,抽样数应大于 1 500. 图 1 为 M-C 法计算不同采样数(各 100 次)求失效概率的 Box 图. 由图可见,当抽样数超过 500 次时,计算结果的平均值十分接近;当抽样数为 5 000 次时,离散程度已足够小. 本文取样本数为 5 000,计算精度令人满意.

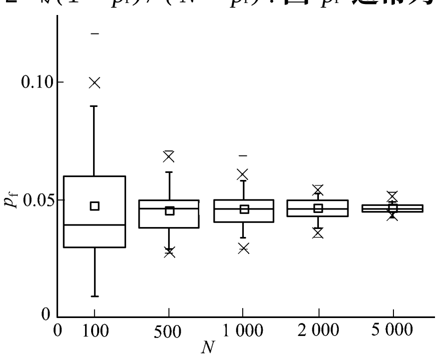


图 1 不同采样数对计算结果的影响

2.3 钢筋初锈时间的计算

钢筋初锈时间 t_1 的计算,采用文[6]的模型. 即把边界氯离子最大累积浓度、临界浓度、扩散系数和混凝土保护层厚度作为基本输入参数. 其概率分布服从正态分布或对数正态分布,使用随机数产生函数进行抽样.

2.4 保护层胀裂时间

由混凝土保护层开裂及其发展[6],可得 $t_2 = \Delta D_{cr}/(0.023 \cdot i_{corr})$. 式中, ΔD_{cr} 为保护出现裂缝宽度 W 所需的钢筋直径总损失量; i_{corr} 为钢筋锈蚀年电流密度(μA $\cdot$(cm^2 $\cdot a)^{-1}$).

2.5 极限状态方程失效判断

氯离子环境下混凝土构件耐久寿命的终结,按式(1)判定. 考虑到使用寿命,其极限状态为 $Z = t - t_1 - t_2$. 其中, t 为构件使用时间. 当 $Z < 0$ 时,表示失效,即可求出对应的失效概率和耐久寿命.

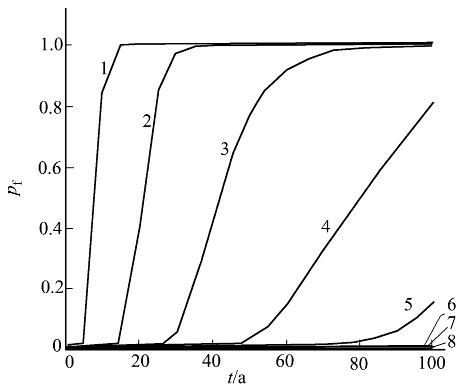
3 计算实例和分析

闽南某地全年的月最高温度 $\theta_{max} = 35$ ℃,最低温度 $\theta_{min} = 12$ ℃. 混凝土强度等级 C20,水灰比 0.4,保护层厚 $d = 40$ mm,钢筋直径 $\varnothing = 20$ mm,边界氯离子累积浓度最大值 $C_{s,max} = 15$ kg $\cdot$ m^{-3},边界氯离子浓度($C_{s,crit}$)累积率 $k = 0.5$ kg $\cdot$(m^3 $\cdot$a)$^{-1}$,钢筋锈蚀速度 $i_{corr} = 1$ μA $\cdot$(cm^2 $\cdot a)^{-1}$. 各计算参数抽样取值,如表 1 所示;计算结果如图 2~5 所示. 在图 2,3,5 中,曲线 1~8 对应的保护层厚(mm)分别为

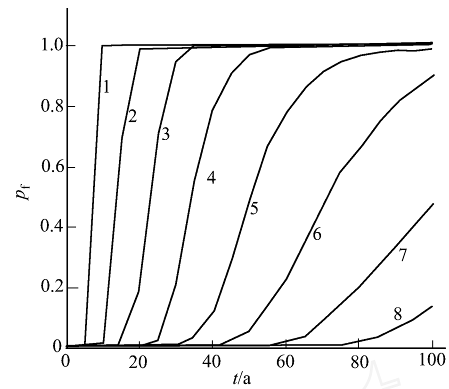
表 1 输入参数概率分布取值

参 数	概率分布	参 数	概率分布
$D_{ref}/m^2 \cdot d^{-1}$	正态(6.87 ×10^{-7},6.87 ×10^{-8})	$\varnothing$/mm	正态(20, 1)
$C_{s,max}/kg \cdot m^{-3}$	对数正态(15, 3)	f_{tk}/MPa	正态(1.54, 0.15)
$C_{s,crit}/kg \cdot m^{-3}$	正态(2, 0.2)	E_{con}/MPa	正态(25 500, 2 550)
d/mm	对数正态(40, 4)	$i_{corr}/\mu A \cdot (cm^2 \cdot a)^{-1}$	正态(1, 0.1)

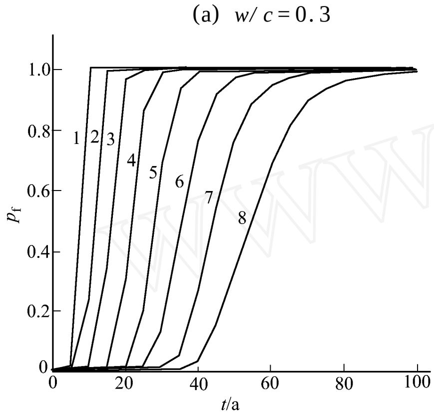
10,20,30,40,50,60,70 和 80. 在图 4 中,曲线 1~4 对应的参数分别 $C_{s,max} = 10$ kg $\cdot$ m^{-3}, $C_{s,crit} = 2.0$



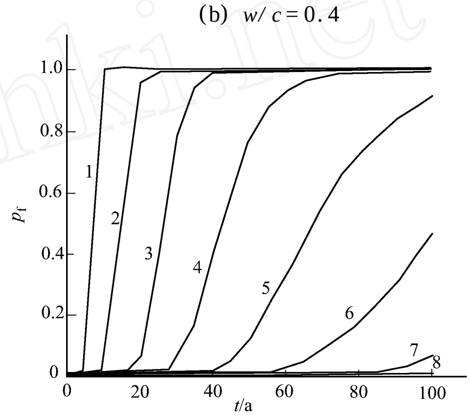
(a)　$w/c = 0.3$



(b)　$w/c = 0.4$

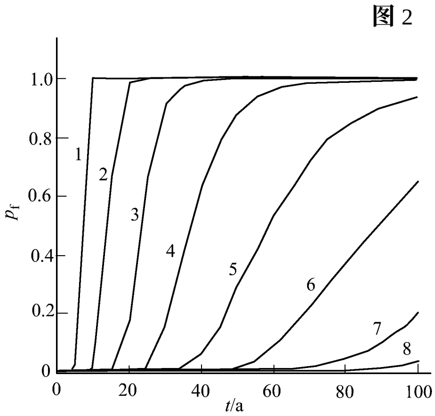


(c)　$w/c = 0.5$

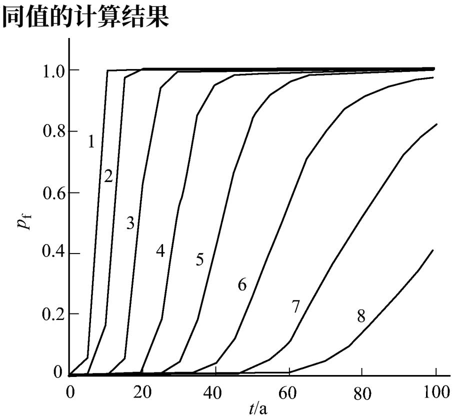


(d)　$w/c = 0.5$(掺 0.30 的粉煤灰)

图 2　水灰比取不同值的计算结果



(a)　$C_{s,max} = 10$



(b)　$C_{s,crit} = 1.4$

图 3　不同保护层厚的计算结果

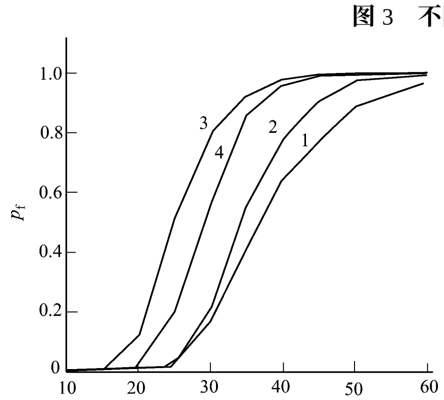


图 4　不同氯离子扩散边界条件的计算结果

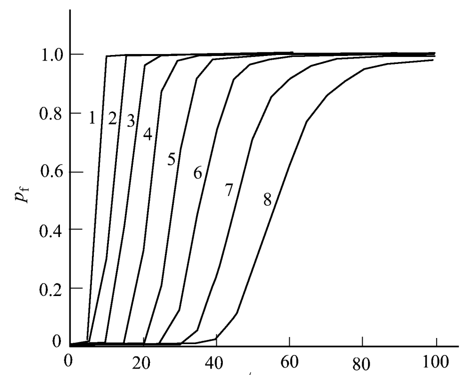


图 5　温度和相对湿度变化不同保护层厚的计算结果

kg ·m^{-3} , k = 0.5 kg ·(m^3 ·a)$^{-1}$; $C_{s,max}$ = 15 kg ·m^{-3} , $C_{s,crit}$ = 2.0 kg ·m^{-3} , k = 0.5 kg ·(m^3 ·a)$^{-1}$; $C_{s,max}$ = 15 kg ·m^{-3} , $C_{s,crit}$ = 2.0 kg ·m^{-3} , k = 1.0 kg ·(m^3 ·a)$^{-1}$; $C_{s,max}$ = 15 kg ·m^{-3} , $C_{s,crit}$ = 1.4 kg ·m^{-3} , k = 0.5 kg ·(m^3 ·a)$^{-1}$. 对可接受失效概率 p_f = 0.1 下,对不同影响参数取值的寿命预测值结果(保护层厚取 40 mm) ,如表 2 所示. 由此可见 ,采用 M-C 法预测混凝土构件耐久寿命 ,可以将各种随机影响因素 ,按独立作用或交互作用进行分析 ,克服了确定性预测方法的不足 ,能真实地反映出混凝土构件的耐久寿命.

表 2 不同计算参数得到的耐久寿命预测值

参 数	w/c = 0.4	w/c = 0.3	w/c = 0.5	w/c = 0.5(掺 0.30 的粉煤灰)
概率法寿命/ a	27.0	56.5	16.5	32.5
确定法寿命/ a	34.0	80.1	21.9	42.7
参 数	$C_{s,max}$ = 10 kg ·m^{-3}	$C_{s,max}$ = 20 kg ·m^{-3}	C_{ritr} = 1.4 kg ·m^{-3}	k = 1.0 kg ·(m^3 ·a)$^{-1}$
概率法寿命/ a	27.8	27.0	22.3	19.2
确定法寿命/ a	37.2	34.0	28.9	24.8
参 数	∅ = 12 mm	i_{corr} = 0.5 μA ·cm^{-2}	C30	θ_{max} = 40 , RH_{max} = 90 % θ_{min} = 20 , RH_{min} = 70 %
概率法寿命/ a	28.7	31.3	27.3	16.3
确定法寿命/ a	36.2	39.3	34.9	21.6

4 结束语

以锈蚀胀裂、裂缝宽度限值为耐久性极限状态 ,即失效判据 ,概念清楚 ,符合概率极限状态设计理论. 基于概率极限状态的构件耐久寿命预测方法 ,符合工程实际情况.

参 考 文 献

1 Tuutti P D. Corrosion of steel in concrete[J]. CIB Forskning Research ,1982 ,(2) :156～161

2 袁迎署. 混凝土内钢筋锈蚀速度预计的试验研究[A]. 见:陈肇元主编. 混凝土结构耐久性设计会议文集[C]. 北京:清华大学出版社 ,2002. 185～195

3 Weyers R E. Service life model for concrete structure in choride laden environments[J]. ACI Materials Journal ,1998 , 95(4) :445～453

4 中华人民共和国建设部. GB 50068 - 2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:建筑工业出版社 ,2001. 9～11

5 赵国藩 ,金伟良 ,贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京:建筑工业出版社 ,2000. 36～79

6 施养杭 ,罗 刚. 有限差分法氯离子侵入混凝土计算模型[J]. 华侨大学学报(自然科学版) ,2004 ,25(1) :58～61

Life Forcast of Concrete Member under Choride Erosion by Monte-Carlo Method

Shi Yanghang

(College of Civil Engineering , Huaqiao University , 362021 , Quanzhou , China)

Abstract According to the concepts of structure life and forecast , the author offers a forecast model based on the probability limit state , taking crack width up to the code limit as the criterion of durability failure. A general method to solve limit state equation is also introduced. Moreover , the author established a forecast model of durability life by Monte-Carlo method , and set forth the steps of solution. The calculation results agree with the ones of practical examples , indicating the validity of this model.

Keywords life forcast , concrete member , chloride erosion , criterion of durability voidance , Monte-Carlo method