

文章编号:1006-2467(2020)04-0413-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.04.010

基于初始缺陷的混凝土锈裂模型时变可靠度

张强^{1,2}, 卢朝辉^{1,2}, 赵然², 伦培元²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

摘要: 根据断裂力学理论,建立了考虑初始缺陷的混凝土结构锈胀时间预测模型,以此为基础建立了结构寿命预测极限状态函数,并发展了基于三阶矩法的时变可靠度分析方法. 研究表明:与 Monte-Carlo 方法对比,在计算结果较为吻合的情况下,本文方法减少了计算次数,提高了分析效率;在混凝土材料参数中,混凝土结构失效概率对保护层厚度的随机性和不确定性最为敏感,失效概率对随机变量概率分布类型敏感性较差.

关键词: 初始缺陷; 断裂力学; 三阶矩法; 失效概率

中图分类号: TU 528

文献标志码: A

Time-Varying Reliability of Rust Cracking Model Based on Initial Defect

ZHANG Qiang^{1,2}, LU Zhaohui^{1,2}, ZHAO Ran², LUN Peiyuan²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In this paper, the prediction model of rust expansion time of concrete structures with the consideration of initial defects is established based on the theory of fracture mechanics. The limit state function of structure life prediction is established and an analysis method of time-dependent reliability based on three-order moment method is developed. The results show that compared with Monte-Carlo method, this method reduces the calculation time and improves the analysis efficiency when the calculated results are more consistent with each other. Among the parameters of concrete materials, the failure probability of concrete structure is the most sensitive to the randomness and uncertainty of cover thickness and less sensitive to the probability distribution type of random variables.

Key words: initial defect; fracture mechanics; three-order moment method; failure probability

钢筋锈蚀是引起混凝土结构耐久性不足的最主要原因,而耐久性不足导致结构发生破坏的事故时有发生,造成了大量的经济损失和人员伤亡. 改革开放以来,我国的城市化进程不断加快,但城市基础化建设已经由大规模建造逐步进入长期安全运营管理与高效维护阶段,确保作为社会生产和生活运转载

体的基础设施工程结构全寿命服役可靠性,钢筋锈蚀导致的结构耐久性损伤是现阶段亟需解决的重大课题^[1].

经过近半个世纪对钢筋锈蚀问题的研究,取得了大量的研究成果. 如 Jin 等^[2]考虑细观裂缝扩展过程,建立了临界锈胀力预测模型; Wong 等^[3]采

收稿日期:2018-11-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908009,51738001)

作者简介:张强(1988-),男,湖南省永州市人,助理研究员,从事结构可靠度的研究.

通信作者:伦培元,男,副研究员,电话(Tel.):18570028703;E-mail:276805672@qq.com.

用细观图像分析方法,揭示了钢筋锈蚀产物发展及致使混凝土保护层开裂的过程.邵伟等^[4]推导了氯离子对钢筋的锈蚀过程,并分段建立了氯离子侵蚀混凝土管柱的寿命预测模型;文献[5-6]采用扩展有限元法和过盈装配的方式,建立了混凝土保护层非均匀锈胀开裂有限元模型;Andrade等^[7-8]试验研究了混凝土保护层开裂时刻均匀钢筋锈蚀率的变化规律,并建立了混凝土锈胀胀裂数值分析模型;文献[9-10]在此基础上引入非均匀锈胀压力模型等,为进一步揭示钢筋锈蚀与混凝土服役寿命的规律提供了基础.但是,现有模型均忽视了材料初始缺陷下对锈胀力和开裂时间造成的影响,不能细观地把握裂缝扩展过程.

事实上,由钢筋锈蚀引起的混凝土结构耐久性下降过程包括诸多不确定因素,如采用确定化的理论模型来预测结构开裂时变损伤过程,恐与实际情况有较大出入.为研究混凝土结构因钢筋锈蚀造成的耐久性不足所致的可靠度衰减过程,研究者进行了诸多尝试.樊玲等^[11]基于弹性断裂力学和坑蚀模型,建立坑蚀锈胀裂缝时变可靠度模型,并采用 Monte-Carlo 方法求得钢筋混凝土锈胀时变可靠度;周敏^[12]考虑钢筋腐蚀对桥梁结构的影响,基于改进的一次二阶矩法建立了3种桥梁结构耐久性极限状态寿命及其寿命终止目标.但是一次二阶矩法和 Monte-Carlo 法分别存在求导迭代效率差、抽样计算量大等不足,因此选择一种求解思路清楚、计算效率相对较高、计算精度满足要求的保护层锈胀开

裂的可靠度方法显得尤为重要.

鉴于此,本文基于断裂力学理论构建了考虑材料初始缺陷的钢筋锈胀混凝土保护层开裂时间预测模型,在该确定化预测模型的基础上,发展了混凝土结构时变可靠度分析的三阶矩法,应用于混凝土保护层锈胀开裂失效概率分析中.

1 基于材料初始损伤的开裂时间预测模型

1.1 初始缺陷的定义

在实际锈蚀过程中,将材料初始缺陷形状简化为半椭圆形,如图1所示.图中:点A、点B代表半椭圆形裂缝尖端; a 为径向长度; β 为缺陷角度($0 \leq \beta \leq \pi$); q 为均匀径向压力;基于文献[13]提出的开裂三阶段模型,混凝土构件内初始缺陷裂缝尖端点A、B的应力强度因子可以表示为

$$K_A = pF_A \sqrt{\pi a/Q} \quad (1)$$

$$K_B = pF_B \sqrt{\pi a/Q} \quad (2)$$

式中: p 为锈蚀产物膨胀产生的内部压力; F_A 、 F_B 为形状系数,

$$F_A = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} (G_0 M_{1A} + G_1 M_{2A} + G_2 M_{3A} + G_3)$$

$$F_B = \frac{2\sqrt{Q}}{\pi} (G_0 M_{1B} + G_4 M_{2B} + G_5 M_{3B} + G_6)$$

系数 G_i ($i = 0, 1, \dots, 6$)、 M_{iA} 、 M_{jB} ($j = 1, 2, 3$) 主要由裂缝以及钢筋混凝土几何尺寸决定; Q 为椭圆形状系数.以上系数均可参照文献[14-15]进行计算.

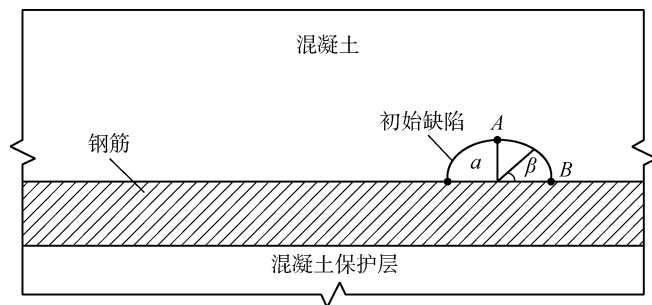


图1 初始裂缝示意图

Fig. 1 Initial crack schematic diagram

1.2 断裂准则的确定

基于断裂力学理论,采用双 K 断裂参数^[16]对混凝土锈胀开裂过程进行表述,其表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} K_I &< K_{Ic}^{ini}, && \text{无裂缝扩展} \\ K_{Ic}^{ini} &\leq K_I < K_{Ic}^{un}, && \text{裂缝稳态扩展} \\ K_{Ic}^{un} &\leq K_I, && \text{裂缝失稳扩展} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: K_I 为混凝土应力强度因子; K_{Ic}^{ini} 为初始断裂韧

度; K_{Ic}^{un} 为失稳断裂韧度.

由于双 K 断裂参数均由试验测得,同时因混凝土结构服役环境、材性及初始缺陷的差异性,难以应用已有的试验数据.本文在文献[17]的基础上对应力强度因子进行修正,表达式如下:

$$K_{Ics} = K_{Ic} \sqrt{\frac{C}{h}} \left(\frac{V}{2RC} \right)^{1/a'} \quad (h \leq 2 \text{ m}) \quad (6)$$

式中: h 、 V 、 K_{Ic} 分别为标准模型的高、体积和断裂韧

度; C 为混凝土保护层厚度; R 为钢筋直径; α' 为威布尔参数,可按照文献[12]进行定义。

1.3 临界锈胀力和保护层开裂时间的定义

临界锈胀力计算方面,假定材料初始缺陷下钢筋锈胀裂缝动态扩展过程中具有两个重要临界点,即初始阶段和失稳扩展阶段.在裂缝扩展临界状态下的裂缝应力强度因子与双 K 断裂参数相等,将其代入应力强度因子公式中即可以得到初始缺陷点 A 、点 B 的初始开裂锈胀力和保护层完全开裂时的锈胀力,根据文献成果以初始缺陷点 A 的开裂状态作为判断标准^[18],故可得到临界锈胀力计算公式。

初始缺陷开始开裂时的锈胀力:

$$p^{\text{ini}} = \frac{K_{\text{Ics}}^{\text{ini}}}{F_A \sqrt{\pi a / Q}}$$

(7)

式中: $K_{\text{Ics}}^{\text{ini}}$ 表示经修正后的初始断裂韧度。

混凝土保护层完全开裂时的锈胀力:

$$p^{\text{un}} = \frac{K_{\text{Ics}}^{\text{un}}}{F_A \sqrt{\pi (a + \Delta a^*) / Q}}$$

(8)

式中: Δa^* 表示裂缝扩散区域长度,可按照文献[15]进行计算。

保护层开裂时间方面,根据前期的研究成果,钢筋混凝土构件保护层开裂时间可以表示为^[15,19]

$$t_{\text{cr}} = [0.086 N R C F (1 - w / c)^{1.64} M^{-1} \rho_{\text{cr}}]^{1.41} \quad (9)$$

式中: N 为离子价; F 为法拉第常数; w/c 为水灰比; M 表示锈蚀产物的分子量; ρ_{cr} 为保护层锈胀开裂时的锈蚀率,可按照文献[15]进行计算。

2 钢筋锈蚀作用下保护层开裂破坏极限状态函数建立

根据文献[20],考虑初始缺陷的工程结构锈胀开裂可靠度分析的极限状态函数可以表述为

$$G(L, S, t) = L(t) - S(t) \quad (10)$$

式中: $S(t)$ 表示荷载效应在 t 时刻对结构的影响; $L(t)$ 表示在 t 时刻结构其自身的抗力.由于锈胀抗力难以随时间变化进行监测计算,按照可靠度评估标准,可以将上述算式转换为时间的工程函数:

$$P_{\text{f}}(t) = P[G(L, S, t) \leq 0] = P[S(t) \geq L(t)] \quad (11)$$

随着钢筋锈蚀产物逐渐膨胀,当混凝土应力强度因子 K_{I} 超过断裂韧度 K_{Ic} 时,导致混凝土保护层开裂.如果采用 t_{cr} (由断裂韧度 K_{Ic} 确定,计算参照式(9))表示裂缝扩展到混凝土表面的临界时间,那么上式可以转换为

$$P_{\text{f},\text{c}}(t) = P[t_j \geq t_{\text{cr}}] \quad (12)$$

式中: t_j 代表混凝土服役时间; t_{cr} 代表混凝土开裂时

刻临界时间。

对于功能函数 $Z=G(X)$,其各阶矩可以表示为以下形式:

$$\mu_G = E[G(X)] = \int G(x) f_X(x) \mathrm{d}x \quad (13)$$

$$\sigma_G^2 = E[(G(X) - \mu_G)^2] = \int (G(X) - \mu_G)^2 f_X(x) \mathrm{d}x \quad (14)$$

$$\sigma_{G\alpha_{kG}}^k = E[(G(X) - \mu_G)^k] = \int (G(X) - \mu_G)^k f_X(x) \mathrm{d}x, \quad k > 2 \quad (15)$$

式中: μ_G 为功能函数的均值; σ_G^2 为功能函数的方差; α_{kG} 为功能函数的 k 阶中心距; $f_X(x)$ 为基本随机变量 X 的联合概率密度函数.基本随机变量的个数会影响到功能函数矩的求解效率,本文采用结构寿命预测模型所涉及的混凝土材料参数作为随机变量来处理,计算参数取值为:混凝土泊松比为 0.18,混凝土蠕变系数为 2.0,锈蚀产物全为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,混凝土与钢筋交界面处的孔隙厚度为 $12.5 \mu\text{m}$ ^[13, 21],锈蚀膨胀比率 η 按照文献[10]取值范围为 2~4,各项参数的平均值和变异系数汇总如表 1 所示(表中 E_{ef} 为弹性模量, f_{t} 为混凝土抗拉强度)。

表 1 随机变量汇总
Tab. 1 Summary of random variables

基本参数	平均值	变异系数	参考文献
C/mm	40	0.2	[10]
R/mm	8	0.15	[10]
E_{ef}/GPa	27	0.12	[10]
f_{t}/MPa	3.3	0.2	[10]
η	2.0	0.2	[10]
K_{Ic}	2.072	0.177	[22]
w/c	0.45	0.1	[22]

当存在 n 个基本随机变量时,必须针对函数计算 m^n 次才能确定函数的前三阶矩.为降低计算量,采用文献[23]提出的一维减维积分方法,将多变量的功能函数简化成一系列单个随机变量功能函数之和:

$$\mu_G \cong \sum_{i=1}^n (\mu_i - G_{\mu}) + G_{\mu} \quad (16)$$

$$\sigma_G^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \quad (17)$$

$$\alpha_{3G} = \frac{1}{\sigma_G^3} \sum_{i=1}^n \sigma_i^3 \alpha_{3i} \quad (18)$$

式中: μ_G 、 σ_G 、 α_{3G} 分别为功能函数 G 的均值、标准差、偏度,可以采用标准正态空间上的点估计来计算

求得。

在得到功能函数的前三阶矩后,采用下式计算混凝土结构可靠度指标 β_{3M} 及失效概率 P_f ^[24]:

$$\beta_{3M} = \frac{-\text{sign}(\alpha_{3G})}{\sqrt{\ln A}} \ln \sqrt{A} \left(1 + \frac{\beta_{2M}}{\mu_b} \right) \quad (19)$$

$$P_f = \Phi^{-1}(-\beta_{3M}) \quad (20)$$

式中:

$$A = 1 + \frac{1}{\mu_b^2}$$

$$\mu_b = (a+b) \frac{1}{3} + (a-b) \frac{1}{3} - \frac{1}{\alpha_{3G}}$$

$$a = -\frac{1}{\alpha_{3G}} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\alpha_{3G}^2} \right)$$

$$b = \frac{1}{2\alpha_{3G}^2} \sqrt{\alpha_{3G}^2 + 4}$$

3 混凝土保护层锈蚀开裂可靠度分析

3.1 算法验证

因保护层开裂时间预测模型已在文献[15]中进行验证,现需对本文发展的工程结构锈胀可靠度分析的三阶矩方法(TM)进行验证。采用传统 Monte-Carlo 方法(MC)以不同抽样次数的方式进行对比,参见图 2。图中: P_f 为保护层失效概率; t_{cr} 为开裂时间。对比可知当 Monte-Carlo 方法总抽样次数小于 10 000 次时,计算得到的失效概率不稳定的。当抽样次数超过 10 000 次后,高阶矩法分析结果与 Monte-Carlo 法计算得到的结果吻合较好。从中可以看出,高阶矩法只需计算功能函数的前三阶矩即可获得保护层失效概率,相比而言较大地提高了计算效率,且精确度在接受范围内。

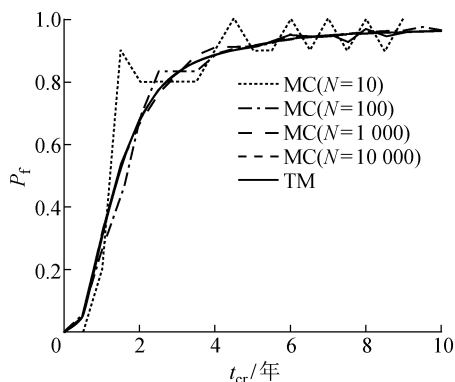


图 2 TM 与 MC 分析保护层失效概率对比

Fig. 2 Failure probability of cover thickness by TM and MC

3.2 实际工程验证

为验证本文提出的混凝土锈蚀开裂时变可靠度

模型在实际工程中的应用,对文献[13,20]中的 4 组试件进行保护层失效概率计算,计算数据对比参见图 3。在实际工程中,一般假定当失效概率超过 50% 时,混凝土保护层已经完全开裂。由图可知,当失效概率为 50% 时, S1 试件的开裂时间为 2.0 年左右, S2 试件的开裂时间为 3.7 年, S3 试件的开裂时间为 0.7 年, S4 试件的开裂时间约为 2.3 年,与实际试件混凝土保护层开裂时间基本一致。

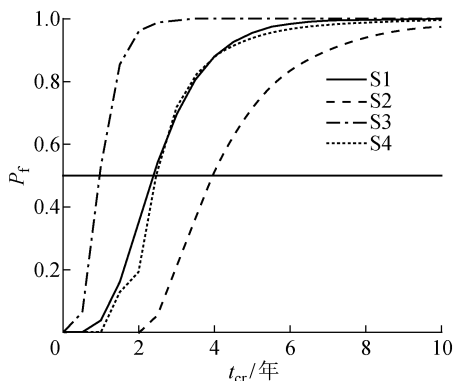


图 3 混凝土保护层开裂时间失效概率对比

Fig. 3 Comparison for failure probabilities of cracking time of concrete covers

3.3 随机变量均值对失效概率敏感性分析

3.3.1 保护层厚度 当混凝土保护层厚度均值为 20, 40, 60 mm 时,采用高阶矩法与 Monte-Carlo 方法计算保护层失效概率时变趋势,具体参见图 4。

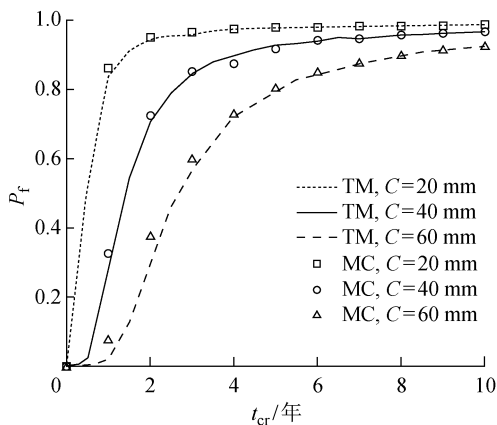


图 4 不同保护层厚度对保护层失效概率的影响

Fig. 4 Influence of the cover thickness on the failure probability of cover cracking

由图 4 可知,高阶矩法与 Monte-Carlo 方法变化趋势基本一致,进一步说明高阶矩法在考虑不同均值计算中的准确性。另外,从图中可以看出,保护层厚度对混凝土保护层失效概率有较大影响。当失效概率为 50% 时,当保护层厚度从 20 mm 增加到

60 mm 时,混凝土保护层开裂时间从大约 0.4 年增加到大约 2.8 年,说明增加保护层厚度可有效延长混凝土构件的服役时间。

3.3.2 钢筋半径

图 5 表示钢筋半径均值为 8,

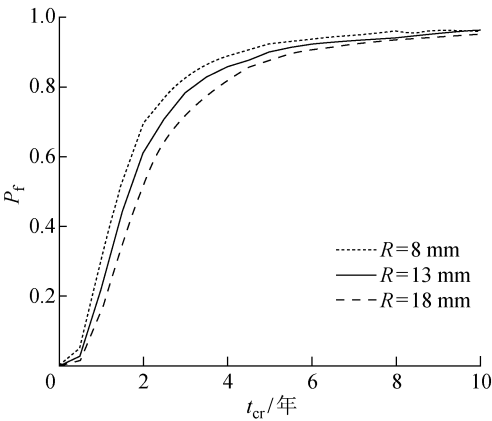


图 5 不同钢筋半径对保护层失效概率的影响

Fig. 5 Influence of the radius of reinforcing bar on the failure probability of cover cracking

13,18 mm 时失效概率时变趋势。

由图 5 可知,当保护层失效概率为 50%,钢筋半径从 8 mm 增加到 18 mm 时,混凝土保护层开裂时间从大约 1.3 年增加到大约 2.0 年.说明增加混凝土中钢筋半径能够延长混凝土构件的服役时间,但影响较小,不建议作为主要方法。

3.3.3 混凝土抗拉强度、弹性模量和失稳断裂初度

图 6 表示混凝土不同抗拉强度均值、弹性模量均值、失稳断裂初度均值对保护层开裂失效概率时变趋势。

由图 6 可知,当失效概率为 50%时,混凝土抗拉强度与失稳断裂初度对混凝土构件保护层开裂时间的影响趋势基本相同,并且随着参数数值增大,开裂时间均相应的延长.与此同时,混凝土弹性模量对开裂时间呈负相关趋势。

3.3.4 锈蚀产物体积膨胀比

图 7 示出了 $\eta=2, 3, 4$ 时保护层失效概率时变趋势。

由图 7 可知,混凝土保护层失效概率对锈蚀产

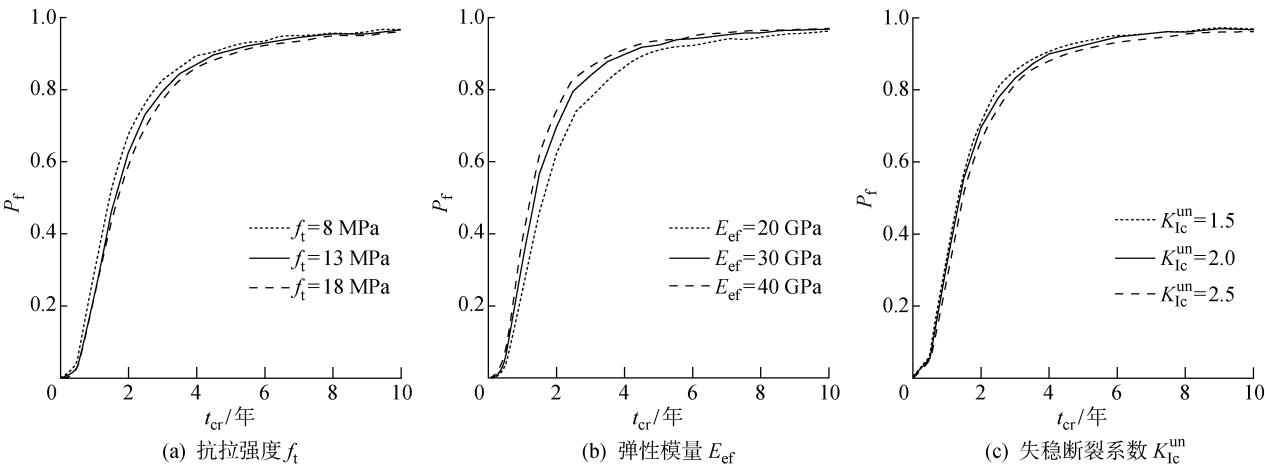


图 6 f_t 、 E_{ef} 以及 K_{lc}^{un} 对保护层失效概率的影响

Fig. 6 Influence of f_t , E_{ef} and K_{lc}^{un} on the failure probability of cover cracking

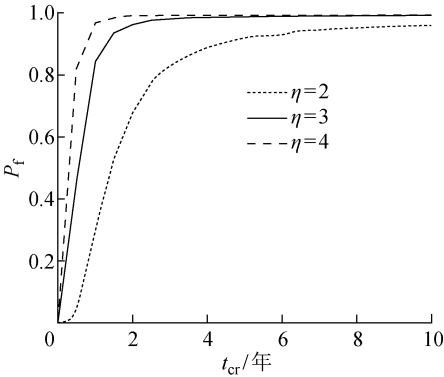


图 7 不同体积膨胀比对保护层失效概率的影响

Fig. 7 Influence of the expansion rates of the corrosion products on the failure probability of cover cracking

物体体积膨胀比较为敏感,当失效概率为定值时,体积膨胀比为 4 的较之膨胀比较小的构件,其开裂时间急剧缩短.这是因为,基于理论推导的保护层初始开裂所需的锈胀力可视为固定标准值,当体积膨胀比不断增大,锈蚀所产生的锈胀力越快突破开裂标准值,所以时间也随之缩短。

3.3.5 水灰比

图 8 示出了水灰比为 0.40,0.45,0.50 时混凝土保护层锈胀失效概率时变趋势.由图 8 可知,混凝土失效概率对水灰比的均值变化较为敏感.当失效概率为 50%时, $w/c=0.50$ 时,混凝土构件保护层开裂时间为 1.1 年左右;当 $w/c=0.40$ 时,混凝土构件保护层开裂时间为 1.7 年左右。

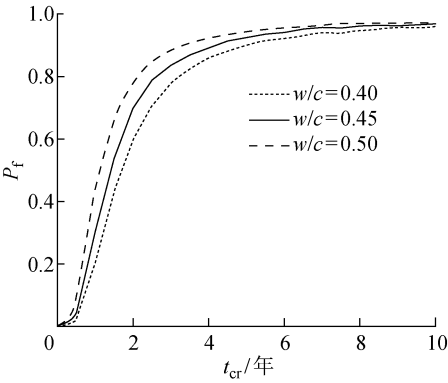


图 8 不同水灰比对保护层失效概率的影响
Fig. 8 Influence of the water cement ratio on the failure probability of cover cracking

3.4 随机变量变异系数对失效概率敏感性分析

在混凝土结构漫长的服役过程中,对保护层失效概率产生影响的重要参数难以确定,且随着时间推移发生改变,因而有必要对随机变量的变异系数(COV)进行考虑.图 9 表示混凝土保护层开裂失效过程中不同变异系数对保护层失效概率敏感性分析曲线.

由图 9(a)、(f)、(g)对比可知,尽管不同变异系数对保护层失效概率的影响均交汇在概率为 50% 处,但是在失效概率敏感性上均表现出明显的差异.图 9(f)中可以看出,锈蚀产物膨胀比所对应的变异系数敏感性对比中差异性最大,与文献[25]研究结果基本一致.当开裂时间达到 10 年时,变异系数为

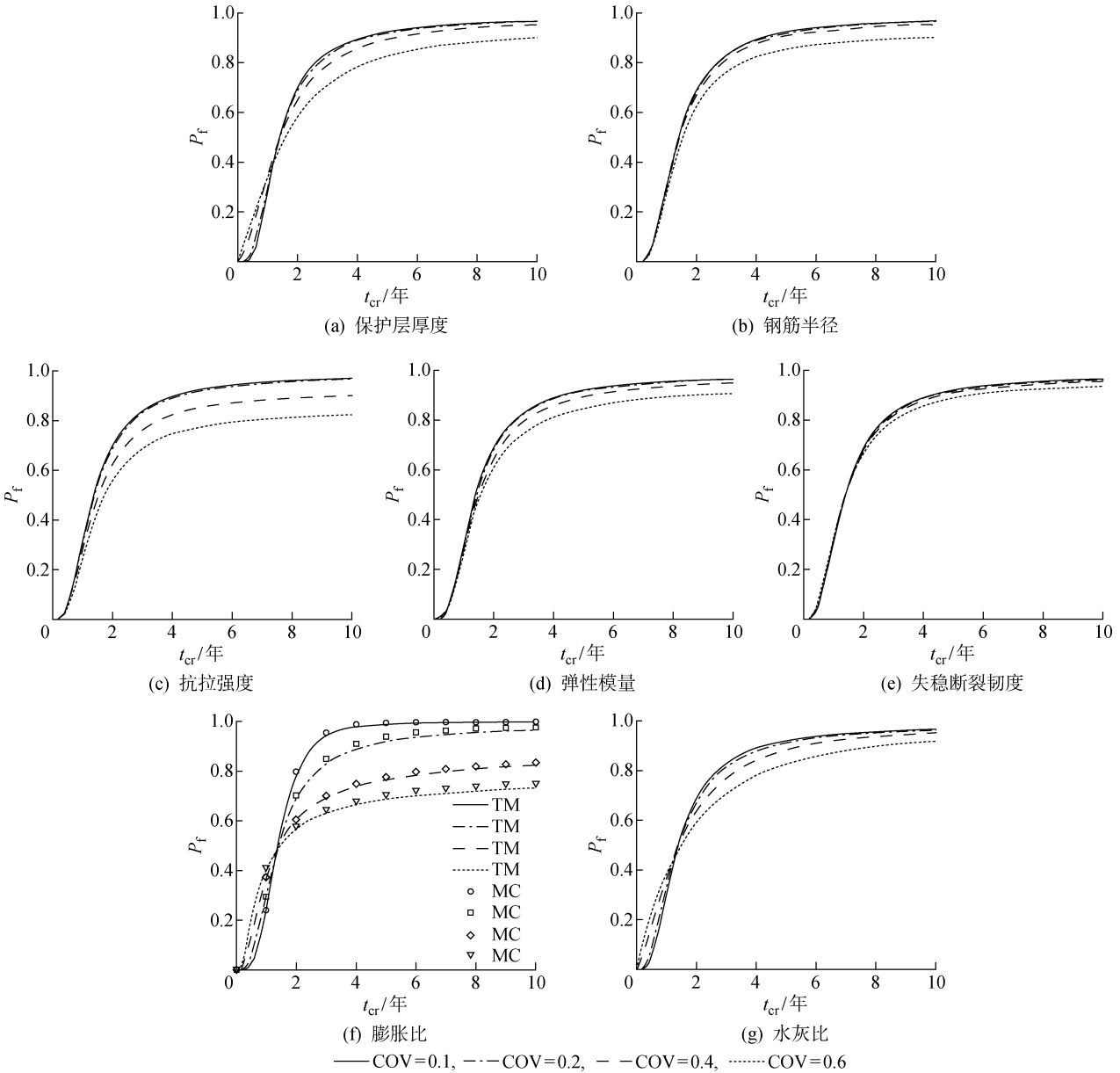


图 9 各参数变异系数对保护层失效概率的影响
Fig. 9 Influence of variation coefficients of each parameter on the failure probability of cover cracking

0.6 时,其保护层失效概率为 0.7 左右;而变异系数为 0.1 时,其保护层失效概率为 1. 在图 9(b)~(d) 中,钢筋半径、抗拉强度、弹性模量、失稳断裂韧度等变量在失效概率到达 60% 前,均表现出一定的平稳性. 最后,针对差异性较大的膨胀比参数,通过与 Monte-Carlo 方法进行了对比,结果吻合较好,进一步说明了本文提出的高阶矩法计算的精确性.

3.5 概率分布的影响

由于混凝土结构实际服役环境复杂多变,如采

用单一确定的概率分布对随机变量进行描述恐造成差异,所以考虑采用不同的概率分布对保护层失效概率进行计算. 基于以上计算,采用保护层厚度、锈蚀产物膨胀比等差异性较大变量进行分析,计算在对数正态分布、Gama 分布以及标准正态分布情况下的失效概率时变敏感性. 对比结果参见图 10,从中可以看出,3 种不同概率分布下的随机变量变化对保护层失效概率的影响较小,考虑随机变量分布对计算结果意义不大.

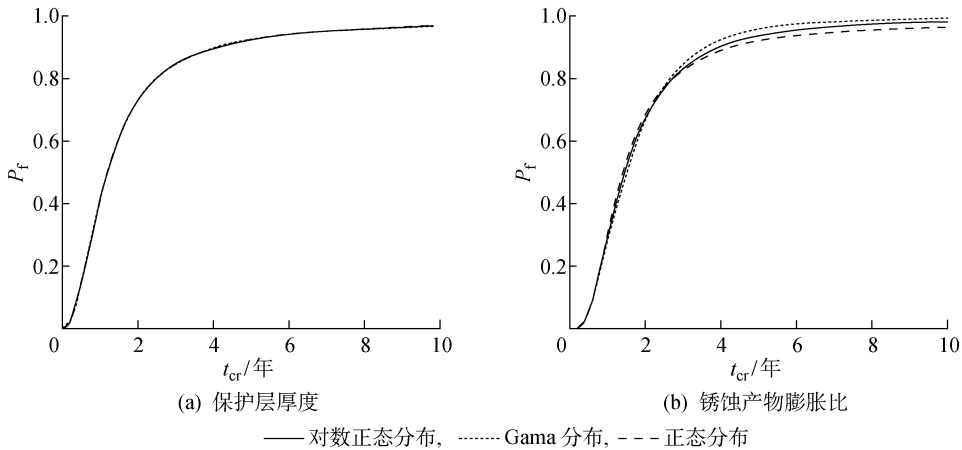


图 10 概率分布对保护层失效概率的影响

Fig. 10 Influence of probability distributions on the failure probability of cover cracking

4 结论

本文推导了考虑材料初始缺陷的混凝土保护层锈胀时间预测模型,建立了钢筋混凝土结构服役寿命的极限状态函数,并在此基础上发展了基于矩法的混凝土结构服役时变可靠度分析方法,采用一维减维方法对极限状态函数求前三阶矩,进而求得可靠度指标和失效概率.

(1) 与 Monte-Carlo 方法进行对比说明其在降低了抽样次数的同时,保证了计算过程的准确有效,满足使用要求.

(2) 在理论模型中所涉及的混凝土材料参数中,混凝土保护层失效概率对保护层厚度的随机性和不确定性最为敏感. 此外,混凝土保护层失效概率对随机变量均值变化和变异系数变化较为敏感.

(3) 保护层失效概率对随机变量概率分布类型敏感性较差.

参考文献:

[1] ANGST U M. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete[J]. **Materials and Structures**, 2018, 51(1): 1-20.

[2] JIN W L, ZHAO Y X. Steel corrosion-induced concrete cracking[J]. **Construction and Building Materials**, 2016, 116: 273-280.

[3] WONG H S, ZHAO Y X, KARIMI A R, *et al.* On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride-induced corrosion [J]. **Corrosion Science**, 2010, 52: 2469-2480.

[4] 邵伟, 李镜培, 岳著文. 氯离子侵蚀混凝土管桩寿命预测理论模型[J]. **硅酸盐学报**, 2013, 41(5): 575-581.

SHAO Wei, LI Jingpei, YUE Zhuwen. Service life prediction of concrete pipe pile due to chloride ion corrosion by modeling[J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2013, 41(5): 575-581.

[5] 汪奔. 混凝土保护层锈胀开裂时间预测模型及细观裂纹扩展分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

WANG Ben. A model for prediction of time to corrosion-induced concrete cover cracking and analysis of meso-crack propagation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[6] DU X L, JIN L, ZHANG R B. Modeling the cracking of cover concrete due to non-uniform corrosion of reinforcement[J]. **Corrosion Science**, 2014, 89: 189-202.

- [7] ANDRADE C, ALONSO C, MOLINA F J. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I—Experimental test[J]. **Materials and Structures**, 1993, 26(8): 453-464.
- [8] MOLINA F J, ALONSO C, ANDRADE C. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 2—Numerical model[J]. **Materials and Structures**, 1993, 26(9): 532-548.
- [9] 徐沛, 李敏辉, 张小刚. 钢筋混凝土结构保护层非均匀锈胀压力模型[J]. **深圳大学学报理工版**, 2016, 33(6): 639-645.
- XU Pei, LI Minhui, ZHANG Xiaogang. Non-uniform steel corrosion expansive force model for the cover of reinforced concrete structure[J]. **Journal of Shenzhen University Science and Engineering**, 2016, 33(6): 639-645.
- [10] ZHANG X G, ZHAO Y G, LU Z H. Corrosion induced stress field and cracking time of reinforced concrete with initial defects: Analytical modeling and experimental investigation[J]. **Corrosion Science**, 2017, 120: 158-170.
- [11] 樊玲, 卫军, 李江腾, 等. 基于氯离子时变扩散钢筋混凝土锈胀裂缝时变可靠度研究[J]. **湖南大学学报(自然科学版)**, 2014, 41(11): 67-73.
- FAN Ling, WEI Jun, LI Jiangteng, *et al.* Time-dependent corrosion reliability analysis considering on time-dependent chloride diffusion[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2014, 41(11): 67-73.
- [12] 周敏. 钢筋腐蚀对桥梁结构耐久性影响的研究[J]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- ZHOU Min. Research on the effects of the durability of reinforcement corrosion on bridge structures[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [13] LIU Y P, WEYERS R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[J]. **ACI Materials Journal**, 1998, 95(6): 675-681.
- [14] ESRA M G, KASIM M, ERHAN G, *et al.* Numerical modeling of time to corrosion induced cover cracking in reinforced concrete using soft-computing based methods [J]. **Materials and Structures**, 2015, 48(6): 1739-1756.
- [15] 赵然. 考虑初始缺陷形状的混凝土构件锈胀开裂可靠度研究[D]. 长沙: 中南大学, 2018.
- ZHAO Ran. Reliability analysis of cover cracking of concrete structure considering the shape of initial defect[D]. Changsha: Central South University, 2018.
- [16] XU S, MUHAMMAD A M, LI Q H. Determination of double-K fracture parameters using semi-circular bend test specimens[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2016, 152: 58-71.
- [17] 李靖, 丁晓唐, 丁力栋. 基于双K断裂模型的海水对混凝土断裂性能的影响研究[J]. **河北工程大学学报(自然科学版)**, 2018, 35(3): 6-10.
- LI Jing, DING Xiaotang, DING Lidong. Research on the effect of seawater on the fracture performance of concrete based on double-K model [J]. **Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)**, 2018, 35(3): 6-10.
- [18] ZHANG X G, WANG X Z, LU Z H, *et al.* Analysis model of non-uniform corrosion induced cracking of reinforced concrete structure[J]. **Journal of Central South University**, 2011, 18: 940-945.
- [19] 吴相豪. 海洋环境中钢筋混凝土构件锈胀开裂时间的解析解[J]. **上海海事大学学报**, 2006, 27(3): 22-26.
- WU Xianghao. Analytical solution for cracking time of reinforced concrete structure due to corrosion expansion in marine environment[J]. **Journal of Shanghai Maritime University**, 2006, 27(3): 22-26.
- [20] HUGO G, JOSE C M, ANTONIO A H. An innovative adaptive sparse response surface method for structural reliability analysis [J]. **Structural Safety**, 2018, 73: 12-28.
- [21] LIU Y P, WEYERS R E. Comparison of guarded and unguarded linear polarization CCD devices with weight loss measurements[J]. **Cement and Concrete Research**, 2003, 33: 1093-1101.
- [22] ZHANG X G, WANG J, ZHAO Y G, *et al.* Time-dependent probability assessment for chloride induced corrosion of RC structures using the third-moment method [J]. **Construction and Building Materials**, 2015, 76: 232-244.
- [23] ZHAO Y G, ZHANG X Y, LU Z H. Complete monotonic expression of the fourth-moment normal transformation for structural reliability[J]. **Computers & Structures**, 2018, 196: 186-199.
- [24] ZHAO Y G, ZHANG X Y, LU Z H. A flexible distribution and its application in reliability engineering [J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 2018, 176: 1-12.
- [25] ZHAO Y X, ZHANG X W, JIN W L. Influence of environment on the development of corrosion product-filled paste and a corrosion layer at the steel/concrete interface[J]. **Corrosion Science**, 2017, 124: 1-9.

(本文编辑: 王一凡)