

冻融环境下水工混凝土结构碳化 时变可靠度分析

刘兆正¹, 张合朋¹, 吉庆伟¹, 侯利军², 周元斌¹

(1. 江苏省骆运水利工程管理处, 江苏 宿迁 223800; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:碳化作用是水工混凝土结构最为普遍的耐久性劣化因素。在寒冷地区,混凝土冻融损伤进一步加剧了碳化作用,特别在干湿交替部位更为严重。针对冻融环境下混凝土碳化问题,分析了服役龄期内冻融损伤混凝土的碳化时变可靠水平。结合已有混凝土碳化模型、混凝土冻融损伤模型、实验室与自然环境冻融相关关系等建立了冻融环境下混凝土碳化深度模型,进而结合相关变量的统计模型和数字特征,建立了碳化时变可靠度分析方法。然后,通过参数分析,研究了冻融、碳化残量、环境影响系数和混凝土部位对碳化时变可靠度的影响规律。该研究为寒冷地区水工混凝土结构碳化时变可靠度分析和碳化寿命预测提供参考。

关键词:混凝土,冻融,碳化,碳化模型,可靠性

中图分类号:TU528.01

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2021)06-0017-06

Time – varying reliability analysis of carbonation of hydraulic concrete structures under freeze – thaw conditions

LIU Zhaozheng¹, ZHANG Hepeng¹, JI Qingwei¹, HOU Lijun², ZHOU Yuanbin¹

(1. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Carbonation is the most common durability deterioration factor for hydraulic concrete structures. In cold regions, concrete freeze – thaw damage has further aggravated the carbonization effect, especially in the alternately wet – dry parts. In view of the carbonation problem of concrete in freeze – thaw environment, time – varying reliability level of carbonation of freeze – thaw damaged concrete during service life was analyzed. Combined with existing concrete carbonation model, concrete freeze – thaw damage model, and freeze – thaw correlation between laboratory and natural environment, a concrete carbonation depth model under freeze – thaw environment was established, and a time – varying reliability analysis method for carbonation was established by combining statistical model and numerical characteristics of related variables. Then, through parameter analysis, effects of freeze – thaw, carbonation residue, environmental influence coefficient and concrete position on time – varying reliability of carbonation were studied, which could provide a reference for time – varying reliability analysis and carbonation life prediction of hydraulic concrete structures in cold regions.

Key words: concrete; freeze – thaw; carbonation; carbonation model; reliability

收稿日期:2020-11-26

基金项目:江苏省水利科技项目(2017025、2020016),水利部公益性行业科研专项(201501036)

作者简介:刘兆正(1962—),男,高级工程师,研究方向为水利工程管理。

混凝土碳化是指空气中的 CO_2 气体与混凝土中的水化产物发生化学反应,生成中性化的化学成分,从而降低混凝土碱性水平。随着碳化龄期的增长,混凝土保护层可能被完全中性化,导致内部钢筋表面钝化模失稳破坏,钢筋失去保护,进而诱发钢筋锈蚀、保护层开裂等更为严重的耐久性问题^[1]。

混凝土材料是影响混凝土碳化速率的内在因素。通过优化配置混凝土的水胶比、水泥用量、外加剂以及掺合料等,提高混凝土的密实度,减小内部连通孔隙率,从而降低 CO_2 在混凝土中的扩散系数^[2-3]。其次,环境温度、湿度和 CO_2 浓度等环境因素和混凝土应力状态是影响碳化的主要外部因素。研究表明,混凝土碳化速率随着温度和 CO_2 浓度的增加而加快,相对湿度在 50% 左右时碳化速率最高,而相对湿度过高或过低均显著降低碳化速率^[4]。特别地,在遭受干湿交替作用时,碳化作用更为严重^[5]。混凝土受拉时,内部微裂缝扩展而加快碳化速率,在受压时内部孔隙和微裂缝闭合而减小碳化速率^[6]。

水工混凝土结构所处环境复杂,而且一些部位常年遭受干湿交替作用,碳化作用的影响不容忽视。特别在寒冷地区,混凝土结构还同时遭受冻融循环的作用,冻融损伤不仅劣化了混凝土的强度和整体性,而且降低了密实度并增大了 CO_2 的扩散系数,两者共同作用往往导致更为严重的耐久性退化甚至结构破坏^[7]。调查表明^[8],在我国“三北地区”,运行仅 30 年左右、甚至不超过 20 年的水工混凝土结构常常遭受严重的冻融损伤和破坏,严重劣化结构的耐久性。

本文针对冻融环境下混凝土碳化问题,结合既有模型建立该环境条件下混凝土的碳化深度模型,进而开展碳化时变可靠度分析和碳化寿命预测,然后进行参数影响分析,为寒冷地区混凝土碳化可靠性分析提供参考。

1 普通大气环境下混凝土碳化模型

混凝土的碳化深度与碳化时间的平方根成正比,可通过碳化深度预测模型公式(1)计算

$$x_c = k\sqrt{t} \quad (1)$$

式中: x_c 为混凝土碳化深度; k 为反映混凝土碳化速度的碳化系数; t 为碳化时间。对于碳化系数 k ,目前主要有基于气体扩散理论的模型、基于试验的经验模型以及基于扩散理论和试验的模型^[1]。相比

这几类模型,基于扩散理论和试验的碳化模型采用试验结果对碳化理论模型进行修正,综合了理论性和实际可操作性的优点,适用性更好^[5]。

在水工混凝土结构碳化分析中,各工程的混凝土材料特性不同,而且环境条件复杂,需要综合环境和材料影响效应。余波等^[5]基于多场耦合混凝土碳化数值模型,进行了环境因素对碳化深度的影响分析,引入反应温度、 CO_2 浓度和相对湿度的环境综合影响系数,建立基于理论与试验的混凝土碳化深度实用预测模型。因此,本文采用余波等^[5]建立的碳化模型,可以表示为

$$x_c = k_j k_s k_T k_{RH} k_{\text{CO}_2} k_0 \sqrt{t} = k_j k_s k_e k_0 \sqrt{t} \quad (2)$$

式中: k_0 为标准环境条件下(温度为 20 ℃,相对湿度为 70%; CO_2 体积分数为 20%)混凝土的碳化速率系数, $k_0 = \sqrt{\frac{2D_{\text{CO}_2}^0 C_{\text{CO}_2}^0}{m_0}}$; $D_{\text{CO}_2}^0$ 为标准环境条件下混

凝土的 CO_2 扩散系数, m^2/s ; $C_{\text{CO}_2}^0$ 为标准环境条件下的 CO_2 摩尔浓度, mol/m^3 , $C_{\text{CO}_2}^0 = 41.57 C_{\text{CO}_2}^V$ ($C_{\text{CO}_2}^V$ 为体积分数); k_j 为位置影响系数,一般角部取 1.4,非角部取 1.0^[1]; k_s 为工作应力影响系数,一般受压区取 1.0,受拉区取 1.2^[1]; m_0 为完全碳化时单位体积混凝土吸收 CO_2 的量, mol/m^3 ,可参照表 1 中的公式计算; k_T 、 k_{RH} 、 k_{CO_2} 分别为温度、湿度和 CO_2 浓度修正系数; k_e 为环境综合影响系数, $k_e = k_T k_{RH} k_{\text{CO}_2}$,可按表 2 所列环境类别取值。

标准环境条件下,混凝土的 CO_2 扩散系数^[9]可以表示为

$$D_{\text{CO}_2}^0 = 1.64 \times 10^{-6} (\varepsilon_p^0)^{1.8} (1 - R_H)^{2.2} \quad (3)$$

式中: R_H 为相对湿度; ε_p^0 为胶凝材料水化完成后、碳化发生前的混凝土孔隙率。矿物掺合料混凝土硬化后的总孔隙率可由下式得到^[10]

$$\varepsilon_p^0 = 0.015 + \frac{d}{1000} \left(\frac{w}{b} + 0.2364\beta_f + 0.0279\beta_{bs} + 0.1447\beta_s - 0.2902 \right) \quad (4)$$

式中, w/b 为水胶比。

2 冻融环境下混凝土的 CO_2 扩散系数

在冻融循环的反复作用下,冻融损伤导致混凝土密实度下降,孔隙率增大,加速了二氧化碳气体在混凝土中的扩散速率。肖前慧^[7]通过混凝土冻融-碳化试验,定量分析了冻融循环次数对混凝土连通孔孔隙率的影响,建立了冻融环境下 CO_2 在混凝土中的有效扩散系数模型

$$D_{\text{CO}_2}^0 = 1.08 \times 10^{-6} \times (\varepsilon_p^0)^{2.08} e^{0.0033n} \times (1 - S)^{2.2}$$

(5)

式中: n 为室内试验快速冻融循环次数, S 为混凝土孔隙水饱和度(%),可以表示为

$$S = \begin{cases} R_H - 0.25 & R_H = 0.50 \sim 0.90 \\ 5R_H - 3.85 & R_H > 0.90 \end{cases}$$

(6)

昌)50 年气温进行统计分析,考虑严寒地区持续性负温天气,建立以年均负温天数 n_f 为参数的自然年均冻融循环次数 n_{act} 的经验模型

$$n_{\text{act}}(n_f) = \lambda n_f$$

(7)

式中, λ 为修正系数。结合负温天数、有阳光照射的百分率、日温差变化情况、混凝土发生冻融循环的

表 1 单位体积混凝土吸收 CO₂ 的量^[10]

混凝土类别	m_0 计算公式
硅酸盐水泥混凝土	$m_0 = 8.22B$
普通硅酸盐水泥混凝土	$m_0 = 8.22B(1 - \alpha)$
粉煤灰等量取代普通硅酸盐水泥混凝土	$m_0 = 8.22B(1 - \beta_f)(1 - \alpha) + \beta_f B(\frac{\omega(\text{CaO})}{56} - 4\gamma \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{102}) \times 10^3$
矿渣等量取代普通硅酸盐水泥混凝土	$m_0 = 8.22B(1 - \beta_{bs})(1 - \alpha) + \beta_{bs} B(\frac{\omega(\text{CaO})}{56} - 4\eta \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{102}) \times 10^3$
硅灰等量取代普通硅酸盐水泥混凝土	$m_0 = 6.99B(1 - \beta_s)$
复掺矿物掺合料等量取代普通硅酸盐水泥混凝土	$m_0 = 8.22B(1 - \beta_f - \beta_{bs} - \beta_s)(1 - \alpha) + \beta_f B \frac{\omega(\text{CaO})}{56} - 4\gamma \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{102} \times 10^3 + \beta_{bs} B(\frac{\omega(\text{CaO})}{56} - 4\eta \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{102}) \times 10^3$

注: B 为单位体积混凝土的胶凝材料用量 (kg/m^3), α 为普通硅酸盐水泥中混合材料掺量(%), β_f 、 β_{bs} 和 β_s 分别为粉煤灰、矿渣和硅灰的取代量(%), γ 和 η 分别为粉煤灰和矿渣的二次水化反应程度系数。

表 2 不同环境条件下的环境系数 k_e ^[5]

环境条件		干燥# (50% ~ 55%)	中湿* (55% ~ 70%)	潮湿 (70% ~ 80%)	湿润 (大于 80%)
室外环境 + ($C_{\text{CO}_2}^e = 0.03\%$)	低温(0℃ ~ 10℃)	0.041	0.050	0.039	0.027
	常温(10℃ ~ 20℃)	0.055	0.072	0.053	0.035
	高温(20℃ ~ 30℃)	0.071	0.101	0.069	0.043
室内通风 ($C_{\text{CO}_2}^e = 0.065\%$)	低温(0℃ ~ 10℃)	0.036	0.043	0.035	0.023
	常温(10℃ ~ 20℃)	0.056	0.076	0.054	0.033
	高温(20℃ ~ 30℃)	0.076	0.111	0.073	0.043
室内密闭环境 ($C_{\text{CO}_2}^e = 0.10\%$)	低温(0℃ ~ 10℃)	0.045	0.054	0.043	0.028
	常温(10℃ ~ 20℃)	0.070	0.097	0.067	0.040
	高温(20℃ ~ 30℃)	0.095	0.140	0.092	0.053

备注: + 表示考虑到太阳热辐射的影响,室外混凝土表面温度近似选取为室外气温加 10℃; #表示选取 55%, * 表示选取 60%,其他情况下的温度和相对湿度均选取上限值进行分析。

2.1 各地区的冻融循环次数

李金玉等^[11]通过对我国华北地区(北京)、东北地区(长春)、西北地区(西宁)和中南地区(宜

温度条件、以及我国部分地区的实测或统计冻融循环次数数据,综合取 $\lambda = 0.7$ 。经计算可得,我国各地区的自然年平均冻融循环次数为:东北地区 120

次,华北地区 84 次,西北地区 118 次,华中地区 18 次,华东地区约 18~84 次,华南地区 0 次。

武海荣等^[12]对冻融循环次数 n_{act} 与最冷月平均气温 θ 进行统计回归分析,结果表明,除青藏地区由于高原气候影响需单独考虑外,我国其余地区的年均冻融循环次数与最冷月平均气温有着较好的相关关系,并提出自然冻融循环次数模型

$$n_{\text{act}}(\theta) = \begin{cases} 40.52 + 20.7|\theta|^{0.52} & 0^\circ\text{C 以下地区} \\ 54.50 - 8.50\theta & 0^\circ\text{C 以上地区} \\ 84.69 - 6.85\theta & \text{青藏高原地区} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 实验室与实际环境的冻融次数相关关系

李金玉等^[11]基于现场 3 年的抗冻试验数据,初步得出了实验室与自然环境的冻融循环次数相关关系:按照我国现行规范所进行的混凝土快速冻融试验,实验室与自然环境的冻融循环次数之比约为 1:10~1:15,即快速冻融循环 1 次大致相当于自然环境下冻融循环 10~15 次。

3 冻融环境下混凝土碳化时变可靠度

冻融环境下混凝土碳化的极限状态方程为

$$z(t) = c - x_0 - x_c = c - x_0 - k_{x_c} x_c \quad (9)$$

式中: c 为混凝土保护层厚度; k_{x_c} 为碳化深度计算模式不确定系数; x_0 为碳化残量,是指钢筋锈蚀开始时碳化锋面至钢筋表面的距离,与混凝土强度、相对湿度及保护层厚度相关,可以表示为

$$x_0 = 4.86(-R_H^2 + 1.5R_H - 0.45)(c - 5)(\ln f_{ck} - 2.30) \quad (10)$$

式中: f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值,MPa,取为 $0.79f_{cu,k}$ (立方体抗压强度)。此外,碳化残量也常常被考虑为常量,余波等^[5]取碳化残量为 5 mm,故本文暂不考虑该参数的计算模式不确定系数。

研究表明,保护层厚度 c 服从正态分布,其均值与变异系数分别为 0.99 和 0.16^[13];混凝土抗压强度也服从正态分布,其变异系数可参照表 3 取值^[13]。此外,牛荻涛等^[14]基于对旧建筑物混凝土碳化深度实测数据的统计分析,发现碳化深度基本服从正态分布和极值 I 型分布,并建议采用正态分

布作为碳化深度的概率模型。碳化残量的概率分布模型的报道很少,不妨假定该变量也服从正态分布。因此,混凝土结构的碳化时变可靠指标 β 可以通过下式计算

$$\beta(t) = \frac{\mu_c - \mu_{x_0} - \mu_{x_c}(t)}{\sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_{x_0}^2 + [\sigma_{x_c}(t)]^2}} \quad (11)$$

(1) 碳化残量 x_0 的均值和标准差为

$$\mu_{x_0} = 4.86(-R_H^2 + 1.5R_H - 0.45)(\mu_c - 5)[\ln(\mu_{f_c}/k_{f_c}) - 2.31] \quad (12)$$

$$\sigma_{x_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial x_0}{\partial f_c}\right)^2 \sigma_{f_c}^2 + \left(\frac{\partial x_0}{\partial c}\right)^2 \sigma_c^2} \quad (13)$$

式中: μ_{f_c} 、 σ_{f_c} 为混凝土轴心抗压强度平均值和标准差; k_{f_c} 为轴心抗压强度均值与标准值的比值,根据混凝土抗压强度标准值的 95% 保证率,可计算得到该系数为 1.2。

水工结构中部分混凝土结构处于饱水状态,特别是干湿交替的部分,更易遭受冻融损伤,需要考虑该损伤对混凝土抗压强度不利效应。肖前慧^[7]的研究表明,冻融损伤混凝土的强度与水胶比 w/b 、粉煤灰掺量 β_f 和含气量 a 等因素相关,并建立了冻融损伤混凝土的抗压强度退化模型

$$\rho = f_{cn}/f_{c0} = 0.824(w/b)^{-0.133}(-2.528\beta_f^2 + 1.013\beta_f + 0.956) \times (0.556\ln a + 2.779)e^{-0.001n} \quad (14)$$

式中: a 为含气量; f_{cn} 、 f_{c0} 为冻融损伤前后混凝土的抗压强度。

结合李田等^[15]建立的北方大气区混凝土时变强度模型,进一步考虑冻融损伤,混凝土抗压强度可近似采用如下模型:

$$\begin{cases} \mu_{f_c}(t) = \mu_{f_{c0}}(1 - 8 \times 10^{-7}t^3)\rho \\ \delta_{f_c}(t) = \delta_{f_{c0}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mu_{f_c}(t)$ 、 $\delta_{f_c}(t)$ 分别为 t 年后混凝土强度的均值和变异系数; $\mu_{f_{c0}}$ 、 $\delta_{f_{c0}}$ 分别为初始时刻的均值与变异系数,标准差 $\sigma_{f_c} = \delta_{f_c}\mu_{f_c}$ 。

(2) 碳化深度 x_c 的均值和标准差为

表 3 混凝土立方体抗压强度变异系数^[13]

混凝土等级	C10	C15	C20	C25	C30	C30	C40/C45	C50/C60
变异系数	0.22	0.17	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09

$$\begin{cases} \mu_{x_c}(t) = \mu_{k_{x_c}} k_j k_s k_e k_0 \sqrt{t} \\ \sigma_{x_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial k_{x_c}}\right)^2 \sigma_{k_{x_c}}^2 t} \end{cases} \quad (16)$$

对于碳化深度计算模式不确定系数 k_{x_c} , 根据余波等^[5]计算得到的2类混凝土试件的碳化深度, 在大气环境下该系数的均值与变异系数分别取为1.03和0.265; 根据肖前慧^[7]的碳化深度计算结果, 在冻融环境下该系数的均值与变异系数分别取为0.89和0.297。

4 算例及参数分析

某处于北京地区大气环境中的水闸混凝土结构, 闸墙厚0.6 m, 采用强度为C30的单掺矿物掺合料混凝土, 水胶比0.45, 配有直径为20 mm的竖向和横向HRB335变形钢筋, 保护层厚度30 mm。混凝土中粉煤灰的质量分数为15%, 胶凝材料的总质量为400 kg/m³, 混凝土的含气量为4.5%。该地区年平均温度13℃, 平均湿度55%, 室外环境CO₂的体积分数0.03%。试算, 服役龄期内闸墙中部受拉区混凝土碳化时变可靠水平。

本工程所属北京地区, 根据李金玉^[11]的研究, 该地区混凝土每年遭受的自然冻融循环次数约为84次, 取实验室与自然冻融循环次数之比为1:12.9, 则换算的实验室快速冻融次数为每年6.51次。

本工程采用了掺加粉煤灰的混凝土, 文献^[10]表明我国火电厂粉煤灰大部分为低钙粉煤灰, 并对近100家火电厂粉煤灰进行成分分析, 表明CaO含量约为3.22%, Al₂O₃的含量约为27.8%, 故不考虑CaO的活性。在计算参数 m_0 时, $\omega(\text{CaO})$ 取为0, 结合相关给定参数, 可得:

$$\begin{aligned} m_0 &= 8.22B(1 - \beta_f)(1 - \alpha) - \\ &4\beta_f\gamma B \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{102} \times 10^3 = 2188.26 \end{aligned}$$

此外, 水闸混凝土结构处于室外环境, 同时还可能受到阳光辐射影响, 结合该地区的相对湿度和温度, 查表1可知该结构可能遭受3种不同程度的碳化作用, 体现为不同的环境综合影响系数, 即中等 $k_e = 0.055$, 较严重 $k_e = 0.071$, 严重 $k_e = 0.101$ 。一般而言, 水工混凝土结构的干湿交替区混凝土碳化最为严重, 不妨以 $k_e = 0.101$ 的工况表征干湿交替区碳化作用。

图1所示为不同程度碳化作用下受冻融损伤

闸墙混凝土保护层碳化时变可靠度。由图可见, 碳化残量对混凝土碳化可靠水平有显著影响。在中度碳化作用下, 不考虑碳化残量时, 在设计使用年限50年之内, 其可靠指标均高于正常使用极限状态的目标可靠指标1.0。也就是说, 该区域混凝土不会发生保护层完全碳化。相比之下, 考虑碳化残量后, 其碳化寿命下降至约42年。碳化残量与相对湿度、混凝土强度和保护层厚度相关, 本工程条件下, 碳化残量计算值约为7 mm左右, 约占保护层厚度的1/4, 故极大影响了碳化寿命。此外, 随着碳化作用程度由中等加剧为严重, 可靠指标下降速率显著加快, 混凝土保护层碳化寿命明显缩短。在严重碳化作用下, 保护层碳化寿命甚至仅约为18年。可见, 环境条件的影响对混凝土碳化时变可靠水平和碳化寿命有着重要的影响, 合理表征环境影响系数对碳化可靠度分析尤为重要。

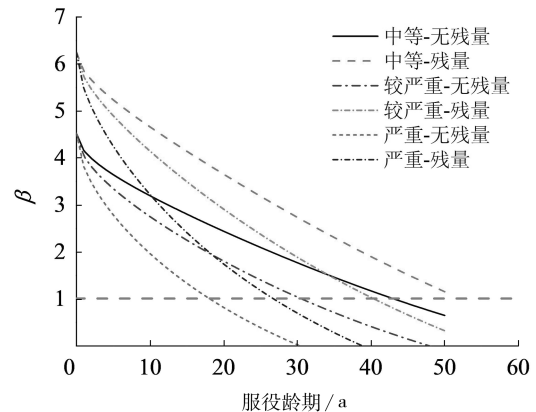


图1 闸墙中部混凝土碳化时变可靠水平

此外, 基于本文碳化模型和可靠度分析方法分析了不同参数条件下水工混凝土的碳化时变可靠水平。图2所示为冻融与碳化共同作用下不同保护层厚度与强度混凝土结构的碳化时变可靠指标。由图可见, 碳化可靠指标对保护层厚度的敏感性要远高于混凝土强度。随着保护层厚度从20 mm增大到40 mm, 碳化寿命从17年增大为44年。相比之下, 随着混凝土强度从20 MPa增加到40 MPa, 碳化寿命仅增长约12年。可见, 在工程施工中, 要严格控制保护层厚度, 特别是遭受严重碳化作用的干湿交替结构部位。

图3所示为冻融与非冻融条件下中部与角部部位的碳化时变可靠指标。由图3可见, 角部部位混凝土的碳化可靠水平显著低于中部部位, 角部混凝土在较严重和严重碳化作用下的碳化寿命仅约为17年和10年。在初始服役阶段, 冻融对碳化可

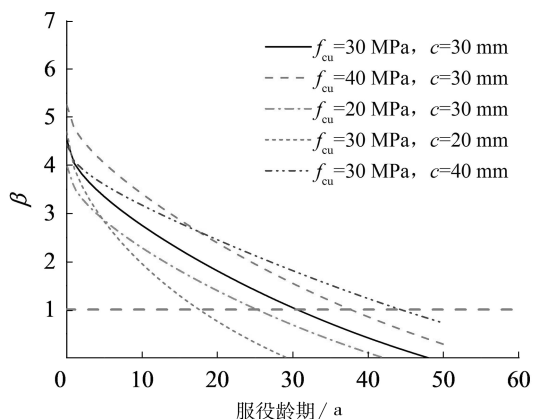
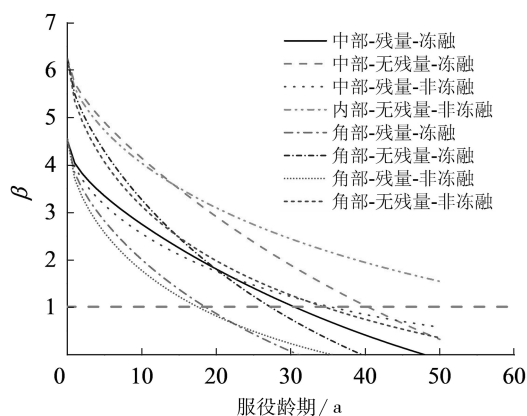
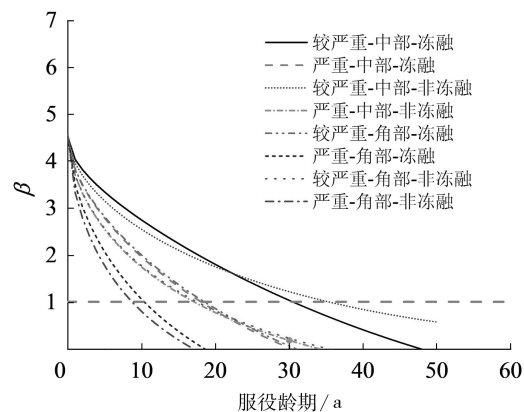


图2 不同保护层和强度等级下结构中部混凝土碳化时变可靠水平



(a) 较严重碳化程度 $K_e=0.071$



(b) 考虑碳化残量

图3 冻融与非冻融条件下水工混凝土碳化时变可靠水平

靠水平的影响较小,在遭受一定年限的冻融循环后,碳化可靠指标逐渐低于未冻融损伤混凝土结构的可靠水平。特别地,冻融作用对不考虑碳化残量时的可靠指标影响较大,如图3(a)所示。这主要是由于不考虑碳化残量时,混凝土经历相对缓慢的可靠指标下降速率,长期累积的冻融损伤加大混凝土的 CO_2 扩散系数,进而降低碳化可靠水平。然而,对于考虑碳化残量的角部部位或严重碳化作用区

域,碳化可靠水平随服役龄期下降很快,混凝土冻融损伤较轻,对可靠水平的影响较小。可见,对于水工混凝土结构角部部位和遭受严重碳化作用的干湿交替部位,要适当加大保护层厚度,提高混凝土保护层的碳化可靠水平,进而避免结构内部钢筋锈蚀和混凝土锈胀开裂。

5 结 论

本文针对冻融环境下水工混凝土结构碳化耐久性问题,开展了混凝土碳化时变可靠性分析,得到以下结论:

(1)结合大气环境下混凝土碳化模型、冻融损伤混凝土的强度和 CO_2 扩散系数模型、自然与实验室冻融循环次数关系,建立了冻融环境下混凝土结构碳化深度预测模型。

(2)基于考虑碳化残量影响的碳化寿命功能函数,结合相关变量的统计模型和数字特征,建立了冻融环境下混凝土结构的碳化时变可靠度分析方法。

(3)碳化时变可靠度参数分析表明,碳化残量对混凝土碳化寿命预测有显著影响,累计冻融损伤达一定程度后才能降低混凝土碳化可靠水平,而且随着服役时间增长影响越显著。混凝土保护层厚度和环境条件综合影响系数是碳化寿命的控制参数,而混凝土强度的影响相对较小。同时,角部部位混凝土碳化可靠指标的经时下降速率要远高于中部部位的混凝土。

参考文献:

- [1] 牛获涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 肖佳, 勾成福. 混凝土碳化研究综述[J]. 混凝土, 2010(1): 40-44.
- [3] 蒋利学. 混凝土碳化深度的计算模型及实验研究[D]. 上海: 同济大学, 1996.
- [4] 蒋清野. 混凝土碳化数据库与混凝土碳化分析[R]. 攀登计划—钢筋锈蚀与混凝土冻融破坏的预测模型 1997 年度研究报告, 1997.
- [5] 余波, 成荻, 杨绿峰. 混凝土结构的碳化环境作用量化与耐久性分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9): 51-59.
- [6] 罗小勇, 邹洪波, 施清亮. 不同应力状态下混凝土碳化耐久性试验研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 194-199.

(下转第 59 页)