

不同措施对热带海洋砼结构服役寿命的影响^{*}

谭永山,余红发[†],梅其泉,麻海燕,冯滔滔

(南京航空航天大学 土木工程系,江苏 南京 210016)

摘要:海工钢筋混凝土结构由于长期受到海洋盐雾大气、浪溅与潮汐、高温等环境因素作用,大量氯离子侵入混凝土中,致使结构中的钢筋严重锈蚀,从而使混凝土结构难以达到50年的设计寿命要求.本文基于修正的氯离子扩散理论与可靠度理论,通过南海实际工程来探讨一些结构措施和附加措施对海工混凝土服役寿命的影响.结果表明:增大结构的保护层厚度能有效延长结构的服役寿命.对混凝土结构施加一定的附加防护措施,也能够有效地延长混凝土结构在热带海洋环境下的服役时间.最有效的附加防护措施是采用不锈钢钢筋,但是价格太高而应用受限,比较适用的是硅烷外涂或者使用阻锈剂,但对于一维结构而言仅仅使用其中一种并不能保证结构50年的设计寿命.

关键词:热带海洋地;混凝土结构;附加措施;耐久性;服役寿命;可靠度

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Effects of Various Measures on Service Life of Concrete Structure in Tropical Marine Environment

TAN Yongshan, YU Hongfa[†], MEI Qiquan, MA Haiyan, FENG Taotao

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Due to the long-term corrosion affected by environmental factors, such as sea salt spray, wave-splashing and tidal, a lot of chloride ions in concrete lead to a serious corrosion in marine reinforced concrete structure. As a result, the marine concrete structure is difficult to meet the requirement of 50 years for design service life. In the present work, based on the chloride ion diffusion theory and reliability theory, the effects of structural measures and additional measures on the service life of practical structure in the South China Sea were discussed. The results indicate that the thicker concrete cover thickness can effectively extend the service life of concrete structure. Besides, additional measures also can extend the service life of the structure in tropical marine environment, the most effective method is to use stainless steel instead of ordinary reinforced steel, and however, the high price of stainless steel will limit its application. Compared with other kinds of additional measures, coated with silicone or adding corrosion inhibitor is an effective measure to marine concrete structure. But only one additional measure was used in one dimensional concrete structure that cannot meet the requirement of 50 years of designed service life.

* 收稿日期:2017-05-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB655100), National Key Basic Research Development Plan of China (973 Plan) (2015CB655100);国家自然科学基金资助项目(51508272,21276264), National Natural Science Foundation of China(51508272, 21276264);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:谭永山(1985-),男,陕西安康人,南京航空航天大学博士生

[†] 通讯联系人, E-mail: yuhongfa@nuaa.edu.cn

Key words: tropical ocean areas; concrete structure; additional measures; durability; service life; reliability

近几十年,海洋环境下的海工结构成为研究的热点,跨海大桥、港口等日益增多.这些结构处在海洋环境中比一般环境更容易腐蚀.美国俄勒冈州于30年代在 Alsae 海湾上修建的多拱大桥,建成后不久,由于大量氯离子侵入混凝土内部,钢筋出现严重锈蚀现象,最后导致结构破坏,只得拆除、重建^[1-2].其实,在热带海洋环境下,建构物的寿命普遍不足50年,一般仅20年左右.

由于海洋环境非常恶劣,要使钢筋混凝土结构达到50年寿命要求,一般需要采用适当的防护附加措施.通常可以归纳为以下几类:采用不锈钢钢筋、钢筋防腐涂层、混凝土表面防护措施、掺加阻锈剂、采用FRP筋和阴极保护.

不锈钢钢筋是通过提高钢筋中铬的含量,同时添加镍、钼等其他合金元素来提高钢筋的防腐性能.不锈钢钢筋焊缝的临界氯离子含量可达到水泥质量的3.5%^[3],折合混凝土质量的0.7%.

环氧树脂涂层是在普通钢筋表面以静电方式喷涂环氧树脂粉末,粉末在钢筋表面固化,从而形成一层致密且耐腐蚀的防腐层,延缓了钢筋的起锈时间,目前应用最广泛^[4].

硅烷喷涂是混凝土表面防护的一种重要措施.利用硅烷特殊的小分子结构,使其能渗入混凝土毛细孔壁内,并与水化的水泥发生化学反应,生成羟基团,从而在混凝土和毛细管孔隙的表面上生成了一层憎水处理层,进而防止硫酸根离子、氯离子等有害物质的渗入混凝土内部,此方法也可以使混凝土材料的耐腐蚀性能得到显著提高^[5].

掺加阻锈剂被认为是较经济有效的措施.目前在工程中应用最为广泛的是亚硝酸钙.调查表明,在混凝土内部掺加适量的亚硝酸盐等阻锈剂,钢筋发生锈蚀的混凝土临界自由氯离子含量一般会提高4~5倍.当亚硝酸盐与氯离子的比例在0.5~1之间时防锈效果最明显^[6].

纤维增强塑料(FRP)筋主要分为玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋和碳纤维增强复合材料(CFRP)筋^[7].FRP筋防腐性能优越,能有效地保证结构的耐久性能.CFRP的主要成分是碳纤维,由于碳的化学性能非常稳定,因此在FRP筋中,CFRP筋的抗腐蚀性能最好.然而对于GFRP筋而言,由于其在碱性环境下力学性能退化较明显,并且在海水及

盐溶液中耐久性存在一定的降低倾向^[8],对于南海这种环境较严酷的地方是不适用的.

工程实践表明,在混凝土结构中采用阴极保护,能够有效阻止氯离子侵蚀,从而防止钢筋发生锈蚀.阴极保护的原理是氯离子临界浓度会随着钢筋电化学电位的下降而下降.使得氯离子在保护层中的渗透受到抑制,从而降低了氯离子的扩散速率,以此保证了混凝土结构的耐久性^[9].

针对海工混凝土结构耐久性差的问题,为确保海工混凝土结构具有较长的服役寿命,制定科学合理的耐久性方案和措施已刻不容缓.本文基于修正的氯离子扩散理论与可靠度理论,通过对南海某岛两个典型的普通钢筋混凝土结构在5%和10%钢筋锈蚀概率情况下的服役寿命进行分析计算.分析了多种附加防腐措施对于延长热带海洋大气环境下钢筋混凝土结构的钢筋锈蚀时间的效果.为了确保热带海洋大气环境中钢筋混凝土结构50年的服役寿命,提出了延长钢筋混凝土结构使用寿命的综合技术措施.

1 理论及寿命分析模型

1.1 海洋环境下混凝土结构的氯离子扩散理论

1.1.1 混凝土氯离子扩散的 Fick 第二定律

根据1997年Hooton等^[10]的研究,氯离子进入暴露在氯盐环境下的混凝土内部有至少6种机制.分别为吸附、扩散、结合、渗透、毛细作用以及弥散等.其中最主要的方式是扩散、渗透和毛细作用.为简单起见,我们将混凝土中氯离子的各种迁移机制统称为“表观扩散”.将Fick第二扩散定律作为描述氯离子在混凝土中表观扩散行为的基础是由Collepari等^[11-12]提出.Fick第二定律的扩散方程为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: t 是时间; c 为氯离子含量; x 为距表面的距离; D 是氯离子扩散系数.初始条件时 $t=0, x>0$ 时, $c=c_0$;边界条件为 $x=0, t>0$ 时, $c=c_s$.

经典Fick第二扩散定律并没有考虑混凝土的实际条件:混凝土的氯离子结合能力及氯离子扩散系数的时间依赖性、表面氯离子含量的时间依赖性

以及混凝土在使用过程中的劣化效应。

Mangat 等^[13]发现,对于实际条件的混凝土结构,混凝土的氯离子扩散系数与暴露时间有关。Thomas 等^[14]用下式表示了氯离子扩散系数的时间依赖性:

$$D_t = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (2)$$

式中: D_0 和 D_t 分别是扩散时间为 t_0 和 t 时混凝土的氯离子扩散系数, m 是时间依赖性常数。

Amey 等^[15]发现混凝土表面的氯离子含量随暴露时间变化,并推导出了在线性关系 $C_s = kt$ 和幂函数关系 $C_s = kt^{1/2}$ (k 为常数) 条件下的离子扩散模型公式。Kassir 等^[16]由实验得出混凝土暴露表面的氯离子含量与时间的指数关系: $C_s = C_{s0}(1 - e^{-at})$ 。

余红发等^[17]在理论建模时,为了描述各种因素对氯离子扩散作用的影响,采用了一个综合劣化效用系数 K ,那么非均匀性混凝土的等效氯离子扩散系数 D_e 表示如下:

$$D_f = D_e = KD_f \quad (3)$$

式中: D_f 为均匀性混凝土的氯离子扩散系数; K 值是反映混凝土在实际使用过程中氯离子的扩散系数和实验室标准条件下的比值,

混凝土的氯离子结合能力 R 是由 Nilsson 等^[18]定义:

$$R = \frac{\partial c_b}{\partial c_f} \quad (4)$$

式中: c_f 和 c_b 分别是混凝土的自由氯离子含量和结合氯离子含量。

Tuutti^[19]、Arva 等^[20]和余红发^[17]进一步的研究表明,混凝土的氯离子吸附关系主要为线性吸附:

$$c_f = c_0 + (c_s - c_0) \cdot \left[\frac{1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{\frac{KD_0 t_0^m}{(1+R)(1-m)} \cdot t^{1-m}}}}{2 \sqrt{\frac{KD_0 t_0^m}{(1+R)(1-m)} \cdot t^{1-m}}} \cdot \operatorname{erf} \frac{y}{2 \sqrt{\frac{KD_0 t_0^m}{(1+R)(1-m)} \cdot t^{1-m}}} \right] \quad (9)$$

1.2 基于可靠度与氯离子扩散理论的钢筋混凝土结构服役寿命分析方法

可靠度计算方法有多种,本文主要采用均值一次二阶矩法来进行计算。一次二阶矩法就是只利用随机变量的前二阶矩去求解结构可靠度的方法。这类方法需要将功能函数在某点用 Taylor 级数展开然后取其常数项和一次项,再通过数理统计直接计算结构的可靠度,故称为一次二阶矩法。这种方法的关键是求出功能函数对各个随机变量的偏导数。

$$c_b = Rc_f \quad (5)$$

1.1.2 混凝土氯离子扩散新方程

余红发等^[17]基于混凝土的实际情况,借助文献[21]和[22],经过推导得出了同时考虑混凝土氯离子的结合能力、扩散系数随时间的变化以及结构缺陷影响的氯离子扩散新方程^[17]:

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{KD_0 t_0^m}{1+R} t^{-m} \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} \quad (6)$$

再结合初始以及边界条件,可以得到氯离子扩散的理论模型如下:

$$c_f = c_0 + (c_s - c_0) \left[\frac{1 - \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{\frac{KD_0 t_0^m}{(1+R)(1-m)} t^{1-m}}}}{\sqrt{\frac{KD_0 t_0^m}{(1+R)(1-m)} t^{1-m}}} \right] \quad (7)$$

式中: erf 是误差函数, $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt$ 。

1.1.3 二维氯离子扩散理论齐次模型

上述的氯离子扩散理论模型是基于半无限大体的一维扩散问题,但是在实际的钢筋混凝土结构工程中如梁柱等二维扩散问题没有考虑。余红发等^[23]以混凝土扩散新方程为基础,基于 1/4 无限大的混凝土结构来研究二维扩散问题,扩散方程如下:

$$\frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_f}{\partial y^2} = \frac{1}{D_e} \cdot \frac{\partial c_f}{\partial T} \quad (8)$$

将此时的边界条件齐次化,再根据 Newman 乘积解定理^[24],同时考虑混凝土氯离子的结合能力、扩散系数随时间的变化以及结构缺陷影响,可以得到二维 1/4 无限大体氯离子扩散理论齐次模型^[24]如下:

设结构功能函数 $Z = G(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 其中 X_1, X_2, \dots, X_n 是表示影响结构可靠度因素的随机变量, $\mu_{X_1}, \sigma_{X_1}, \mu_{X_2}, \sigma_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}, \sigma_{X_n}$ 是基本变量的平均值与标准差,根据可靠度计算中的一次二阶矩法,可以得到功能函数近似表达为:

$$Z \approx g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_M (X_i - \mu_{X_i}) \quad (10)$$

当各随机变量相互独立且服从正态分布时,则

功能函数 Z 的平均值和标准差分别为

$$\mu_z = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) \quad (11)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{M\sigma_{X_i}} \right)^2} \quad (12)$$

则按下式近似确定可靠度指标

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \approx \frac{g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{\mu_X} \sigma_{X_i} \right)^2}} \quad (13)$$

对于修正的氯离子扩散模型, 用其进行钢筋混凝土结构服役寿命的可靠度分析时, 抗力是钢筋锈蚀的临界氯离子含量 (C_{cr}), 荷载效应是扩散作用导致钢筋表面(混凝土保护层厚度 x_0) 的自由氯离子含量 (c_f), 因此建立功能函数 $Z = C_{cr} - c_f$.

当混凝土内部钢筋表面(混凝土保护层厚度 x_0) 的自由氯离子含量 (c_f) 达到临界氯离子含量(即 $C_{cr} \leq c_f$) 时, 导致混凝土中钢筋锈蚀概率 $p_f = \Phi(-\beta)$. 然后可计算出可靠度指标.

2 典型结构所处环境及其基本参数

2.1 环境介绍

众所周知, 南海是我国南部的陆缘海, 常年受到热带海洋季风气候的影响, 气候条件复杂, 年平均气温在 29°C 左右, 这些环境因素可以加速南海岛礁的混凝土结构的劣化. 温度对混凝土结构服役寿命的影响, 主要体现在对氯离子扩散系数的影响. 根据 Nernst-Einstein 方程, 当温度从 20°C 提高到 30°C 时, 材料扩散系数可以增加一倍, 故很多结构的使用寿命非常短, 不能满足耐久性的要求. 本文主要研究两种典型的钢筋混凝土结构的耐久性及其可靠度分析. 图 1 为南海某岛礁混凝土结构破坏照片.

某建筑物 A 的墙体是一个接近于平面的一维结构, 对此结构进行可靠度分析研究时, 运用的是修正的一维氯离子扩散模型. 而对车库的立柱而言, 是典型的框架柱结构, 故采用修正的二维氯离子扩散模型来进行可靠度分析.



(a) 某建筑物 A 墙体



(b) 某建筑物 A 顶板



(c) 废弃车库



(d) 车库立柱

图 1 南海某岛礁混凝土结构破坏照片
Fig. 1 Destruction of concrete structures in the South China Sea

2.2 结构的基本参数

两种典型混凝土结构的基本参数如表 1 所示, 均采用 C20 普通混凝土.

表 1 混凝土结构的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of concrete structures

调查区域	混凝土类别	龄期/a	保护层厚度/mm
车库三号柱东	普通混凝土	25	40
车库三号柱南			30
车库三号柱西			30
车库三号柱北			40
某建筑物 A			22

2.3 模型计算参数

本文中混凝土结构寿命预测模型所需要的计算参数是余红发等^[25]在南海某岛礁实测与调研所得. 参数数据如表 2 所示, 表 2 中参数数据来源于文献[25]. 临界氯离子浓度作为寿命分析的重要参数, 影响因素有很多, 例如混凝土组分、环境条件等都会对其造成差异. 具体环境下的临界值很难测得, 实际工程在设计分析时通常采用一个统计值作为临界氯离

子浓度,结合大量文献以及工程数据,最终选取混凝土临界氯离子浓度 C_{cr} 为 0.05% (混凝土质量分数).

表 2 模型计算所需参数
Tab. 2 Parameters for model calculation

调查区域	初始自由氯离子含量 $C_0 / \%$	表面自由氯离子含量 $C_s / \%$	表观氯离子扩散系数 $D_a / (\text{cm}^2 \cdot \text{a}^{-1})$	氯离子结合能力 R	基准暴露时间 t_0 / d	时间依赖性指数 m	劣化效应系数 K	临界自由氯离子含量 / %
车库三号柱东		0.064	1.416	0.202				
车库三号柱南		0.102	0.964	0.078				
车库三号柱西	0.01	0.130	0.352	0.149	28	0.64	1	0.05
车库三号柱北		0.079	0.461	0.048				
某建筑物 A		0.354	0.562	0.103				

3 分析计算

3.1 保护层厚度对混凝土结构的影响

图 2 是热带海洋环境下某建筑物 A 在不同的保护层厚度情况下钢筋锈蚀概率与可靠度指标的计算结果. 由图可见,随着服役时间的增长,钢筋锈蚀概率呈增长趋势,可靠度指标呈现下降趋势. 且随着

结构保护层厚度的增加,相同服役时间的情况下钢筋的锈蚀概率在降低,可靠度指标在上升. 当保护层的厚度为 40 mm 时,钢筋锈蚀概率在 5% 情况下的服役寿命为 85 年,可以满足结构 50 年的寿命要求,当保护层厚度为 30mm 时,则无法达到服役寿命要求. 然而,混凝土保护层厚度也不宜过大,否则由于混凝土材料本身发生收缩,将会导致混凝土保护层开裂,反而削弱其对钢筋的保护作用.

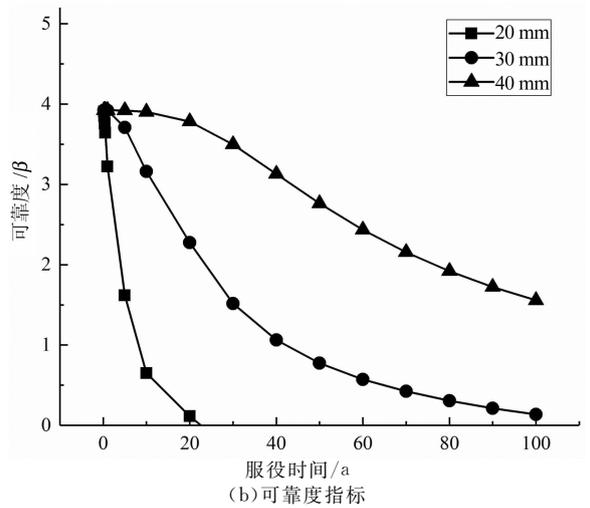
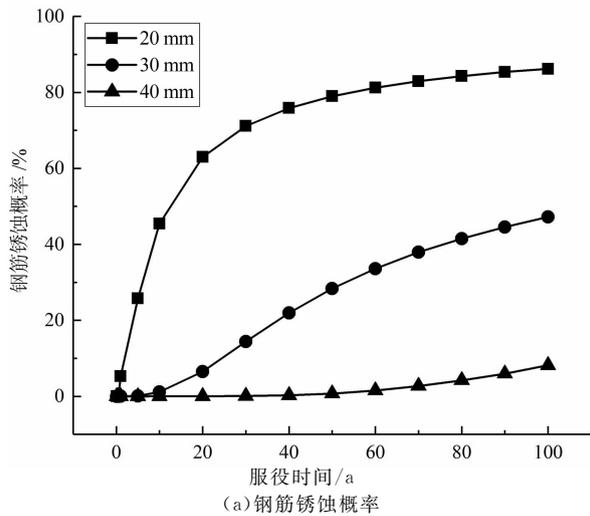


图 2 某建筑物 A 在不同保护层厚度情况下的可靠度分析计算结果

Fig. 2 Reliability analysis of building A under different thickness of protective layer

图 3 是热带海洋环境下车库钢筋混凝土立柱在迎风面与背风面两种情况下钢筋锈蚀概率与可靠度指标的计算结果. 图中可以得出与某建筑物 A 类似的结论. 由图可见,当保护层的厚度为 40 mm 时,钢筋锈蚀概率在 5% 情况下的迎风面与背风面的服役寿命均为 60 年左右,可以满足 50 年寿命要求,保护层厚度为 30 mm 则无法满足这一要求. 此外,在同一锈蚀概率条件下,迎风面相对于背风面的服役寿命较长,这主要是由于背风面积累了大量盐雾,导致混凝土表面氯离子浓度更高,因此其服役时间缩短. 综上所述,增大混凝土结构的保护层厚度,可以

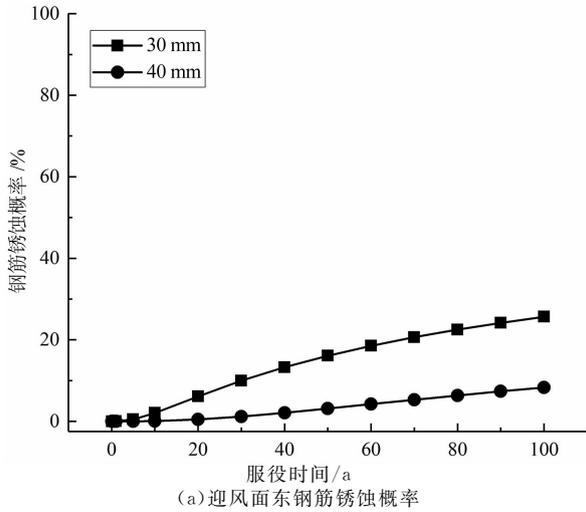
大幅度提升混凝土结构的服役寿命. 同时,比较图 2 与图 3 可以看出,保护层厚度改变对一维结构的影响比对二维结构的影响要大.

3.2 附加措施对一维混凝土结构的影响

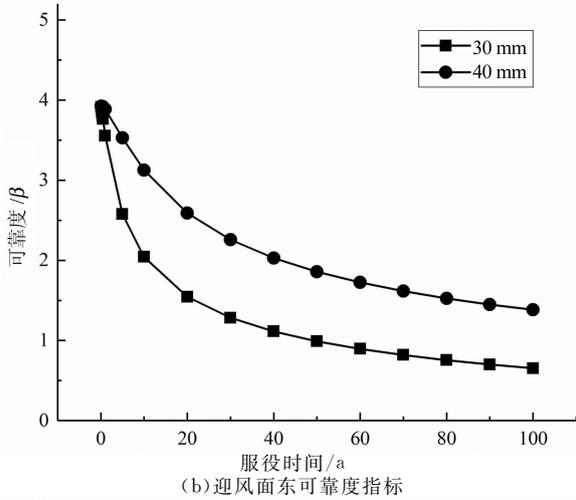
3.2.1 采用不锈钢筋(或环氧树脂涂层)的影响

若在混凝土内部采用不锈钢筋替代普通钢筋,钢筋锈蚀的临界氯离子浓度将明显增加. 大量工程实践表明,若采用 304 奥氏体不锈钢筋替换普通钢筋,临界氯离子浓度至少增加至混凝土质量的 0.7%,我们以此作为计算依据. 图 4 为结构墙体的第一排主筋替换成 304 奥氏体不锈钢筋(替换率为

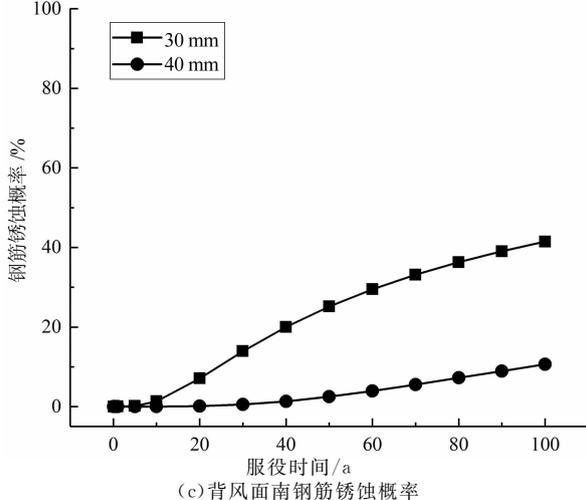
71%)时钢筋锈蚀概率、可靠度指标与服役时间之间的关系. 由图可以看出,若保护层厚度为 20 mm,普通钢筋在 5%和 10%两种锈蚀概率条件下的服役时间分别为 1 年和 2 年,而 304 奥氏体不锈钢筋的计算结果表明这些不锈钢筋在 500 年内是不会发生锈蚀. 由此可见,换用不锈钢筋(或环氧树脂涂层)能明显提高混凝土结构的服役时间. 然而,由于不锈钢的成本过高,将会限制其在一般混凝土结构中的应用.



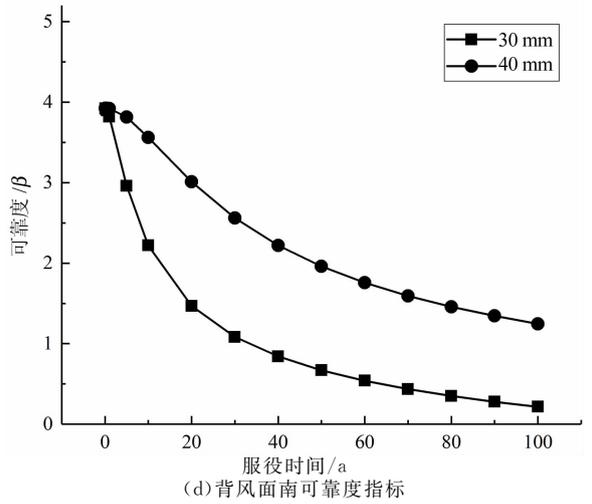
(a) 迎风面东钢筋锈蚀概率



(b) 迎风面东可靠度指标



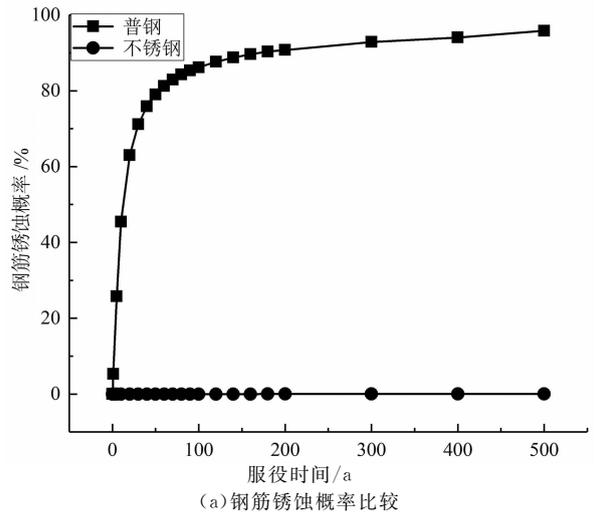
(c) 背风面南钢筋锈蚀概率



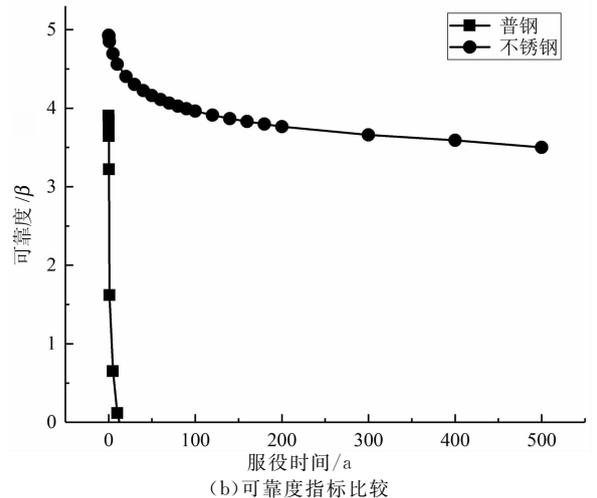
(d) 背风面南可靠度指标

图 3 车库钢筋混凝土立柱在不同保护层厚度情况下可靠度分析计算结果

Fig. 3 Reliability analysis of the garage pillars(RC) under different thickness of protective layer



(a) 钢筋锈蚀概率比较



(b) 可靠度指标比较

图 4 某建筑物 A 使用不锈钢筋与普通钢筋钢筋锈蚀概率与可靠度指标计算结果

Fig. 4 Corrosion probability of steel and reliability index of building A using stainless steel and ordinary steel

3.2.2 结构表面涂覆涂层的影响

硅烷属于渗透性涂层,当其渗入混凝土内部时,能够在一定程度上减小混凝土的氯离子扩散系数以及表面氯离子含量。研究表明,硅烷表面涂层渗透厚度达到 0.5~2 mm 以后,自由氯离子扩散系数至少会降低 30%,表面自由氯离子含量至少会降低 50%^[26]。图 5 为结构表面涂刷 0.5~2 mm 硅烷与未涂刷硅烷的钢筋锈蚀概率与可靠度计算结果。由图可见,若保护层厚度为 20 mm,结构表面未涂刷硅烷时,5%和 10%两种锈蚀概率条件下混凝土结构的服役时间分别为 1 年和 2 年,而涂刷硅烷后 5%和 10%锈蚀概率条件下混凝土结构的服役时间分别为 16 年和 27 年。由此可见,结构表面涂刷硅烷可以有效提高混凝土结构的服役时间。

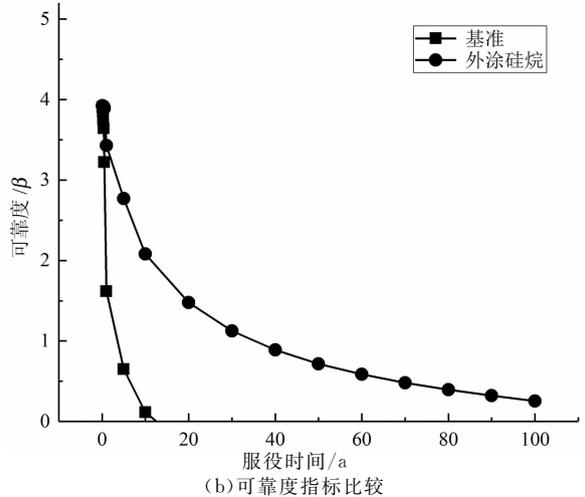
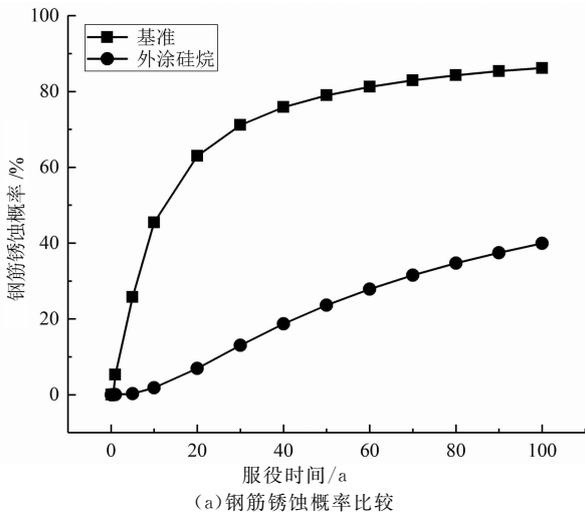


图 5 某建筑物 A 使用硅烷涂覆(渗透厚度为 0.5~2 mm)与不使用时钢筋锈蚀概率与可靠度指标计算结果
Fig. 5 Corrosion probability of steel and reliability index of building A with or without silane coating

3.2.3 掺加阻锈剂的影响

海洋环境下混凝土结构,若在混凝土内部掺加

适量阻锈剂,则可以增加钢筋锈蚀的临界氯离子浓度,从而延长服役寿命。亚硝酸盐阻锈剂作为一种常用阻锈剂,在使用过程中,亚硝酸盐会缓慢流失,并且在钢筋锈蚀过程中,部分亚硝酸盐会被消耗掉,因而临界氯离子浓度会降低。在分析掺加阻锈剂条件下混凝土结构的服役寿命时,我们假定初始临界自由氯离子含量为 0.2%,30 年以后降低到 0.15%,而服役时间至 50 年以后它的值进一步降低到 0.1%^[6]。某建筑物 A 钢筋的服役寿命计算结果见图 6。对 C20 普通混凝土,保护层厚度为 20 mm 时,钢筋锈蚀概率为 5%时使用阻锈剂前后的服役寿命分别为 1 年和 28 年;钢筋锈蚀概率为 10%时使用阻锈剂前后的服役寿命分别为 2 年和 42 年;由此可见,使用阻锈剂也能大幅提高钢筋的服役寿命,但是仍然满足不了 50 年的寿命要求,因此在混凝土内部掺加阻锈剂时还需要结合其他的防护措施。

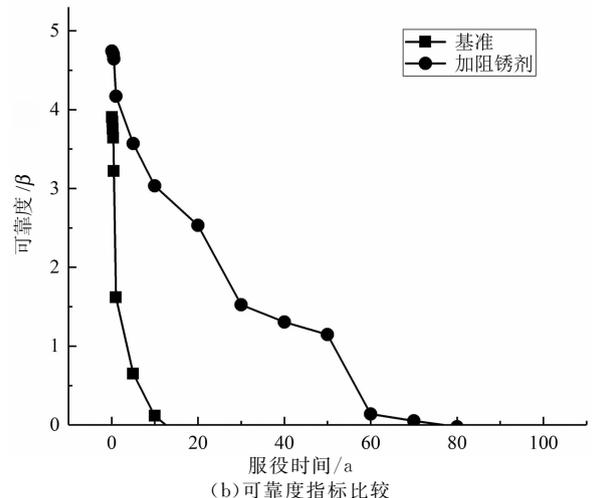
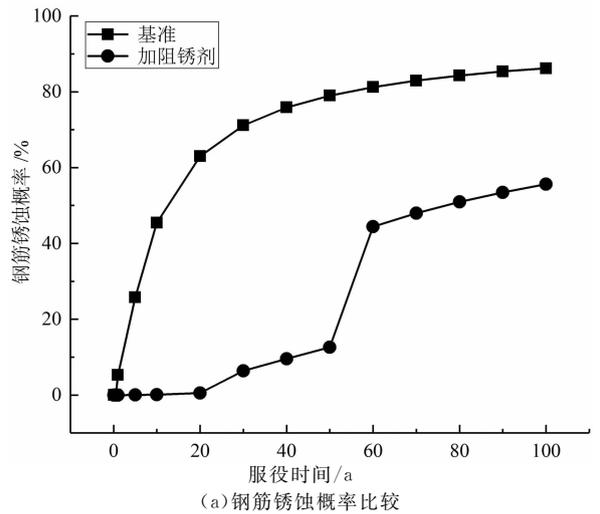


图 6 某建筑物 A 使用阻锈剂(亚硝酸盐)与不使用时钢筋锈蚀概率与可靠度指标计算结果
Fig. 6 Corrosion probability of steel and reliability index of building A with or without corrosion inhibitor

3.3 附加措施对二维混凝土结构的影响

以上所有分析结果都是对于一维的混凝土结构例如港口、防波堤等. 对于二维结构, 例如框架柱, 施加附加措施时对服役寿命的影响如何? 图7是利用南海调研数据以及二维扩散理论模型在采用不锈钢、使用硅烷涂层、使用阻锈剂三种情况下的可靠度分析比较. 从图中可以看出, 对立柱等二维结构施加附加措施都能延长其服役寿命, 可以满足50年的寿命设计要求. 其中, 使用不锈钢钢筋的效果最好; 若结构的设计寿命为50年, 选用阻锈剂最为经济实用. 若为100年, 选用硅烷涂层相对效果更好.

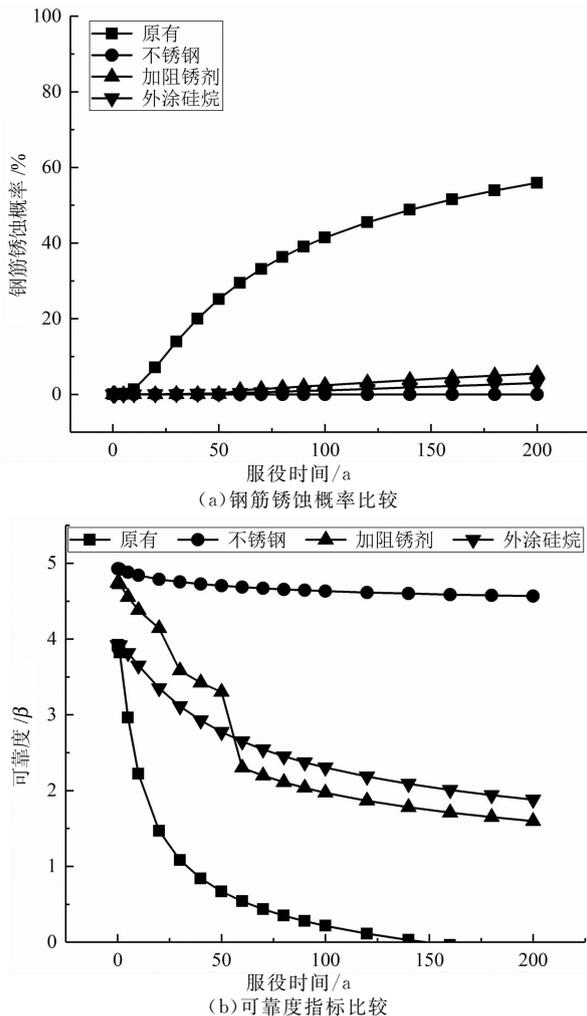


图7 车库背风面施加附加措施与不施加时钢筋锈蚀概率与可靠度指标计算结果

Fig.7 Corrosion probability of steel and reliability index of the garage pillars(leeward) with or without additional measures

4 结论

1)南海由于其独特的气候环境条件,混凝土结构的服役寿命往往很短,适当增加保护层的厚度能

明显延长混凝土结构的服役时间;

2)采用不锈钢筋替换普通钢筋可以提高混凝土结构的服役寿命,且效果非常明显.但是不锈钢的高成本从而限制了其广泛的应用;

3)对于一维结构而言,表面涂刷硅烷可以有效提高混凝土结构的服役时间,涂刷硅烷后钢筋锈蚀概率为5%和10%时的服役时间分别为16年和27年.同时使用阻锈剂也能大幅提高钢筋的服役寿命,但仍然满足不了50年的寿命要求,还需要采用其他的防护措施.

4)对于二维结构而言,施加任何一种附加措施都能保证结构50年甚至100年的服役寿命要求,若结构的设计寿命为50年,选用阻锈剂最为经济实用.若为100年,选用硅烷涂层相对效果更好.

参考文献

- [1] 范宏. 混凝土结构中的氯离子侵蚀与寿命预测[D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2009: 32-36.
FAN H. Penetration of chloride and life prediction of concrete structures[D]. Xian: Department of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2009: 32-36. (In Chinese)
- [2] 张芹, 郭力. 氯离子侵蚀下钢筋混凝土非线性锈胀破坏过程模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 44-52.
ZHANG Q, GUO L. Simulation of nonlinear corrosion damage process in reinforced concrete under chloride environment [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(5): 44-52. (In Chinese)
- [3] SORENSEN B, JENSEN P B, MAAHN E. The corrosion properties of stainless-steel reinforcement, in corrosion of reinforcement in concrete[J]. Corrosion of Reinforcement in Concrete, 1990: 601-610.
- [4] 范金晖. 钢管外表面防腐涂层研究综述[J]. 湖北教育学院学报, 2005, 22(2): 75-77.
FAN J H. Overview research on the antiseptic outer layer of the steel tube[J]. Journal of Hubei Institute of Education, 2005, 22(2): 75-77. (In Chinese)
- [5] 陈思孝, 袁明, 陈列. 氯盐环境下混凝土结构防腐措施研究[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(4): 24-27.
CHEN S X, YUAN M, CHEN L. Study on anti-corrosion measure for concrete frame in chloride environment[J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(4): 24-27. (In Chinese)
- [6] HINATSU J T, GRAYDON W F, FOULKES F R. Voltametric behaviour of iron in cement-effect of sodium chloride and corrosion inhibitor additions[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1990, 20(5): 841-847.
- [7] 祁德庆, 钱文军, 薛伟辰. 土木工程用FRP筋的耐久性研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(2): 47-50.

- QI D Q, QIAN W J, XUE W C. Progress of studies on durability of FRP rods used in civil engineering[J]. *Glass Fiber Reinforced Plastic/ Composite Materials*, 2006(2): 47—50. (In Chinese)
- [8] 张新越, 欧进萍. FRP 筋酸碱盐介质腐蚀与冻融耐久性试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 29(1): 34—36.
ZHANG X Y, OU J P. Durability experimental research on resistance of acidic, alkali, salt solutions and freeze-thaw properties of FRP bar[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(1): 34—36. (In Chinese)
- [9] BETROLINI L, ELSENER B, PEDIFERRI P, *et al.* Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair[M]. John Wiley & Sons, 2013:118—119.
- [10] HOOTON R D, MCGRATH P F. Issues related to recent developments in service life specifications for concrete structures [C]// *Proceedings of the 1st International RILEM Workshop on Chloride Penetration into Concrete*. Saint-Remy-Les-Chevreuse; RILEM, 1997: 388—397.
- [11] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZZANI R. The kinetics of penetration of chloride ions into the concrete [J]. *Il cemento*, 1970, 67(4): 157—164.
- [12] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZZANI R. Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes[J]. *Journal of American Ceramic Society*, 1972, 55(10): 534—535.
- [13] MANGAT P S, LIMBACHIVA M C. Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(9): 1475—1485.
- [14] THOMAS M D A, BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete — effect of fly ash and slag[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(4): 487—495.
- [15] AMEY S L, JOHNSON D A, MILTENBERGER M A, *et al.* Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology [J]. *ACI Structural Journal*, 1998, 95(1): 27—36.
- [16] KASSIR M K, GHOSN M. Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(1): 139—143.
- [17] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I ——理论模型[J]. *硅酸盐学报*, 2002, 30(6): 686—690.
YU H F, SUN W, YAN L H, *et al.* Study on prediction of concrete service life I —theoretical model[J]. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 2002, 30(6): 686—690. (In Chinese)
- [18] NILSSON L O, MASSAT M, TANG L. Effect of non-linear chloride binding on the prediction of chloride penetration into concrete structures[J]. *Special Publication*, 1994, 145: 469—486.
- [19] TUUTTI K. Corrosion of steel in concrete [R]. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Institute, 1982(4): 469—478.
- [20] ARVA C, NEWMAN J B. An assessment of four methods of determining the free chloride content of concrete[J]. *Materials and Structure*, 1990, 23(5): 319—330.
- [21] MEJBRO L. The complete solution of Fick's second law of diffusion with time-dependent diffusion coefficient and surface concentration[J]. *Durability of Concrete in Saline Environment*, 1996: 127—158.
- [22] Ozisik M N. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 234—235.
OZISIK M N. Heat conduction[M]. Beijing: High Education Press, 1983: 234—235. (In Chinese)
- [23] 余红发, 孙伟, 麻海燕. 混凝土氯离子扩散理论模型的研究 I ——基于无限大体的非稳态齐次与非齐次扩散问题[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(2): 276—280.
YU H F, SUN W, MA H Y. Diffusion model of mhlride in moncrete I — homogeneous and inhomogeneous diffusion in finite body[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 41(2): 276—280. (In Chinese)
- [24] CLEAR K C. Time-to-corrosion of reinforcing steel in concrete slabs. Volume 3; Performance after 830 daily salt applications [R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1976: 59—67.
- [25] 余红发, 达波, 麻海燕, 等. 南海岛礁混凝土结构的耐久性调查与研究[C]// *第一届全国可持续混凝土理论与应用技术学术交流会论文集*. 上海: 同济大学, 2016: 399—416.
YU H F, DA B, MA H Y, *et al.* Investigation and research on durability of concrete structure in the South China Sea [C]// *Proceedings of the 1rd National Sustainable Concrete Theory and the Application Technology of Academic Exchange*. Shanghai: Tongji University, 2016: 399—416. (In Chinese)
- [26] LIU G. Control of chloride penetration into concrete structures at early age[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology-NTNU, 2006: 44—46.