

文章编号: 1674-8085(2019)05-0077-05

氯盐侵蚀环境下圆形截面混凝土构件服役寿命分析与配合比选择

*周 明¹, 涂劲松¹, 赵家琦², 葛清蕴¹, 卞 祝¹

(1. 皖西学院建筑与土木工程学院, 安徽, 六安 237012; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西, 南宁 530004)

摘 要: 氯离子侵蚀混凝土结构, 导致混凝土过早发生破坏, 其原因之一是在进行结构满足耐久性设计时忽略了结构的外形和扩散维数对氯离子扩散的影响。基于钢筋脱钝的临界氯离子浓度, 提出了圆形截面氯离子侵蚀的耐久性服役寿命计算方法。开展了耐久性正交实验, 通过服役寿命定量计算, 可以对圆形截面构件混凝土的配合比进行设计与选择。通过算例分析混凝土构件的服役寿命, 结果表明圆形截面构件相对于矩形截面构件具有更好的耐久性, 在混凝土结构耐久性设计时, 采用圆形截面构件可以增加满足耐久性的混凝土配合比方案, 减小混凝土配置难度, 降低建造成本。

关键词: 混凝土; 氯离子; 耐久性; 圆形截面

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2019.05.015

STUDY OF SERVICE LIFE AND SELECTION OF MIX RATIO FOR CONCRETE COMPONENT WITH CIRCULAR SECTION BASED ON CRITICAL CHLORIDE ION

*ZHOU Ming¹, TU Jing-song¹, ZHAO Jia-qi², GE Qing-yun¹, BIAN zhu¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, West Anhui University, Lu'an, Anhui 237012, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: The concrete structure under chloride ion is destroyed prematurely because of the lack of durability. The reason is that the influence of structure shape and diffusion dimension on chloride ion diffusion is neglected when the structure meets the durability design. The method for calculating the durability service life of circular section under chloride ion erosion is proposed based on the critical chloride ion concentration. The orthogonal test of durability is carried out and the concrete mix ratio of circular section members can be selected by quantitative calculation of service life. Furthermore, efforts are made through giving examples in analysis of the distribution rule of chlorine ion contained in the circular section members. The results show that circular section members have better durability than rectangular section members. Therefore, it concludes that the circular section member is more durable than rectangular section member. The circular section members can increase the concrete mix ratio to meet the durability, reduce the difficulty of concrete configuration and reduce the construction cost.

Key words: concrete; chloride ion; durability; circular section

收稿日期: 2019-02-24; 修改日期: 2019-05-16

基金项目: 安徽省教育厅自然科学重点项目(KJ2018A0415, KJ2018A0412, KJ2016A743)

作者简介: *周 明(1985-), 男, 安徽芜湖人, 讲师, 博士, 主要从事混凝土耐久性设计研究(E-Mail:zmvxxy123@163.com);
涂劲松(1977-), 男, 安徽六安人, 副教授, 硕士, 主要从事建筑结构耐久性及建筑 BIM 技术研究(E-Mail:67256872@qq.com);
赵家琦(1986-), 男, 河南修武人, 博士生, 主要从事海洋混凝土耐久性设计研究(E-Mail:zjq626@outlook.com);
葛清蕴(1979-), 女, 山东临沂人, 硕士, 主要从事建筑结构和混凝土结构耐久性设计研究(E-Mail:55811560@qq.com);
卞 祝(1987-), 女, 安徽六安人, 硕士, 主要从事建筑结构和混凝土结构耐久性设计研究(E-Mail:450927314@qq.com)。

0 前言

处于氯离子环境中的混凝土结构特别是海洋环境中的混凝土结构等,常因为混凝土中的钢筋锈蚀而发生过早的腐蚀损坏^[1],其危害将造成严重的经济损失和人员伤亡。

从 Colleparidi M 等^[2]根据物质扩散理论提出氯离子的扩散控制方程,世界各国学者开展了混凝土中氯离子扩散及抗氯离子侵蚀耐久性的研究,何亚伯等^[3]、张敏杰等^[4]、朱海威等^[5]各国学者研究了混凝土中掺和高性能矿物掺合料对混凝土抗氯离子侵蚀耐久性的影响。数值分析方法方面,施养杭等^[6]利用有限差分法分析了混凝土中一维氯离子扩散规律和耐久性服役寿命;杨绿峰等^[7]引入了有限元法、杨绿峰等^[8]引入边界元法研究了混凝土中氯离子的扩散和分布规律,并进一步考虑扩散的随机性研究了氯离子扩散的随机特性。世界各国及组织建立了氯离子侵蚀环境中混凝土耐久性设计的规范和章程,然而依据相应的规程开展设计而建造的混凝土结构特别是海洋建筑的腐蚀破坏现象仍然存在。建筑结构的形式和扩散维数的影响特别是圆形截面的氯离子扩散分布规律及服役寿命分析,还没有引起应有的重视,从而导致有些结构发生过早的破坏。因此,在结构耐久性设计或服役寿命预测时有必要考虑氯离子的扩散维数和结构形式的影响。但是,目前常见的一维、二维扩散服役寿命模型都不能准确预测圆形截面构件的服役寿命,因此有必要开展圆形截面的服役寿命研究,为圆形截面的混凝土配制和耐久性设计提供依据。

氯离子侵蚀环境下混凝土结构的腐蚀过程主要分为腐蚀诱导期、腐蚀发展期和腐蚀破坏期三个阶段^[9]。由于腐蚀发展期和腐蚀破坏期相对腐蚀诱导期是一段非常短的时间^[10],并且依据《混凝土结构耐久性设计规范 GB/T 50476—2008》附录 A 对混凝土结构构件的耐久性极限状态的规定,为结构安全起见,取钢筋开始发生锈蚀时为结构构件耐久性终点。因此将腐蚀诱导期即钢筋表面氯离子浓度达到临界氯离子浓度的时间作为混凝土构件的服役寿命终点。开展了耐久性正交实验,通过矩形截面和圆形截面构件的服役寿命分析 16 组配合比实

验数据,确定某桥梁满足耐久性要求所需的配合比。最后,通过算例分析结构的形式对耐久性设计及配合比的确定等具有较大的影响,使用合适的服役寿命模型可以准确预测混凝土结构的耐久性服役寿命,从而一定程度上降低了建造的成本,减小设计难度。

1 基于混凝土临界氯离子浓度的定值法服役寿命

当服役年限为 T 时,混凝土中保护层厚度 d 处的氯离子浓度 C_d 达到钢筋脱钝的临界浓度 C_{cr} ,即:

$$C_d = C_{cr} \quad (1)$$

混凝土中的钢筋开始腐蚀,认为 T 为混凝土达到服役的耐久性年限。

基于文献[12]传统一维、二维氯离子扩散解析解,推导得到传统一维、二维氯离子扩散服役寿命 T_{1D} 、 T_{2D} 分别为:

$$T_{1D} = \frac{d^2}{4D} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr} - C_0}{C_s - C_0} \right) \right]^2 \quad (2)$$

$$T_{2D} = \frac{d^2}{4D} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr} - C_0}{C_s - C_0} \right) \right]^4 \quad (3)$$

式中, d 为钢筋的保护层厚度 (mm); C_{cr} 为临界氯离子浓度 (%), C_0 为初始氯离子浓度 (%).

由于保护层处氯离子是 T 的单调函数,因此,基于腐蚀诱导期的圆形截面构件的服役寿命 T_c 可以通过数值方法(如二分法)及圆形截面构件中氯离子的分布规律^[12],求解下列方程的根得到:

$$C_s - C_{cr} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(C_s - C_0)e^{-D\beta_n^2 T_c}}{\beta_n R J_1(\beta_n R)} J_0[\beta_n(R-d)] = 0 \quad (4)$$

式中, β_n 为 $J_0(\beta_n R) = 0$ 的根。

$J_0(x)$ 、 $J_1(x)$ 为:

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{2^2 \times (1!)^2} + \dots + \frac{x^{2i}}{2^{2i} \times (i!)^2} + \dots \quad (5)$$

$$J_1(x) = \frac{x}{2} - \frac{x^3}{2^3 \cdot 2!} + \dots + (-1)^k \frac{x^{2k+1}}{2^{2k+1} \cdot k! \cdot (k+1)!} + \dots \quad (6)$$

2 耐久性正交实验及结果分析

2.1 耐久性正交实验原材料

原材料水泥采用 PII 42.5 硅酸盐水泥; 细骨料中砂, 表观密度为 2560 kg/m^3 , 细度模数为 2.7; 粗骨料碎石, 表观密度为 2590 kg/m^3 , 粒径范围 5-31.5 mm, 连续级配; 外加剂聚羧酸系高效减水剂, 固含量为 18.94%; 根据 ASTM C1202 标准测试 6 小时电通量, 表 1 为混凝土的水胶比、粉煤灰和矿渣掺量及养护龄期为 28 d 时 6 h 电通量试验结果。

杨绿峰等^[13]研究认为电通量和扩散系数之间存在的关系为:

$$D = 0.00268Q + 0.7029 \quad (7)$$

式中, Q 为标准养护 28 d 混凝土 ASTM C1202 法测得的电通量, 单位为 C; D 为扩散系数, 单位为 $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

2.2 实验结果和配合比选择分析

表 1 混凝土 6 h 电通量测试结果和扩散系数预测值

Table 1 Experimental results of 6-hour electric flux and prediction of diffusion coefficient of concrete

组别	水胶比	粉煤灰掺量	矿渣掺量	6h 电通量 (C)	扩散系数($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)	T-C600(a)	T-1D(a)	T-2D(a)
1	0.53	10%	0%	1797.5	5.51	26.75	30.97	12.73
2	0.53	15%	0%	2411.5	7.16	20.61	23.86	9.81
3	0.53	20%	10%	1087.7	3.61	40.81	47.25	19.43
4	0.53	25%	20%	1522.9	4.78	30.86	35.73	14.69
5	0.47	10%	0%	1507.1	4.74	31.14	36.05	14.82
6	0.47	15%	0%	1562.8	4.89	30.19	34.95	14.37
7	0.47	20%	20%	1282.8	4.14	35.66	41.28	16.97
8	0.47	25%	10%	597.7	2.30	64.05	74.16	30.49
9	0.43	10%	10%	914.4	3.15	46.82	54.21	22.29
10	0.43	15%	20%	1608.3	5.01	29.45	34.10	14.02
11	0.43	20%	0%	1059.3	3.54	41.69	48.26	19.84
12	0.43	25%	0%	780.0	2.79	52.85	61.19	25.16
13	0.35	10%	20%	660.1	2.47	59.72	69.15	28.43
14	0.35	15%	10%	703.2	2.59	57.06	66.06	27.16
15	0.35	20%	0%	675.8	2.51	58.72	67.99	27.95
16	0.35	25%	0%	620.1	2.36	62.43	72.28	29.72

由表 1 可知, 混凝土水胶比和外掺料对混凝土耐久性和扩散系数的影响较大, 这是由于水胶比、矿物掺合料种类和数量对混凝土中孔隙数量和结构有较大的影响, 而混凝土的氯离子渗透性能主要与混凝土的孔隙数量和结构相关。因此, 通过调整混凝土的水胶比和外掺料掺量可以有效地提高混凝土的耐久性, 然而对于严酷条件下仅仅通过调整混凝土配合比难以使结构达到预定的服役寿命或者造价过高和施工难度过大。

按照 8、12-16 组的配合比配制的混凝土能满足直径为 600 mm 的圆形构件服役寿命的要求, 可以作为该结构制作时采用。而使用氯离子扩散一维模

型便于分析扩散维数和结构形式对选择和确定结构混凝土配合比的影响, 以一确定的工程为例, 分析实验数据选择满足服役寿命要求的配合比。现有某海港码头承力柱, 其柱截面为圆形, 直径为 600 mm, 采用普通钢筋, 钢筋的保护层厚度为 70 mm。通过调研表明该建筑所处环境中的其他建筑表面的氯离子浓度为 0.30%, 临界氯离子浓度为 0.15%, 该混凝土构件设计服役寿命 50 a。

利用式(7)计算得到 16 组配合比的混凝土扩散系数如表 1 所示。分别将不同组的混凝土扩散系数代入式(4)求解直径为 600 mm 的圆形构件服役寿命 T-C600, 并将结果列入表 1, 同时将扩散系数代入式(2)和式(3), 计算保护层厚度为 70 mm 时传统一维、二维氯离子扩散服役寿命 T-1D、T-2D, 单位为年 (a)。

型进行配合比筛选时, 将保留了原先不能满足该结构耐久性的配合比, 如表中的第 9 组, 从而使耐久性设计偏于危险。此外, 若使用传统二维氯离子扩散模型进行耐久性分析与设计时, 该 16 组配合比皆不能满足服役寿命 50 年的要求, 需要进行重新设计混凝土结构例如增大保护层厚度或重新设计混凝土配合比进行筛选, 这将夸大了氯离子的侵蚀作用, 增加建筑设计施工难度和建造成本。可见结构的形式对耐久性设计及配合比的确定等具有较大的影响, 使用合适的服役寿命模型可以准确预测混凝土结构的耐久性服役寿命, 从而一定程度上降低了建造的成本, 减小设计难度。

3 算例分析

算例 1 某跨海大桥, 设计使用年限为 100 a, 在结构设计阶段确定该桥桥墩可选的截面形式有尺寸分别为 4000 mm×4000 mm 的矩形截面、直径为 4000 mm 的圆形截面, 两种截面形式的桥墩皆可满足其承载力要求。现要求从结构耐久性方面来优化设计方案, 已知该桥梁所处环境中的其他建筑表面的氯离子浓度为 0.8%, 采用不锈钢钢筋, 钢筋脱钝的氯离子浓度为 0.50%。由于矩形截面拐角部位为二维氯离子扩散区域, 该区域常为应力集中区域, 是耐久性设计的重点部位, 实际工程常由于该处钢筋的锈蚀而导致构件的整体失效, 因此在耐久性设计阶段通常将该部位的钢筋的初锈时刻作为矩形截面服役寿命的终点。本算例仍将该部位的钢筋初锈时刻作为服役寿命的终点, 分别取扩散系数 D 为 $2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $4 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $6 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 。

分析确定本算例中的构件的保护层厚度、扩散系数限值及结构外形, 计算氯离子的分布规律, 并将临界氯离子的深度和 $(Dt)^{-1/2}$ 的关系绘制于图 1 中, 从而确定多组的保护层厚度、扩散系数及外形的方案, 为结构耐久性设计的优化提供依据。图中横坐标为 $(Dt)^{-1/2}$, 单位为 mm, 纵坐标为临界氯离子浓度所在的深度, 并据此确定满足设计服役寿命 100 a 的构件形式、钢筋保护层厚度和扩散系数组合, 见表 2。

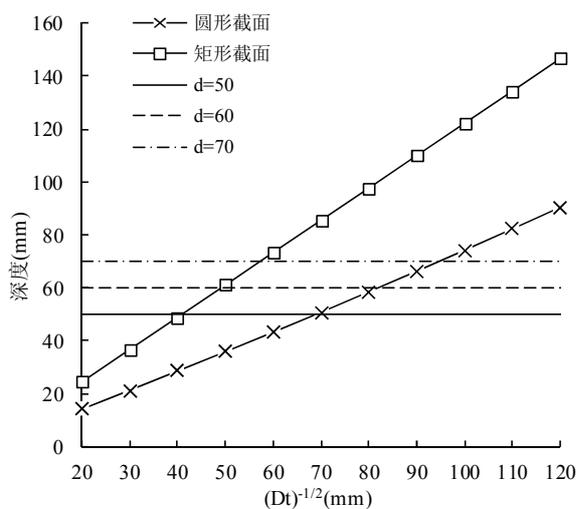


图 1 氯离子浓度为 0.5% 所在的深度随 $(Dt)^{-1/2}$ 的变化规律
Fig.1 The change of the depth with $(Dt)^{-1/2}$ in the concentration of chloride ion

表 2 100 年服役寿命下矩形和圆形截面结构的参数限值
Table 2 Parametric limits for rectangular and circular cross-section structures under 100-year service life

结构外形	$(Dt)^{-1/2}$ 限值(mm)			D 上限值 ($\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)		
	d=50	d=60	d=70	d=50	d=60	d=70
矩形	40.88	49.12	57.05	0.530	0.765	1.032
圆形	69.44	81.73	94.72	1.529	2.118	2.845

由图 1 可知临界氯离子浓度所在深度随着 $(Dt)^{-1/2}$ 的增加而呈线性增加的趋势, 圆形构件的耐久性明显高于矩形截面; 表 2 列出了图 1 中的 $(Dt)^{-1/2}$ 限值, 并计算了满足设计服役寿命 100 a 时的扩散系数限值。结果进一步验证了在设计构件截面时, 选择圆形截面可以提高构件的服役寿命, 并减小混凝土配置和施工的难度, 进而降低建造成本。由于扩散系数较小时混凝土难以配制, 选取 $2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 左右较为合适, 保护层厚度较大时构件容易开裂, 因此本算例的结构可以选择保护层厚度为 60 mm、扩散系数限值为 $2.118 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 的圆形截面构件作为优选方案。

4 结论

1) 混凝土耐久性设计时, 应考虑混凝土的配合比参数及考虑结构的几何外形, 提出基于钢筋腐蚀诱导期的圆形截面混凝土构件的服役寿命计算公式和方法。

2) 实验结果与配合比选择结果表明, 考虑构件的外形, 可以增加满足耐久性要求的多种配合比组合。

通过算例分析, 验证了在构件进行耐久性设计时, 可以开展构件的几何外形选择, 选择圆形截面更加有利于构件耐久性, 并有效降低配合比设计的难度, 降低造价。

参考文献:

- [1] Saassouh B, Lounis Z. Probabilistic modeling of chloride-induced corrosion in concrete structures using first- and second-order reliability methods[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(9):1082-1093.
- [2] Collepardi M, Marcialis A, Turriziani R. The kinetics of penetration of chloride ions into the concrete [J].

- Cemento (Italy), 1970(4): 157-164.
- [3] 何亚伯,陈保勋,刘素梅,等. 预加荷载作用下粉煤灰/硅灰纤维混凝土氯离子渗透性能研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2017(3):97-104.
- [4] 张敏杰,蒋亚清,赵越. 海工高性能混凝土配制及耐久性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(6):1-5.
- [5] 朱海威,余红发,麻海燕,等. 硅灰混凝土表面氯离子扩散系数影响因素的研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(10):2753-2756.
- [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.
- [7] 李冉,杨绿峰,陈正. 混凝土中氯离子扩散的二维有限元法数值模拟[J]. 混凝土, 2008(1): 36-39.
- [8] 杨绿峰,陈正,王焱,等. 混凝土中氯离子二维扩散分析的边界元法[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(7):1110-1117.
- [9] 吴瑾,吴胜兴. 氯离子环境下钢筋混凝土结构耐久性寿命评估[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 59-63.
- [10] 马亚丽,张爱林. 基于规定可靠指标的混凝土结构氯离子侵蚀耐久寿命预测[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 36-41.
- [11] Suryavanshi A K, Swamy R N, Cardew G E. Estimation of diffusion coefficient for chloride ion penetration into structural concrete [J]. ACI Material Journal, 2002, 99(5): 441-449.
- [12] 周明,杨绿峰,陈正. 等. 圆柱体混凝土构件中氯离子扩散的解析研究[J]. 水利水运工程, 2012(12): 38-43.
- [13] 杨绿峰,周明,陈正. 海洋混凝土结构耐久性定量分析与设计[J]. 土木工程学报, 2014(10):70-79.