



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.026

闫菲, 王瑞骏, 车明杰, 等. 基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 161-167. YAN Fei, WANG Rui jun, CHE Ming jie, et al. The prediction model of concrete durability based on permeability[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 161-167. (in Chinese)

基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型

闫菲¹, 王瑞骏¹, 车明杰², 贺新星¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2. 黑龙江电力勘察设计研究院, 哈尔滨 150010)

摘要: 通过不同配合比混凝土试件的气体渗透性测试、吸水性测试及氯离子侵蚀试验, 分析了混凝土氯离子扩散系数与渗透性能之间的关系, 建立了基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型, 并以某临海水闸工程为例对所建模型进行验证。结果表明: 空气渗透性系数、吸水性系数及氯离子扩散系数均随着水灰比的增大而增大; 不同水灰比情况下, 氯离子扩散系数均随空气渗透性系数、吸水性系数的增大而增大, 且呈现一定的相关性; 建立的基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型, 只需进行混凝土结构渗透性能的试验, 即可预测混凝土结构的使用寿命; 以某临海水闸工程为例对所建模型进行验证, 认为该模型是可行的。建立基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型对在氯离子环境下的混凝土结构工程直接利用渗透性能预测其使用寿命具有重要意义。

关键词: 混凝土; 渗透性能; 氯离子侵蚀; 耐久性预测模型

中图分类号: TV 223.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)04-0161-07

The prediction model of concrete durability based on permeability

YAN Fei¹, WANG Rui jun¹, CHE Ming jie², HE Xin xing¹

(1. Institute of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Heilongjiang Electric Power Survey and Design Institute, Harbin 150010, China)

Abstract: Through gas permeability test, water absorption test, and chloride ion erosion test of concrete samples with different mix proportions, this article has analyzed the relationship between the chloride ion diffusion coefficient and permeability, established a concrete durability prediction model based on permeability, and verified the model with a coastal sluice. The results showed that gas permeability coefficient, water absorption coefficient, and chloride ion diffusion coefficient would all increase with the increase of water cement ratio; in different water cement ratio conditions, chloride ion diffusion coefficient would increase with the increase of gas permeability and water absorption coefficient, showing a certain correlation between them. Just by testing the permeability of concrete structures, the established prediction model of concrete durability can predict the service life of the concrete structures. The model was verified and proven feasible with a coastal sluice. It has great significance in predicting the service life of concrete structures in chloride environment directly based on their permeability.

Key words: concrete; permeability; chloride ion erosion; durability prediction model

钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构使用寿命降低的关键因素, 而引起钢筋锈蚀的主要原因是在富含

氯离子环境下, 氯离子通过混凝土结构缺陷渗入, 最终在钢筋表面聚集并达到临界浓度, 且该过程中必

收稿日期: 2016-07-16 修回日期: 2016-09-23 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779051)

Fund: National Natural Science Foundation of China(50779051)

作者简介: 闫菲(1990), 女, 陕西凤翔人, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。E-mail: 335882680@qq.com

通讯作者: 贺新星(1992), 男, 安徽淮南人, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。E-mail: 807821921@qq.com

须要有空气和水的存在^[1,2]。混凝土的渗透性能主要体现在渗气性和渗水性这两方面,因此,混凝土的渗透性能是影响氯离子侵蚀的关键因素^[3]。目前基于渗透性能的耐久性研究主要成果在于两者之间的关系,通过数值和试验分析,许多学者^[4,7]认为:混凝土的渗透性能与其耐久性之间互相影响,密切相关,基于混凝土的渗透性能来评价混凝土的耐久性是可行的。本文通过试验,分析混凝土氯离子扩散系数与渗透性能之间的关系,建立基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型,对在氯离子环境下的结构工程直接利用渗透性能预测其使用寿命有重要意义。

1 试验概况

1.1 试验材料及混凝土配合比

水泥采用陕西秦岭水泥总厂 P. O52 5R 水泥;粉煤灰采用渭河电厂 0 级粉煤灰;骨料采用河砂及粒径 5~ 35 mm 的天然卵石;减水剂采用西安市红旗外加剂厂聚羧酸高效减水剂;引气剂采用三萜皂甙高效引气剂;采用普通自来水。混凝土试件设计为五组不同水灰比的配合比混凝土试件。混凝土 28 d 抗压强度测定时,混凝土配合比及力学性能见表 1。

表 1 混凝土配合比及力学性能

Tab. 1 The mix proportions and mechanical properties of concrete

组别	混凝土配合比								28 d 抗压强度/MPa
	水泥/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	石/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰 (%)	引气剂 (%)	减水剂 (%)	水灰比	
A	300.00	150.00	592.36	1 211.18	97.50	0.03	0.8	0.40	39.4
B	266.67	150.00	608.13	1 234.97	86.66	0.03	0.8	0.45	30.0
C	240.00	150.00	620.74	1 265.01	78.00	0.03	0.8	0.50	28.0
D	218.18	150.00	631.06	1 269.59	70.91	0.03	0.8	0.55	26.3
E	200.00	150.00	639.66	1 282.57	65.00	0.03	0.8	0.60	18.2

1.2 试件制作及试验方法

试验分别制作五组规格为 $\Phi 300$ mm, 高度 100 mm; $\Phi 100$ mm, 高度 50 mm 的两种混凝土试件,混凝土浇注 24~ 48 h 后进行拆模,制作完成后将试件放入标准养护箱中养护 28 d, 养护箱温度控制在 20 ± 5 °C, 相对湿度控制在 95% 以上。

1.2.1 气体渗透性测试

气体渗透性测试采用 Autoclam 自动渗透性测试仪,见图 1。测试之前,将试件烘干至恒重,仪器气压缓慢升至 0.5 mbar,对监测气压的衰减情况,每分钟记录一次,直到测试进行 15 分钟或气压下降为零为止^[8]。

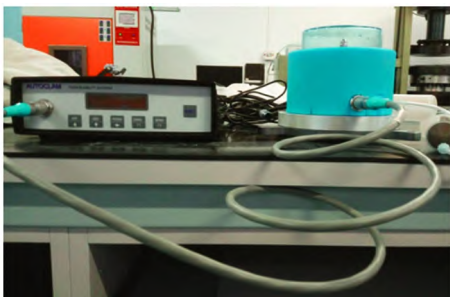


图 1 Autoclam 渗透性测定仪
Fig. 1 Autoclam permeability tester

1.2.2 吸水性测试

吸水性测试也采用 Autoclam 自动渗透性测试

仪,可在气体渗透性测试的同一位置进行,但必须至少间隔一小时。当仪器仓盛满水后,进水管自动关闭,微泵继续增压至大气压以上 20 mbar。测试开始时,压力水可认为是被毛细管吸收,此时仪器内部水压有下降趋势,通过水泵及系统控制把水压保持为某固定值,在测试 15 分钟内,仪器自动记录测试期间的吸水量,每分钟测量一次注水量。

1.2.3 氯离子侵蚀试验

试验采用 RCM 法,试验设备见图 2、图 3。试件(直径 $\Phi 100$ mm, 高度 $h = 50$ mm) 见图 4。RCM 法属于氯离子电迁移试验方法,在电场作用下氯离子定向运动称为电迁移。结合化学分析,通过确定氯离子浓度-距离-时间关系,得到氯离子扩散系数。

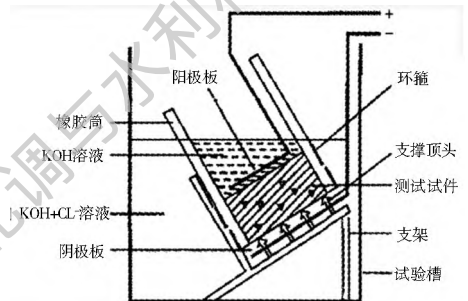


图 2 RCM 测定仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of RCM tester

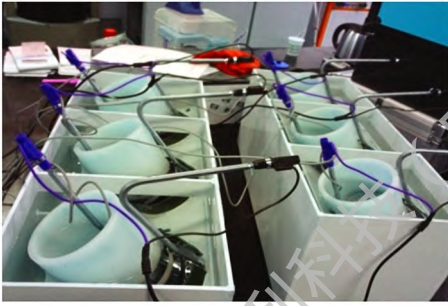


图 3 RCM 试验槽
Fig.3 RCM test pot

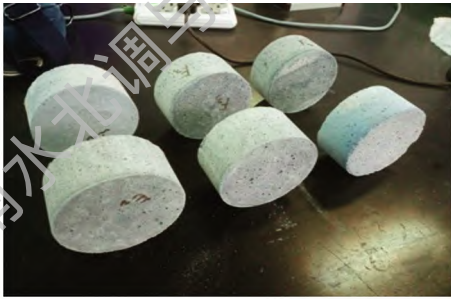


图 4 氯离子侵蚀试件
Fig.4 The chloride ion erosion test piece

试件吸水性系数随水灰比的变化规律。由图可知, 各组试件吸水性系数随水灰比的增大而增大。

表 2 各组试件气体渗透性测试结果

Tab.2 Gas permeability test results of each concrete sample

分钟	组别				
	A	B	C	D	E
0	534	511	509	509	506
1	517	465	392	339	422
2	452	444	336	245	393
3	433	424	291	180	348
4	416	406	253	136	317
5	400	389	222	108	290
6	385	373	218	86	264
7	371	357	204	70	241
8	358	342	192	57	221
9	345	328	180	47	203
10	333	315	170	39	186
11	321	302	160	33	170
12	310	290	150	28	156
13	299	278	142	25	143
14	289	268	133	21	131
15	279	257	126	19	120
空气渗透性系数	0.036	0.041	0.057	0.074	0.088

1.3 试验结果的整理与分析方法

(1) 空气渗透性系数。气压的自然对数值对时间是线性的, 记录气压的自然对数值随时间的衰减曲线, 取线性回归直线斜率作为空气渗透性系数, 单位为 Ln/min 。

(2) 吸水性系数。累计吸收的水量对时间平方根是线性的, 其斜率即为吸水性系数^[9], 单位为 $\text{m}^3/\sqrt{\text{min}}$ 。

(3) 氯离子扩散系数参考文献[10]进行计算, 如公式(1)、(2)所示。

$$D_{RCM} = 2.872 \times 10^{-6} \frac{Th(x_d - a)\sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$a = 3.338 \times 10^{-3} \sqrt{Th} \quad (2)$$

式中: D_{RCM} 为氯离子扩散系数 (m^2/s); h 为试件高度 (m); T 为阳极电解液初始和最终温度的平均值 (K); x_d 为氯离子平均扩散深度 (m); t 为通电持续时间 (s); a 为辅助变量。

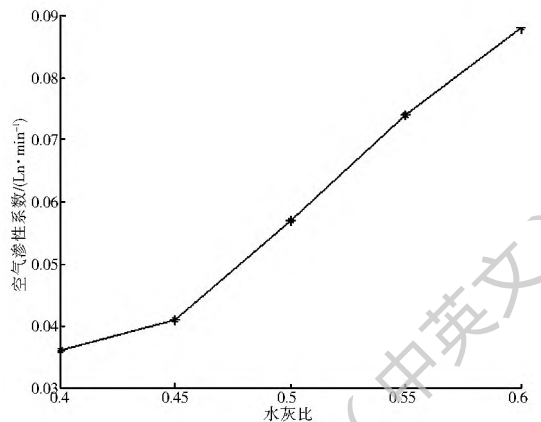


图 5 空气渗透性系数与水灰比关系曲线
Fig.5 Relation between gas permeability coefficient and water cement ratio

2 各试验结果与分析

2.1 气体渗透性测试

各组试件气体渗透性测试结果见表 2, 图 5 为各组试件空气渗透性系数随水灰比的变化规律。由图可知, 各组试件空气渗透性系数随水灰比的增大而增大。

2.2 吸水性测试

各组试件吸水性测试结果见表 3, 图 6 为各组

表 3 各组试件吸水性测试结果

Tab.3 Water absorption test results of each concrete sample

组别	吸水量		
	5m in/μl	15m in/μl	吸水性系数 ($\times 10^7$) $\text{m}^3/\sqrt{\text{min}}$
A	182	182	0
B	190	1952	0.557
C	186	5663	1.732
D	204	7502	2.308
E	196	8101	2.500

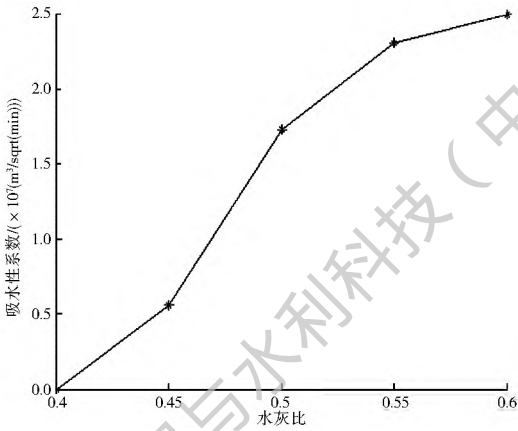


图6 吸水性系数与水灰比关系曲线

Fig. 6 Relation between water absorption coefficient and water cement ratio

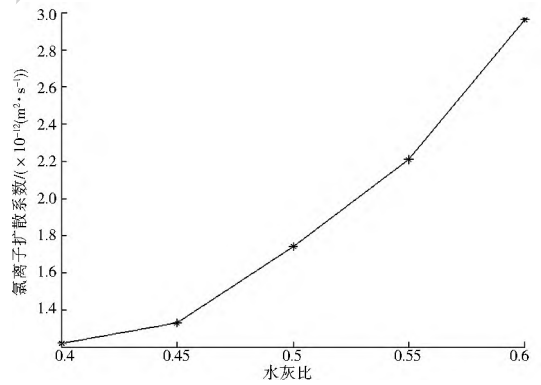


图7 氯离子扩散系数与水灰比关系曲线

Fig. 7 Relation between chloride ion diffusion coefficient and water cement ratio

2.3 氯离子侵蚀试验

各组试件氯离子扩散系数计算见表4, 各组试件所测得的氯离子扩散系数分布于0.75~2.96之间。根据表5, A、B两组混凝土抗氯离子耐久性为0级, C、D两组抗氯离子耐久性为1级, E组抗氯离子耐久性为2级。本次试验混凝土掺用了高性能减水剂和引气剂, 与普通混凝土氯离子迁移系数相比较, 所得结果规律合理。

表4 各组混凝土试件氯离子扩散系数计算表

Tab. 4 Calculation of chloride ion permeability coefficient of each concrete sample

组别	T/K	X_d/m	t/s	$D_{RCM}/(\times 10^{-12}m^2 \cdot s^{-1})$
A	292.50	0.0194	604800	1.22
B	292.25	0.0210	604800	1.33
C	292.15	0.0272	604800	1.74
D	292.95	0.0253	604800	2.21
E	291.85	0.0454	604800	2.96

表5 基于氯离子迁移系数(RCM法)对混凝土抗氯离子性能的等级划分

Tab. 5 Grade classification of chloride ion resistance of concrete based on chloride migration coefficient (RCM method)

等级	项目	
	$D_{RCM}/(\times 10^{-12}m^2 \cdot s^{-1})$	混凝土耐久性水平推荐意见
3	> 4.5	差
2	3.5 < 4.5	较差
1	2.5 < 3.5	较好
0	1.5 < 2.5	好
0	< 1.5	很好

图7为各组试件氯离子扩散系数随水灰比的变化规律。由图可知, 各组试件氯离子扩散系数随水灰比的增大而增大。

3 氯离子扩散系数与混凝土渗透性能的关系

(1) 氯离子扩散系数与空气渗透性系数的关系。

通过对氯离子扩散系数与空气渗透性系数试验数据的曲线拟合, 见图8, 可看出, 不同水灰比下, 各组试件氯离子扩散系数随空气渗透性系数的增大而增大, 且呈线性相关, 其线性关系为

$$\begin{cases} y_1 = 32.046X_q - 0.0051 \\ R^2 = 0.9716 \end{cases} \quad (3)$$

式中: y_1 为混凝土氯离子扩散系数($\times 10^{-12}m^2/s$); X_q 为混凝土空气渗透性系数(Ln/min); R^2 为相关系数。

(2) 氯离子扩散系数与吸水性系数的关系。

通过对氯离子扩散系数与吸水性系数试验数据的曲线拟合, 见图9, 可看出, 不同水灰比下, 各组试件氯离子扩散系数随吸水性系数的增大而增大, 且呈多项式相关性, 其多项式关系为

$$\begin{cases} y_1 = 0.1716X_x^2 + 0.0183X_x + 1.2 \\ R^2 = 0.9553 \end{cases} \quad (4)$$

式中: X_x 为混凝土吸水性系数($\times 10^7(m^3/\sqrt{min})$)。

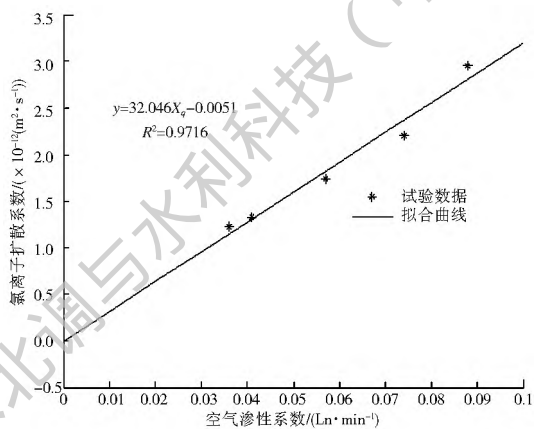


图8 氯离子扩散系数与空气渗透性系数关系曲线

Fig. 8 Relation between chloride diffusion and gas permeability coefficient

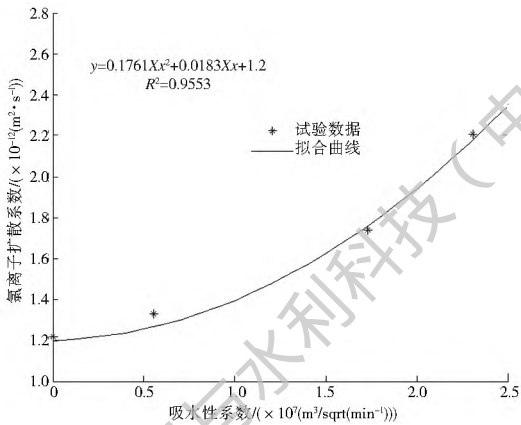


图9 氯离子扩散系数与吸水性系数关系曲线

Fig. 9 Relation between chloride diffusion coefficient and water absorption coefficient

4 基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型

4.1 氯离子侵入模型

氯离子侵蚀导致钢筋锈蚀的过程可分为三个阶段^[11-12],分别为腐蚀诱导阶段、腐蚀发展阶段以及腐蚀破坏阶段。但是在氯离子环境下,钢筋一旦开始锈蚀,腐蚀发展阶段非常短,一般将腐蚀诱导阶段定义为混凝土结构的使用寿命。因此,确定影响腐蚀诱导阶段的临界浓度是预测混凝土结构使用寿命的关键。

Fick 第二定律描述的氯离子扩散是不随时间变化的^[13],则事实上相反。针对这种现象,许多学者^[14-17]对其进行研究并用幂函数表示该现象,如式(5)所示。

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2D_0(t_0/t)^m}} \right) \right] \quad (5)$$

式中: $C(x, t)$ 为 t 时刻 x 深度处的氯离子浓度; C_0 为混凝土初始氯离子浓度; C_s 为表面氯离子平衡浓度; D_0 为一般结构暴露为 28 d 时的有效扩散系数,由于试验周期原因,本文取 7 d; x 为距离表面的深度; t 为结构暴露的时间; m 为环境条件系数(常数), m 为时间衰减系数,已有成果表明对于普通混凝土 m 值在 0.25 左右,对于掺粉煤灰和矿渣时的 m 值在 0.6 左右; $\operatorname{erf}(z)$ 为误差函数。

由上式可看出,只要氯离子临界浓度确定,就可以反求出结构暴露时间 t ,从而预测混凝土的使用寿命。我国学者通过调查和取样^[18],测得位于海港码头的混凝土结构的氯离子临界浓度大概在为 0.105% ~ 0.150%。但是已有研究中显示氯离子临界浓度结果离散性很大^[19],很难定出一个统一的氯离子临界浓度值。

4.2 建立基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型

由混凝土氯离子扩散系数与渗透性能的关系研究可看出,不同水灰比下,氯离子扩散系数随空气渗透性系数、吸水性系数的增大而增大,且呈一定的相关性,无论是理论上还是实际中都有着比较稳定的相关性,从而建立以空气渗透性系数、吸水性系数为指标的混凝土耐久性预测模型。

考虑各种自然因素的影响,结合公式(3)、(5),公式(4)、(5)分别建立以空气渗透性系数以及吸水性系数为指标的混凝土耐久性预测模型,如式(6)、(7)所示。

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \sqrt{(32.046X_a - 0.0051)(t_0/t)^m}} \right] \right] \quad (6)$$

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \sqrt{(0.1761X_x^2 + 0.0183X_x + 1.2)(t_0/t)^m}} \right] \right] \quad (7)$$

4.3 模型验证

某临海水闸^[20]位于浙江省温州市,该水闸建成于 1998 年 4 月。水闸为单孔,净宽 5.0 m,钢闸门;设计过流流量 $50.2 \text{ m}^3/\text{s}$,该水闸从 1998 年建成服役 5 350 d 后,闸门及翼墙混凝土腐蚀严重,混凝土中有张裂缝。

该水闸闸墩为钢筋混凝土结构,混凝土保护层厚 35 mm,水灰比为 0.5,参照本文不同水灰比下气体渗透性测试及吸水性测试结果可得空气渗透性系数为 $0.057 \text{ Ln}/\text{min}$,吸水性系数为 $1.732 \times 10^7 \text{ m}^3/\sqrt{\text{min}}$;对于掺粉煤灰的混凝土时间衰减系数 m 值一般在 0.6 左右,本文取 0.684,该水闸施工时用当地自来水拌和混凝土,故混凝土中初始氯离子浓度 C_0 取 0,暴露在氯离子浓度为 $C_s = 1.90\%$ 的海水环境中,把以上数据代入式(6)及式(7),可以预测到服役 5 350 d 后闸墩钢筋表面处的氯离子临界浓度分别为 0.25%、0.236%。

文献[20]中采用 Monte Carlo 法进行不同临界氯离子浓度下的钢筋初锈时间预测,由结果可得出:当混凝土中钢筋初锈时间在 3 000 d 左右时,临界氯离子浓度在 0.12% ~ 0.18%;当钢筋初锈时间在 1 000 d 左右时,临界氯离子浓度均值在 0.06% 左右。利用本文建立以空气渗透性系数以及吸水性系数为指标的混凝土耐久性预测模型计算所得服役 5 350 d 后闸墩钢筋表面处的氯离子临界浓度分别

为0.25%、0.236%与文献[20]中的结果相吻合。由此可见,本文建立的基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型是可行的。

5 结语

通过试验研究,分析了混凝土氯离子扩散系数与渗透性能之间的关系,建立了基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型,并以某临海水闸工程为例对所建模型进行验证,得出以下结论。

(1) 空气渗透性系数、吸水性系数及氯离子扩散系数均随着水灰比的增大而增大。不同水灰比情况下,氯离子扩散系数均随空气渗透性系数、吸水性系数的增大而增大,且呈现一定的相关性。

(2) 本文建立的基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型,只需进行混凝土结构渗透性能的试验,即可预测混凝土结构使用寿命;以某临海水闸工程为例对所建模型进行验证,认为该模型是可行的。建立基于渗透性能的混凝土耐久性预测模型对在氯离子环境下的混凝土结构工程能直接利用渗透性能预测其使用寿命具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 河野克哉. 混凝土中钢筋锈蚀的氯离子临界浓度及规范[J]. 混凝土世界, 2011(10): 34-39. (Katsuya Kono. Chloride threshold concentration of reinforcement corrosion in concrete and specification[J]. Concrete world, 2011(10): 34-39. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-7011.2011.10.007
- [2] 吴嘉君, 朱银国, 许家宁, 等. 严酷环境下的混凝土耐久性进展研究[J]. 江苏建材, 2013(5): 21-23. (WU Jiajun, ZHU Yirguo, XU Jianing, et al. Progress of concrete durability research in harsh environment[J]. Jiangsu Construction, 2013(5): 21-23. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-5538.2013.05.007
- [3] 延永东, 姚昌建, 刘荣桂, 等. 氯盐环境下开裂混凝土耐久性研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2015(32): 21-30. (YAN Yongdong, YAO Changjian, LIU Gufeng, et al. Research progress on durability of cracked concrete under chloride environment[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015(32): 21-30. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2015.04.004
- [4] 陆春华, 金伟良, 延永东. 氯盐干湿环境下受弯横向裂缝对钢筋混凝土耐久性影响[J]. 海洋工程, 2012, 30(1): 131-136, 144. (LU Chunhua, JIN Weiliang, YAN Yongdong. Influence of transverse cracks on durability of rc member under chloride dry and wet cycles[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(1): 131-136, 144. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-9865.2012.01.019
- [5] 孙海波. 氯盐环境作用下的混凝土耐久性研究[J]. 四川建材, 2014, 40(6): 17-18. (SUN Haibo. Research on durability of concrete under chloride environment[J]. Sichuan Building Materials, 2014, 40(6): 17-18. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2014.06.008
- [6] 杨绿峰, 周明, 陈正, 等. 氯盐环境下混凝土耐久性多因素模型的试验研究及统计分析[J]. 水运工程, 2013(5): 56-62. (YANG Lv feng, ZHOU Ming, CHEN Zheng, et al. Multi factors model for durability of concrete under chloride environment based on experimental and statistical analysis[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(5): 56-62. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2013.05.009
- [7] 朱然, 吕清芳. 混凝土氯离子模型侵蚀综述[J]. 江苏建筑, 2015(1): 93-95, 99. (ZHU Ran, LV Qingfang. Review of modeling of chloride diffusion in concrete[J]. Jiangsu Architecture, 2015(1): 93-95, 99. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-6270.2015.01.028
- [8] 周啸尘. 混凝土气体渗透性测试方法对比分析[J]. 四川建材, 2011, 37(1): 18-20. (ZHOU Xiao chen. The comparative analysis of concrete gas permeability test methods[J]. Sichuan Building Materials, 2011, 37(1): 18-20. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2011.01.011
- [9] 陆晗, 王卫仑, 刘伟. 深港西部通道侧接线工程混凝土渗透性的检测与分析[J]. 混凝土, 2012(1): 129-131. (LU Han, WANG Weilun, LIU Wei. Testing and analyzing on concrete permeability of shenzhen side wiring project of Hong Kong-Shenzhen Western corridor[J]. Concrete, 2012(1): 129-131. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2012.01.041
- [10] 张士萍, 刘加平, 缪昌文. 预置表面裂缝对混凝土中氯离子传输的影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4): 550-553. (ZHANG Shirping, LIU Jiaping, LIAO Changwen. Influence of cracking on transport of chloride in concrete[J]. Journal of building materials, 2011, 14(4): 550-553. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2011.04.023
- [11] 黄君哲, 王胜年, 潘德强. 海工高性能混凝土结构使用寿命预测浅析[J]. 水运工程, 2004(2): 37-39, 43. (HUANG Junzhe, WANG Shengnian, PAN Deqiang. Analysis of prediction on service life of marine high performance concrete structures[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(2): 37-39, 43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2004.02.010
- [12] 王大方. 氯盐环境钢筋混凝土构件服役寿命计算[J]. 工程建设与设计, 2011(12): 108-112. (WANG Dafang. Service life calculation of reinforced concrete member in chloride environment[J]. Construction & design for Project, 2011(12): 108-112. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-9467.2011.12.038
- [13] 王成立. 氯盐环境条件下混凝土氯离子侵蚀模型及其研究进展[J]. 水运工程, 2004(4): 5-9. (WANG Licheng. Chloride ion erosion model for concrete in chloride environment and its research development[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(4): 5-9. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2004.04.001
- [14] 滕海文, 舒正昌, 黄颖, 等. 多因素作用下钢筋混凝土构件氯离子扩散系数模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1): 12-16. (TENG Haiwen, SHU Zhengchang, HUANG Yin, et al. Chloride ion diffusion coefficient model of r. c. elements under

- multiple factors[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(1): 12-16. (in Chinese) DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2011.01.004
- [15] 刘荣桂, 陈好, 颜庭成. 氯盐环境条件下预应力混凝土氯离子侵蚀模型研究[J]. 混凝土, 2006(9): 14. (LIU Ronggui, CHEN Yu, YAN Tingcheng. Research to chloride ion erosion model for prestressed concrete in chloride environment[J]. Concrete, 2006(9): 14. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2006.09.001
- [16] 蒋萌, 陆宏健, 寇新建, 等. 氯盐腐蚀环境下混凝土结构氯离子扩散模型研究[J]. 混凝土, 2013(5): 46-49. (JIANG Meng, LU Hongjian, KOU Xirjian, et al. Diffusion model study of chloride ion in concrete structure under chlorine salt corrosion environment[J]. Concrete, 2013(5): 46-49. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2013.05.013
- [17] 蒋萌, 蔡宁生, 寇新建, 等. 氯盐腐蚀环境下混凝土结构耐久性检测技术及研究[J]. 混凝土, 2013(6): 22-24, 28. (JIANG Meng, CAI Ningsheng, KOU Xirjian, et al. Testing technology and study of concrete structure durability under chlorine salt corrosion environment[J]. Concrete, 2013(6): 22-24, 28. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2013.06.007
- [18] 周炳辉. 氯离子临界浓度研究进展与评价[J]. 青海交通科技, 2013(4): 30-33. (ZHOU Binghui. The research progress and evaluation of chloride threshold concentration[J]. Qinghai Jiaotong Keji, 2013(4): 30-33. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-6189.2013.04.015
- [19] 蒋林华, 白舒雅, 徐金霞. 钢筋锈蚀氯离子临界浓度研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 77-82. (JIANG Lirhua, BAI Shuyaya, Xu Jinxia. Review on research of threshold chloride concentration of reinforcing steel corrosion in concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 77-82. (in Chinese) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2015.05.010
- [20] 张俊芝, 庄华夏, 伍亚玲, 等. 临海既有混凝土氯离子侵蚀及钢筋初锈时间预测[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 454-458, 464. (ZHANG Junzhi, ZHUANG Huaxia, WU Yaling, et al. Chloride ion erosion and prediction of initial corrosion time of steel bar in the existing coastal concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3): 454-458, 464. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2014.03.015

南水北调与水利科技 (中英文)

南水北调与水利科技 (中英文)