

基于氯离子渗透机制的超高性能混凝土 生命周期预测

马新伟¹, 薛欢¹, 祁锦明², 刘光旺²

(1. 哈尔滨工业大学(威海)土木工程系, 山东威海 264209; 2. 鞍山远达电网工程有限公司, 辽宁鞍山 114016)

摘要 目的 以现有的混凝土生命周期预测理论为基础, 根据试验研究结果, 对特定结构超高性能混凝土构件的生命周期进行预测. 方法 对超高性能混凝土试件进行氯离子渗透试验, 测得不同深度处氯离子质量分数, 并建立氯离子质量分数与深度的函数关系, 以理论公式计算超高性能混凝土的氯离子扩散系数, 代入计算模型计算超高性能混凝土构件的使用寿命. 结果 在钢筋保护层较小情况下, 即使在海水入侵环境或除冰盐环境中, 超高性能混凝土制品的使用寿命均可以达到 50a 以上, 具备工程利用价值. 结论 氯离子渗透机制可以作为混凝土结构生命周期预测的有效手段.

关键词 超高性能混凝土; 氯离子渗透; 生命周期; 氯离子浓度; 预测

中图分类号 TU528.57 文献标志码 A

Service Life Prediction of Ultra-high Performance Concrete Based on Chloride Ion Permeation Mechanism

MA Xinwei¹, XUE Huan¹, QI Jinming², LIU Guangwang²

(1. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, China, 264209; 2. Anshan Yuanda Power Grid Engineering Co., Ltd, Anshan, China, 114016)

Abstract: Based on the existing concrete life cycle prediction theory, the life cycle prediction of ultra-high performance concrete members with special structure is carried out according to the experimental results. The chloride penetration test of ultra-high performance concrete (UHPC) specimens was carried out, in which the chloride ion concentrations at different depth were measured. Functions between the chloride ion concentration and depth are established. Chloride ion diffusion coefficient of ultra-high performance concrete is calculated theoretically, and the service life of ultra-high performance concrete could be calculated. The results show that, even if the reinforced protection layer is smaller, in the environment of seawater intrusion or deicing salt environment, ultra high performance concrete product service life could be more than 50 years, which means that the UHPC has the value of engineering utilization. Chloride ion permeation mechanism could be used as an effective means of life cycle prediction of UHPC.

收稿日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51378158); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2016EEM24)

作者简介: 马新伟(1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事无机非金属材料等方面研究.

Key words: ultra-high performance concrete; chloride ion permeation; service life prediction; chloride ion concentration; prediction

为了改善传统混凝土结构的耐久性,尤其是提高混凝土在高寒、高盐地区的使用寿命,以活性粉末混凝土为代表的新型超高性能混凝土得到了普遍重视.超高性能混凝土(UHPC)是一种粗骨料细化、加入高性能外加剂、以硅灰和其他超细矿物作为掺合料的新型水泥基复合材料,具有优异的力学性能和耐久性能,以短节纤维作为增强和增韧材料,使其又具备其他混凝土不具备的良好韧性.UHPC材料在国内外均有工程应用,并处于推广阶段^[1-2].

对于普通混凝土、高强混凝土、高性能混凝土等的生命周期预测,有关学者进行了比较深入的研究^[3-5],但是就UHPC材料生命周期的研究仍处于初级阶段^[6].伴随着UHPC材料的不断推广,工程上迫切需要一套较为简单有效的方法,去预测UHPC材料的生命周期,指导工程实际.笔者以现阶段比较成熟的模型为基础,归纳出可以用于UHPC材料生命周期预测的理论和方法,并对UHPC进行一系列的氯离子渗透性能试验.根据试验结果,理论分析氯离子在UHPC中的扩散规律.预期可以根据试验结果,对特定构造的UHPC产品在特定使用环境中的使用寿命进行预测,为新型的UHPC混凝土构件在工程中的使用提供理论依据.

1 混凝土生命周期预测理论

利用耐久性各项指标来表征混凝土材料寿命是现阶段进行生命周期预测的主要手段,而且大量的工程实际也证明是有效的.《混凝土耐久性检验评定标准》(JGJ/T193—2009)中,对混凝土耐久性的评定指标,主要包括抗渗、抗冻、抗氯离子渗透、抗碳化等方面.对于混凝土构件的寿命预测,一般考虑氯离子侵蚀和冻融破坏这两种机制.其中氯

离子的渗透导致钢筋锈蚀是混凝土结构破坏的重要因素.笔者主要以钢筋表面氯离子达到临界浓度作为混凝土的失效机制,对UHPC生命周期进行预测.虽然目前还没有专门用于UHPC生命周期预测的数学模型,但从机理上与普通混凝土是相一致的.

1.1 钢筋锈蚀历程

氯离子对钢筋的锈蚀作用是影响钢筋混凝土结构耐久性的重要因素.经过长期的科学研究和工程实践,按照钢筋腐蚀开始发生与否,将钢混构件的寿命分为两个阶段:混凝土浇筑成型到氯离子从表面扩散到钢筋表面阶段;氯离子作用下钢筋发生腐蚀阶段.腐蚀阶段根据混凝土胀裂现象,分成腐蚀发展阶段和腐蚀破坏阶段,最后加上无法满足承载要求的结构失效阶段.图1为经典的氯离子腐蚀作用下钢混结构的生命周期图.

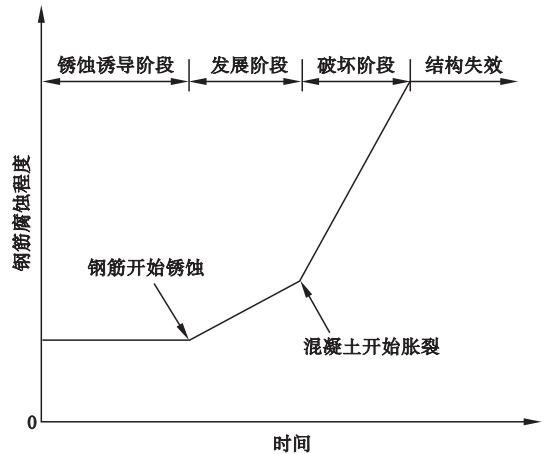


图1 混凝土因钢筋锈蚀而发生破坏的历程

Fig. 1 Damage process of concrete due to corrosion of steel bar

锈蚀诱导阶段时间越长,混凝土的使用寿命也就越长.因此可以采用增加保护层厚度、提高混凝土致密性、合理的防护等方式,延缓氯离子进入混凝土内部的历程,有效避免构件的腐蚀破坏.尽管在钢筋锈蚀发展阶

段结构是不发生破坏的,但研究中通常保守地以锈蚀诱导阶段作为混凝土结构的寿命,而不包含发展阶段^[7]。经过长期的实践研究,人们发现利用 Fick 第二定律进行预测与工程实践相符合,因此一直以 Fick 第二定律作为混凝土材料生命周期预测的依据。

1.2 基于抗氯离子渗透理论预测 UHPC 生命周期

Fick 第二定律是 Fick 早在 19 世纪就已经提出来,用于计算某一深处的扩散介质浓度和时间的关系,数学表达如下:

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

式中: C 为扩散物质的体积质量, kg/m^3 ; D 为扩散系数, m^2/s ; t 为扩散时间, s ; x 为扩散距离, m , 在钢筋混凝土中即保护层厚度。

利用 Fick 第二定律,在合理的假设条件下,可以获得相对比较精确的氯离子在混凝土中的扩散特征,进而推算出开始发生腐蚀的时间,即可获得需要的寿命周期。

1.3 预测模型

根据 Fick 第二定律,可以获得氯离子在混凝土中的扩散方程^[8]

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_0) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right). \quad (2)$$

式中: C_s 为表面氯离子浓度; C_0 为初始氯离子浓度; erf 为高斯误差函数,即:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du. \quad (3)$$

对式(2)进行数学变形,可以获得计算氯离子达到一定浓度所需要的扩散时间,即:

$$t = \frac{x^2}{4D \left[\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C}{C_s}\right) \right]^2}. \quad (4)$$

很明显,只要确定了引起钢筋锈蚀的临界氯离子浓度、扩散系数、混凝土内部初始浓度和混凝土表面的氯离子浓度,就可以计算出达到临界浓度所需要的时间,即工程上所关注的寿命。

1.4 氯离子扩散系数的确定

由式(4)可知,想要计算出氯离子达到临界浓度所经历的时间,就必须获得一个十分重要的参数—氯离子扩散系数。一般需要通过实验进行氯离子扩散系数的测定。实验室评定混凝土抗氯离子渗透性的方法,一般采用氯离子扩散系数快速测定法(RCM)法进行。该方法利用测试经过加压一段时间后的氯离子的渗透深度及表层氯离子的分布规律,进而计算出试件的氯离子扩散系数,推算出材料的氯离子扩散系数。很明显,此法周期较长,受到的人为因素也较大^[9],并不适合工程上的大规模应用。另一种是 ASTM C1202 中提出的电通量法^[10],也已经得到包括我国在内的多国规范的认可。电通量法操作十分简易,是直接评定混凝土抗氯离子渗透性能的有效方法,已经逐渐在世界各国的工程实践中得到应用。但是利用电通量法相对于 RCM 方法,无法直接获得氯离子的扩散系数,更无法利用 Fick 定律进行寿命周期的预测。因此,需要借助一定的手段,利用相对比较简单易行的电通量法,来获得计算 UHPC 生命周期所必需的氯离子扩散系数。

进一步分析,既然二者都可以评价混凝土的抗氯离子渗透性,那么它们之间应当是具备相对应的关系。为此,一些学者进行了研究,并利用自己的实验结果拟合了一些曲线,也具备一定的工程利用价值^[9-10]。另外,北京工业大学的谭志催等^[11]将国内众多学者的试验数据进行了整理,拟合出电通量和氯离子扩散系数的关系:

$$\begin{aligned} D &= 9.3627e^{-4Q} + 0.13642, \\ R &= 0.91939. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: D 为扩散系数, cm^2/a ; Q 为电通量, C 。

式(5)是对大量的实验数据进行整合的结果,以此为基础,将电通量指标转换为氯离子扩散系数,从而实现对混凝土生命周期的预测是可行、有效的。

2 超高性能混凝土渗透性试验

为了更为直观、精确地对氯离子渗透情况进行研究,可以利用能谱分析、化学分析的方法研究氯离子在 UHPC 材料中的渗透规律.通过试验计算得到 UHPC 生命周期预测所必要的相关参数.

2.1 原材料

UHPC 制备的基本方案是在 UHPC 材料中掺入了具有较高活性的火山灰质材料,骨料因去除了粗骨料而得以细化,代之以粒径较小的石英砂(粒径小于 1.0 mm),加入短切钢纤维以改善其韧性^[12].

试验所用水泥为北京琉璃河 P II 42.5 硅酸盐水泥,28 d 抗压强度 51.5 MPa,其他性能满足标准要求;硅灰由甘肃三远硅材料有限公司生产, SiO₂ 质量分数不低于

96%,比表面积 9 600 m²/kg;石英砂产自河北灵寿县,分为三个粒度等级,分别是 1 ~ 0.71 mm、0.59 ~ 0.35 mm、0.297 mm ~ 0.15 mm;矿渣粉是由北京盛世首佳新型建材有限公司提供的 S95 级矿渣粉,45 μm 筛余量不大于 20%;钢纤维由四川资阳众达公司提供,平均长度 13 mm,长径比为 60 ~ 70,抗拉强度 2 885 MPa;高效减水剂为聚羧酸型高性能减水剂.

2.2 配合比

经过前期大量的配合比试验,并以抗压强度、抗渗性等指标进行验证,发现当水胶比为 0.16 ~ 0.20 时,所得到的 UHPC 材料性能最佳,最终选定 6 组试件进行抗氯离子渗透性能的试验,试件参数见表 1.其中试件 A1、A4 水胶比为 0.17, A2、A5 水胶比为 0.16, A3、A6 水胶比为 0.20.

表 1 UHPC 配合比设计

Table 1 Proportional design of UHPC

kg · m⁻³

编号	ρ(水泥)	ρ(硅灰)	ρ(矿渣粉)	ρ(水)	ρ(砂)	ρ(钢纤维)	ρ(外加剂)
A1	676	169	203	173	1180	125	18.9
A2	663	158	231	171	1 227	125	14.7
A3	713	231	251	238	1 017	125	16.7
A4	676	169	203	173	1 180	0	18.9
A5	663	158	231	171	1 227	0	14.7
A6	713	231	251	238	1 017	0	16.7

2.3 试验方法

为了对 UHPC 材料进行更为全面的分析,获得较为全面的抗氯离子渗透性能,试验采用了两种方法对试件进行了氯离子渗透试验.第一种是较为直观、先进的能谱分析方法,第二种则是较为传统的化学分析方法.能谱分析采用扫描电子显微镜(SEM)观察和 X 射线能谱分析(XPS),在电子显微镜上实现与微区形貌相对应的微区分析,是研究材料组织结构和元素分布状态的极为有用的分析方法.在电镜下通过能谱分析,测定试件内沿渗透方向各元素比例情况.以氯离子渗

透深度为横坐标,一定深度下的氯离子质量分数为纵坐标,研究渗透深度和氯离子质量分数的关系,建立曲线.不但可以较为直观分析出氯离子的扩散情况,同时也可以定量地计算出氯离子的渗透系数,为进行 UHPC 材料的生命周期预测提供了一个新思路.

为了较为精确地得到不同深处的氯离子质量分数,对试件进行以下处理:用切割机沿着渗透方向切片,表面经过打磨,消除切割时因洒水对切口周围所造成的影响.在电镜下通过能谱分析,测定试件内沿海水渗透方向各元素质量分数情况.每一深度内取不少

于3个点进行分析,取其平均值作为这一深度内的氯离子质量分数,每隔0.5 mm分析一次,直到氯离子质量分数可以忽略为止,测点分布图如图2所示。

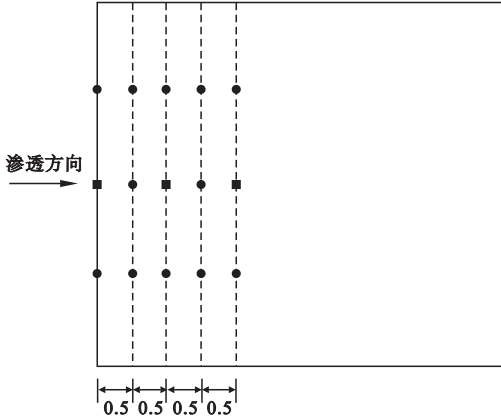


图2 氯离子测点分布示意图

Fig. 2 Diagram of chloride ion measurement point distribution

除了利用能谱分析的方法进行研究外,

试验也采用了传统的化学分析方法对不同渗透深度的氯离子质量分数进行了测量,与之前能谱分析所得结果进行对比。

用切割机将试块切成小块,把试件沿着渗透方向进行分层磨成粉末,以1 mm作为一层,将20 g粉末与200 mL蒸馏水混合制成溶液,放置24 h.用氯离子快速测定仪测定溶液中氯离子质量分数,计算每1 mm深度粉末中氯离子质量分数,作为每1 mm深度处的氯离子质量分数平均值.沿着渗透方向进行,直至所测氯离子质量分数可不计为止。

2.4 试验结论及分析

利用能谱分析方法对试件的逐一分析,获得氯离子质量分数与渗透深度关系见表2,其中 h 表示氯离子扩散深度.为了更为直观地表示出氯离子的扩散情况,将所得试验数据进行整理,获得各组的氯离子渗透情况(见图3)。

表2 各试件不同渗透深度处的氯离子质量分数

Table 2 Chloride content at different penetration depth of specimens

试件编号	氯离子质量分数/%							
	$h=0$ mm	$h=1$ mm	$h=2$ mm	$h=3$ mm	$h=4$ mm	$h=5$ mm	$h=6$ mm	$h=7$ mm
A1	0.65	0.48	0.21	0.17	0.05	0.00	0	0
A2	0.78	0.51	0.27	0.14	0.06	0.05	0	0
A3	0.55	0.36	0.24	0.13	0.06	0.05	0	0
A4	0.48	0.25	0.21	0.18	0.17	0.16	0.11	0.08
A5	0.49	0.18	0.11	0.05	0.02	0.01	0.00	0
A6	0.45	0.24	0.18	0.13	0.06	0.04	0.03	0

利用能谱分析法和化学分析法对氯离子渗透在UHPC材料中的渗透情况进行研究,可以了解氯离子在UHPC材料中的渗透轨迹、规律,定量地对氯离子渗透性能进行研究.氯离子扩散系数作为进行混凝土寿命预测的重要指标,对于特定材料来说是一定值.因而,根据某一深度处的氯离子质量分数,代入式(6)即可获得氯离子扩散系数:

$$D = \frac{x^2}{4t[\operatorname{erf}^{-1}(1 - \frac{C}{C_s})]^2} \quad (6)$$

以A1组试件为例,试件端部氯离子质量分数为0.65%,1 mm处氯离子质量分数为0.48%,在压力下浸泡时间28 d,代入式(2),则A1组试件的氯离子扩散系数为0.051 09 cm²/a,对于其他组试件的氯离子扩散系数计算与A1相同,结果见表3。

由于化学法测得的是一个深度区间内的平均值,有一定误差,所得到的渗透系数与同配比试件相比偏小,因此对渗透系数的取值以能谱分析法得到的结果为准。

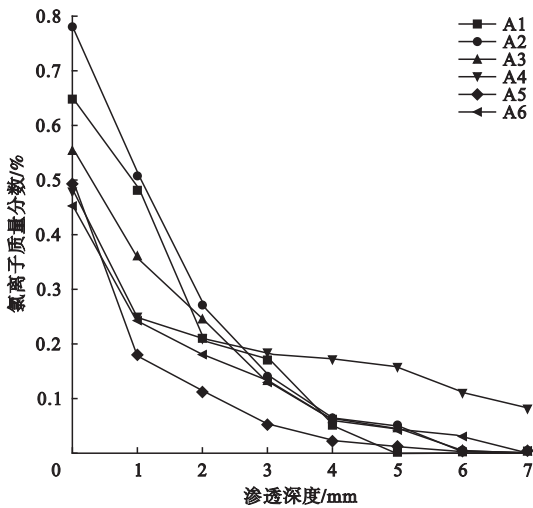


图3 各试件内部氯离子质量分数与渗透深度的关系

Fig. 3 The relationships between chloride content and penetration depth in each specimen

表3 能谱分析法中UHPC各组试件氯离子扩散系数

Table 3 Chloride diffusion coefficient of UHPC specimens obtained by energy spectrum method

试件编号	氯离子扩散系数/($\text{cm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)
A1	0.051 09
A2	0.072 85
A3	0.074 11
A4	0.130 24
A5	0.218 86
A6	0.125 20

3 UHPC 薄壁构件生命周期预测

3.1 工程概况

对于新型的UHPC薄壁电杆,混凝土强度不低于C100,壁厚仅相当于普通混凝土1/3~1/2.相应的电杆钢筋保护层厚度也较小,最薄处仅有5 mm,一般部位为7~10 mm,最厚处也仅有17 mm.

3.2 临界氯离子质量分数

考虑到电杆地上部分仅吸附空气中的氯离子,在远离海洋环境时几乎不会受到氯离子的渗透作用影响;对于埋入土层的部分,当土壤中的氯离子质量分数高于混凝土内部初

始的氯离子质量分数时,氯离子在质量分数梯度的驱动下向混凝土内部迁移.对于引起钢筋锈蚀的临界氯离子质量分数问题研究尚无统一的认识且相差较大,且与混凝土的碱度有关.一般认为临界质量分数在0.07%~0.18%(占混凝土质量)^[4],碱度越大,临界值越高.引起钢筋锈蚀的氯离子临界质量分数取0.12%~0.14%是比较客观的^[13-14],保守取值为0.12%.

3.3 氯离子扩散系数

混凝土保护层偏于保守的计算厚度取10 mm,能够引起钢筋锈蚀的临界氯离子质量分数取值是预测的关键.有研究表明对于UHPC,试验测得的电通量在50~70 C,根据电通量与扩散系数间的关系,当电通量取较大值70 C时,求得扩散系数为0.136 42 cm^2/a .并与利用能谱分析法、化学分析法计算所得扩散系数进行比较,发现取值相对较为保守,具备工程利用价值.

3.4 生命周期预测

将所得扩散系数和之前确定氯离子临界质量分数,在给定的外界氯离子质量分数的条件下,代入式(4),即可计算寿命周期.保护层厚度为10 mm、电能为70 C的UHPC电杆的寿命随表面氯离子质量分数变化见图4.保护层厚度为其他数值时,形状与图4相同,但具体数值有差异.

从图中可以看出,当氯离子质量分数小于氯离子临界质量分数(0.12%)时,由于UHPC材料的高密实性,寿命漫长;当环境中氯离子质量分数超过临界氯离子质量分数时,寿命衰减十分迅速,但是考虑到电杆的使用环境氯离子质量分数一般不足0.1%,特殊情况下也不会高于0.15%.因此,即使在极不利的情况下,从氯离子渗透理论出发所计算的结构的使用寿命均在50 a以上.

依据上述计算理论,当保护层厚度 d 分别为5 mm、10 mm、17 mm时,按照该理论进行计算的电杆使用寿命如表4所示.

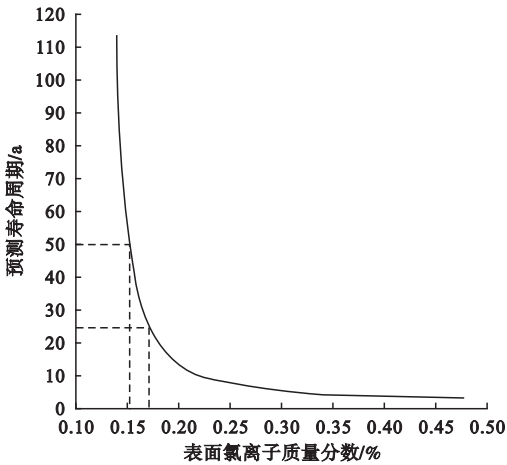


图4 UHPC电杆预测寿命随表面氯离子质量分数变化图

Fig. 4 The predicted life of the pole along with the change of chloride ion concentration on the surface

表4 不同保护层厚度在不同条件下的使用寿命
Table 4 Service life of different protective layer thickness under different conditions

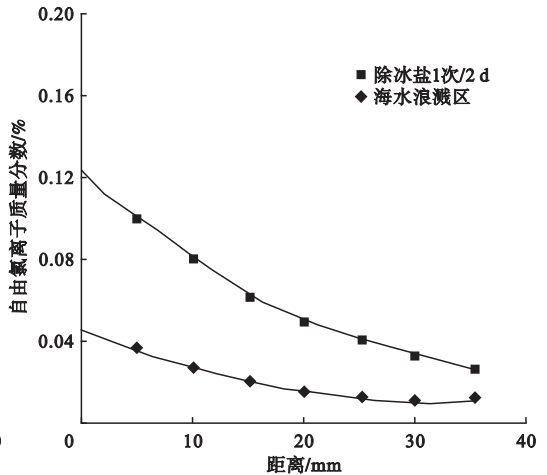
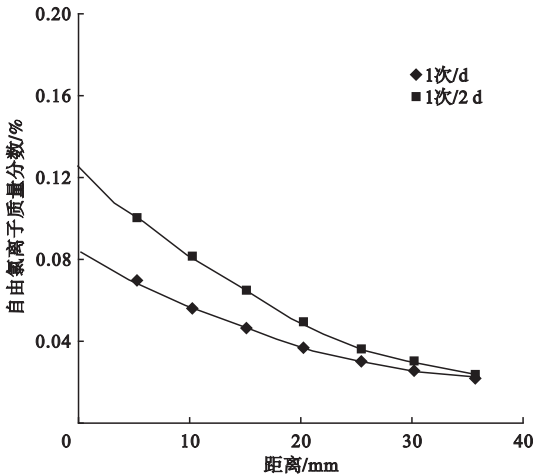
氯离子质量分数/%	使用寿命/a		
	d = 5 mm	d = 10 mm	d = 17 mm
0.130	96.2	384.6	1111.5
0.135	47.2	188.7	545.3
0.140	28.4	113.6	328.4
0.145	19.4	77.5	224.0
0.150	14.3	57.1	165.1
0.155	11.1	44.4	128.4
0.160	9.0	36.1	104.3

从表中计算结果来看,保护层厚度最小取值 5 mm 时,混凝土表面氯离子质量分数不大于 0.13% 时,使用寿命仍然接近百年。

据调研,我国近海地区未受海水影响的普通山地及农田,浅层地下水氯离子质量浓度平均值为 120 mg/L, (约 0.012%) 以下. 我国山东莱州湾沿海地区将地下水氯离子质量浓度 200 mg/L (约为 0.02%) 作为受海水入侵的标志;而辽宁葫芦岛地区,把地下水氯离子质量浓度 250 mg/L (约为 0.025%) 作为受海水入侵的临界值. 大连地区,受海水入侵地区的浅地下水氯离子质量浓度约在 400 mg/L ~ 1 400 mg/L^[15],最大质量分数达到了 0.14%. 即使所处环境水中的氯离子质量分数达到了 0.14%,表层混凝土中的氯离子质量分数(以混凝土质量计)也远小于这一数值。

结合表 4 发现在近海地区这种恶劣条件当中,混凝土保护层的厚度在接近地表或是地表以下,其保护层厚度都是大于 10 mm,即说明此环境下的 UHPC 电杆的使用寿命可长达百年,具备推广的价值。

在使用除冰盐的环境中,氯离子腐蚀情况比海水环境更为强烈. 根据文献[16],以 C80 高性能混凝土作为试验对象,受除冰盐水作用,一天或两天进行一次干湿循环,经历 100 d 后混凝土表层氯离子质量分数如图 5 所示。



(a) 不同干湿循环制度 (b) 干湿循环与海水浪溅区对比

图5 经除冰盐作用下 100 d 后混凝土浅层氯离子质量分数

Fig. 5 Chloride ion concentration in shallow layer of concrete after 100 days of deicing salt

由图5可知,经过100 d的除冰盐干湿作用,表层混凝土的氯离子质量分数约为0.12%,根据研究结果,并结合文献[17-19]可知,UHPC材料抗渗透性能是优于试验中所用到的C80高性能混凝土,这证明表层氯离子质量分数无疑在0.12%以内。由于UHPC材料空隙小、密实性大的特点^[20-21],当表层氯离子质量分数在0.12%以下,甚至可以不考虑氯离子渗透对于UHPC材料的影响,即当保护层仅仅只有5 mm之时,其寿命都完全可以达到百年以上,完全具备在此地区进行推广的能力和值。

4 结 论

(1)UHPC除了拥有极高的强度之外,且耐久性能优异,在抗渗性和抗冻性方面,其量化指标比普通混凝土存在数量级的差别。

(2)利用电通量和氯离子扩散系数之间的关系,借助比较简单易行的电通量试验来进行UHPC生命周期预测。

(3)在受海水入侵地区,浅层土壤中对UHPC电杆的使用仍然是安全的,氯离子浓度仍处于较低水平。寒冷地区除冰盐环境对混凝土极为不利,属于极端恶劣的使用环境。根据已有研究结果,受除冰盐影响的环境氯离子质量分数仍处于可控的水平,混凝土表面氯离子质量分数在临界质量分数(0.12%)以内。

(4)利用抗氯离子渗透理论预测UHPC的生命周期,对于UHPC100,当混凝土保护层厚度仅有10 mm时,如果混凝土表面的氯离子质量分数小于0.15%,其寿命均可达到50 a以上;即使在保护层厚度仅有5 mm的情况下,在通常使用环境中(氯离子质量分数小于0.12%)使用寿命也可达百年以上,具备工程利用价值。但是氯离子质量分数超过临界氯离子质量分数时,寿命衰减迅速,在工程当中对于特殊环境需要特别处理。

参考文献

- [1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. *Cement & concrete research*, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [2] 吴中伟. 高性能混凝土:绿色混凝土[J]. *混凝土与水泥制品*, 2000(1): 3-6.
(WU Zhongwei. High performance concrete: green concrete[J]. *Concrete and cement products*, 2000(1): 3-6.)
- [3] 刘志勇, 马立国. 高强混凝土的抗冻性与寿命预测模型[J]. *工业建筑*, 2005(1): 11-14.
(LIU Zhiyong, MA Ligu. Durability and service life prediction model for freezing and thawing cycle of high strength concrete[J]. *Industrial construction*, 2005(1): 11-14.)
- [4] 施惠生, 王琼. 海工混凝土使用寿命预测研究[J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(2): 161-167.
(SHI Huisheng, WANG Qiong. Research on service life prediction of marine concrete. *Journal of building materials*, 2004, 7(2): 161-167.)
- [5] 余红发, 孙伟, 金祖权, 等. 土木工程结构混凝土寿命预测的损伤演化方程[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006(增刊2): 216-220.
(YU Hongfa, SUN Wei, JIN Zuquan, et al. Damage evolution equation for life prediction of concrete structures in key civil engineering[J]. *Journal of southeast university (natural science edition)*, 2006(S2): 216-220.)
- [6] 纪玉岩. 海洋环境下活性粉末混凝土耐久性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
(JI Yuyan. Durability research of reactive powder concrete in marine environment[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2011.)
- [7] 王立久. 混凝土抗冻耐久性预测数学模型[J]. *混凝土*, 2009(4): 1-4.
(WANG Lijiu. Predicting numerical model for the freeze proof durability of concrete[J]. *Concrete*, 2009(4): 1-4.)
- [8] TANG L, GULIKERS J. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete[J]. *Cement & concrete research*, 2007, 37(4): 589-595.
- [9] 冯仲伟, 谢永江, 朱长华, 等. 混凝土电通量和氯离子扩散系数的若干问题研究[J]. *混凝土*, 2007(10): 7-11.
(FENG Zhongwei, XIE Yongjiang, ZHU Changhua, et al. Research on the issues about rapid chloride permeability test results and chloride diffusion coefficient of concrete[J]. *Concrete*,

- 2007(10):7-11.)
- [10] ASTM C. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration [J]. Astm, 1997(25):105-112.
- [11] 谭志催,李悦. 混凝土电通量与氯离子扩散系数关系研究[J]. 商品混凝土,2008,3:12-14. (TAN Zhicui, LI Yue. Researching the relationship of concrete's electric flux and chloride diffusion coefficient [J]. Ready-mixed concrete,2008,3:12-14.)
- [12] 郑文忠,吕雪源. 活性粉末混凝土研究进展[J]. 建筑结构学报,2015(10):44-58. (ZHENG Wenzhong, Lü Xueyuan. Literature review of reactive powder concrete[J]. Journal of building structures,2015(10):44-58.)
- [13] 冷发光,冯乃谦. 高性能混凝土渗透性和耐久性评价方法研究[J]. 低温建筑技术,2000(4):14-16. (LENG Faguang, FENG Naiqian. Prediction method research on permeability and durability of high performance concrete[J]. Low temperature architecture technology, 2000(4):14-16.)
- [14] 王月,安明喆,余自若,等. 冻融循环作用下活性粉末混凝土中的氯离子分布及扩散系数[J]. 建筑材料学报,2016,19(5):810-815. (WANG Yue, AN Mingzhe, YU Ziruo, et al. Chloride ion distribution and diffusion coefficient of reactive powder concrete under freeze-thaw cycling[J]. Journal of building materials, 2016,19(5):810-815.)
- [15] 周洪杰. 海水入侵对大连市牧城驿地区农田土壤生态的影响[J]. 国土与自然资源研究,2006(4):34-35. (ZHOU Hongjie. The influence of sea water invade to farmland soil ecosystem in muchengyi Dalian[J]. Territory & natural resources study,2006(4):34-35.)
- [16] 陈浩宇,余红发,刘连新,等. 混凝土在海洋环境和除冰盐条件下的氯离子扩散行为[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2005(3):48-52. (CHEN Haoyu, YU Hongfa, LIU Lianxin, et al. Chloride diffusion of concretes exposed to marine environment and deicing salt[J]. Journal of huazhong university of science and technology (city science edition), 2005(3):48-52.)
- [17] THOMAS M, BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag [J]. Cement & concrete research, 1999,29(4):487-495.
- [18] 叶青,朱劲松,马成畅,等. 活性粉末混凝土的耐久性研究[J]. 新型建筑材料,2006(6):33-36. (YE Qing, ZHU Jingsong, MA Chengchang, et al. Study on durability of reactive powder concrete [J]. New building materials, 2006(6):33-36.)
- [19] 金凌志,何培,陈宜虎. 不同活性掺合料RPC抗氯离子渗透性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2014(6):21-27. (JIN Lingzhi, HE Pei, CHEN Yihu. Study on the resistance to chloride ion penetration performance of reactive powder concrete with different active admixture [J]. China concrete and cement products,2014(6):21-27.)
- [20] JENNINGS H M. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste [J]. Cement and concrete research, 2000,30(1):101-116.
- [21] 余自若,高康,安明喆,等. 活性粉末混凝土微观结构及其对强度与抗氯离子渗透性能的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2013,45(1):31-37. (YU Ziruo, GAO Kang, AN Mingzhe, et al. Influence of micro-structure on the strength and resistance to chloride ion permeability of reactive powder concrete [J]. Journal of Xi'an university of architecture & technology (natural science edition), 2013,45(1):31-37.)