



Life-365 在海港混凝土耐久性设计中的应用

仲维亮, 芦志强, 苏永生

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 以达曼港集装箱码头水工混凝土结构设计寿命计算为例, 介绍了 Life-365 计算软件的功能及主要理论依据, 结合达曼港当地的自然条件, 确定软件中采用的主要计算参数。计算结果表明, 基于本模型预测的设计寿命满足了 50 a 的使用要求, 为高氯盐环境下的混凝土结构使用寿命计算提供了参考。

关键词: 达曼港; 水工结构; 使用寿命; Life-365

中图分类号: O 653; TP 72

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0064-05

Application of Life-365 in concrete durability calculation of marine structure

ZHONG Wei-liang, LU Zhi-qiang, SU Yong-sheng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Taking the concrete durability calculation of Dammam SGP container terminal for example, we introduce the durability calculating software Life-365, including the main function and theory basis. Based on the environment conditions of Dammam port, we determine the main parameters and get the results, which prove that the design life predicted by Life-365 can meet the 50 years' requirement. It may serve as reference for the service-life calculation of concrete structures under high-chloride aggressive environment.

Key words: Dammam port; marine structure; service life; Life-365

波斯湾地区是世界上对混凝土结构腐蚀较为严重的地区之一。高温、高盐、温差大等因素共同作用导致此地区的混凝土结构腐蚀速率较高, 由此造成混凝土结构耐久性减少所带来的经济损失也较为巨大。因此, 混凝土结构的耐久性设计十分重要。

达曼 SGP 集装箱码头位于沙特阿拉伯半岛的东部, 波斯湾的西海岸。本项目一期工程包括 600 m 码头及后方陆域形成及地基处理等工作, 其中水工结构为重力式空心方块结构。由于沙特本国并没有水工结构物耐久性相关的规范, 同时本项目采用的英国标准也没有针对波斯湾的特殊条款, 因此针对水工混凝土结构使用年限做了专门的分析计算, 以满足 50 a 使用寿命的要求。

1 自然条件

波斯湾之所以被认为是世界上对混凝土结构腐

蚀最严重的地区之一, 主要是由于以下 3 方面的因素: 1) 高浓度的氯盐含量对混凝土及钢筋的腐蚀作用。2) 夏季的极端高温天气加速了混凝土的腐蚀及风化速率。3) 日温差及湿度变化较大, 混凝土内部容易产生连续的微裂缝, 影响了设计使用寿命。

1.1 氯盐含量

由于高温、干燥的气候增强了海面蒸发能力, 年蒸发量在 2 000 mm 以上, 大大超过了年降水量 (300 mm) 及河流注入量的总和, 因而海水盐度较高, 盐度分布见图 1。根据比较, 波斯湾的氯盐浓度可以达到 1.6~2 倍的地中海或者大西洋的氯盐浓度 (表 1)。

表 1 氯盐含量对比

地区	地中海	大西洋	全球海水平均值	波斯湾 (达曼地区)
氯盐含量/ppm	21 380	17 840	19 800	33 660

收稿日期: 2013-08-23

作者简介: 仲维亮 (1982—), 男, 工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

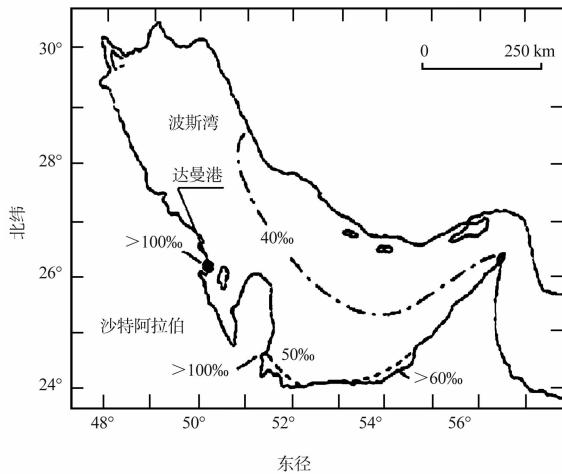


图1 波斯湾盐度分布

1.2 温度及湿度

达曼地区的夏季空气温度最高可达到45~50℃, 此时混凝土的表面温度由于太阳的暴晒可以达到75℃(无风情况)。夏季日气温的温差最大值可达到25~35℃。月气温变化见图2, 月湿度变化见图3。

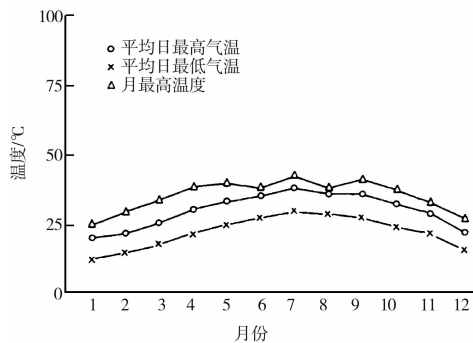


图2 达曼地区月平均气温变化曲线

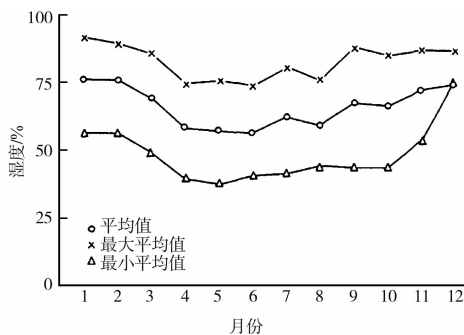


图3 达曼地区月平均湿度变化曲线

2 计算软件及主要理论依据

本工程水工结构采用了 Life-365-version2.1 软件预测设计使用寿命。Life-365 模型分析可以分为

下面4个连续的过程^[1]:

- 1) 预测氯离子进入混凝土, 在钢筋表面达到临界值, 钢筋开始腐蚀所需的时间 t_i 。
- 2) 预测腐蚀发展到结构需要维修的时间 t_p (第一次修复时间 $t_r = t_i + t_p$)。
- 3) 确定修复计划和修复方法。
- 4) 基于最初成本及修复成本的全寿命经济分析。

Life-365 模型利用 Fick 第二定律来描述氯离子在混凝土中的扩散过程。其表达式为:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (1)$$

式中: C 为氯离子含量; D 为氯离子扩散系数; x 为距暴露面的距离; t 为时间。

氯离子的扩散系数是时间及温度的函数。Life-365 模型采用式(2)来计算扩散系数随时间的变化关系:

$$D(t) = D_{\text{ref}} \left[\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right]^m \quad (2)$$

式中: $D(t)$ 为在时刻 t 的扩散系数; D_{ref} 为在时刻 t_{ref} 的扩散系数 (Life-365 中为第 28 d); m 为扩散系数衰减指数 (常数)。

Life-365 采用式(3)来计算温度变化对扩散系数的影响:

$$D(T) = D_{\text{ref}} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $D(T)$ 为在 t 时刻及温度为 T 时的扩散系数; D_{ref} 为在 t_{ref} 时刻及温度为 T_{ref} 时的扩散系数; U 为扩散作用发生的激活能 (35 kJ/mol); R 为气体常数; T 为绝对温度。

模型中, $t_{\text{ref}} = 28 \text{ d}$, $T_{\text{ref}} = 293 \text{ K}$ (20℃)。通过式(1)采用有限差分法来计算钢筋开始发生腐蚀所需的初始时间 t_i 。在每一个时间步中采用式(2)和(3)来计算相应的氯离子扩散系数。

3 Life-365 计算参数选取

3.1 表面氯离子浓度聚集时间

Life-365 模型中可以考虑氯离子浓度聚集的速

率,根据不同的暴露环境表面氯离子聚集时间会有所区别。模型包含如下几种暴露环境^[1]: 1) 港工浪溅区(潮位变动区或位于高潮位上下1 m范围之内)。2) 港工盐雾区(高潮位1 m范围之上同时经常暴露在海水飞沫作用的范围)。3) 距离海岸800 m范围之内。4) 距离海岸1 500 m范围之内。5) 车库。6) 农村公路桥梁。7) 城市公路桥梁。

对于港口水工结构模型假定的氯离子聚集速率见表2。

表2 氯离子聚集速率及最大表面氯离子浓度

环境	表面氯离子聚集速率/(%·a ⁻¹)	最大表面氯离子浓度/%
港工浪溅区	即时	0.8
港工盐雾区	0.10	1.0
距海岸800 m范围之内	0.04	0.6
距海岸1 500 m范围之内	0.02	0.6

本文以浪溅区为例,表面氯离子浓度即时达到最大。根据咨工 AECOM 提供的资料,浪溅区最大表面氯离子浓度为0.8%。混凝土表面氯离子浓度聚集到最大值的时间为即时达到最大。

3.2 主要配合比参数

考虑当地的自然条件,本工程采用高性能混凝土,强度等级 C50 胶凝材料中的矿物掺合料为粉煤灰及硅灰,配合比主要参数见表3。

表3 配合比参数

物料	水泥	粉煤灰	硅灰	砂	石	水	水胶比
配合比/(kg·m ⁻³)	373.5	45	31.5	577	1172	161	0.358

3.3 混凝土保护层厚度

英国 BS 规范及欧洲 EN 规范中推荐的混凝土保护层厚度主要是针对欧洲当地的气候及环境条件所做的规定,并不能考虑到波斯湾地区的特殊情况。根据《阿拉伯半岛混凝土结构设计指南》表3中对应的腐蚀等级,C50 混凝土的保护层厚度推荐值为 $65 \text{ mm} + \Delta c = 80 \text{ mm}$ ^[2];根据我国交通行业规范 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》,浪溅区受力钢筋最小保护层厚度为

65 mm^[3];结合当地的工程经验,本工程混凝土最小保护层厚度取值为90 mm。

3.4 氯离子扩散系数 D

Life-365 中的 D_{28} 可根据式(4)计算:

$$D_{28} = 1 \times 10^{-12.06 + \frac{2.4w}{cm}} \quad (4)$$

式中: w/cm 为水胶比

掺入硅灰的混凝土密实性能会显著提高,从而改善混凝土抗渗性能及降低氯离子扩散速率^[4]。硅灰对混凝土抗渗性能的影响可通过式(5)计算。

$$D_{SF} = D_{pc} e^{-0.165SF} \quad (5)$$

式中: D_{pc} 为波特兰水泥氯离子扩散系数; D_{SF} 为掺入硅灰之后的氯离子扩散系数; SF 为硅灰占胶凝材料的百分比。

根据式(4)和(5)可得: $w/cm = 0.358$, $D_{28} = 6.298 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $D_{SF} = 1.98 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

由于硅灰会增加混凝土水化热,故需要同时掺入一定量的粉煤灰,以减小出现温度裂缝的风险。粉煤灰对扩散系数衰减指数的影响可以通过式(6)计算:

$$m = 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA}{50} + \frac{SG}{70} \right) \quad (6)$$

式中: m 为扩散系数衰减指数; FA 为粉煤灰占胶凝材料的百分比; SG 为高炉矿渣粉占胶凝材料的百分比。根据式(6)可得 $m = 0.28$ 。

3.5 临界氯离子浓度

根据 Glass 等人的研究^[5],临界氯离子浓度基本分布在0.17%~2.5% (氯离子占胶凝材料百分比),与之对应的临界氯离子浓度为0.03%~0.07% (氯离子占混凝土质量百分比,水泥含量350~400 kg/m³)。Life-365 中临界氯离子浓度默认值为0.05%,本工程中取值为0.04% (占混凝土质量百分比)。

4 计算结果分析

Life-365 的预测结果主要以图表形式给出,包括预测混凝土结构的使用寿命、任意时刻氯离子浓度沿混凝土结构断面分布情况、保护层深度位

置氯离子浓度及随时间变化情况、氯离子扩散系数随时间变化情况等。软件也可以同时进行几个设计方案的比较计算, 本文仅选取实际应用方案进行分析, 主要计算结果见图 4~9。



图 4 预测耐久性年限 ($t_i + t_p$)

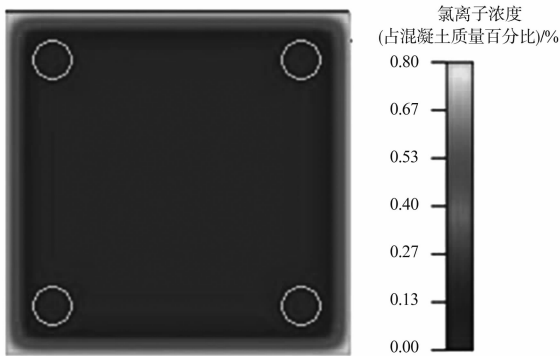


图 5 $t = 50$ a 的氯离子浓度侵入断面

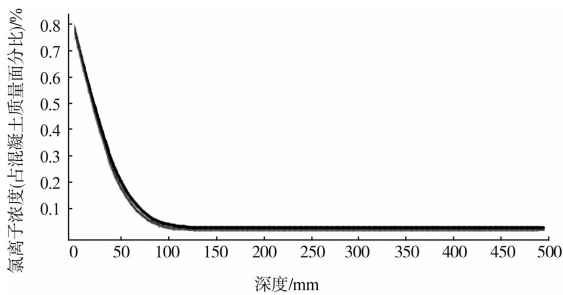


图 6 氯离子浓度随深度变化曲线

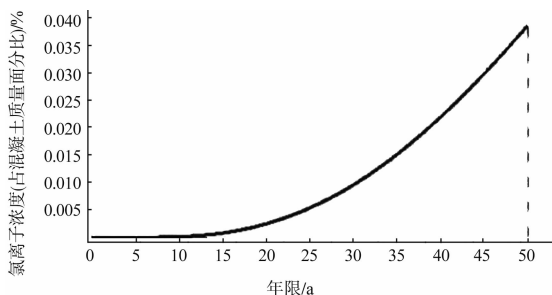


图 7 90 mm 位置氯离子浓度随时间变化曲线

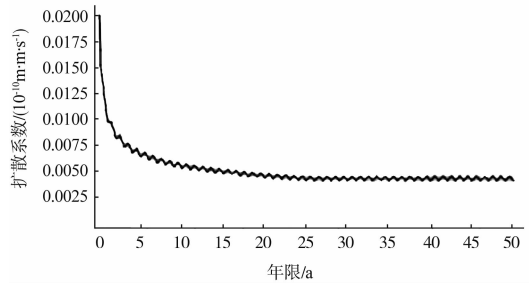


图 8 氯离子扩散系数随时间变化曲线

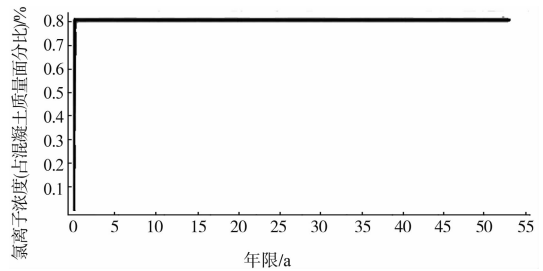


图 9 表面氯离子浓度随时间变化曲线

图 4 为最直观的也是最主要的计算结果, 由图 4 可见 $t_i \approx 50$ a, $t_p \approx 5$ a, $t = t_i + t_p \approx 55$ a 满足了业主要求 50 a 的使用要求。图 5~7 显示氯离子浓度随着深度逐渐减小, 在 120 mm 深度位置趋近于一定值, 混凝土结构 90 mm 深度位置氯离子浓度在 $t = 50$ a 时刻达到 0.04%, 即 $t = 50$ a 时钢筋表面氯离子浓度达到临界浓度, 钢筋将要开始发生锈蚀。从图 8 可知氯离子扩散系数随龄期的增加逐渐减小, 在 $t = 0 \sim 5$ a 时扩散系数迅速降低, $t = 5 \sim 20$ a 缓慢减小, $t = 20$ a 后趋于一定值。

5 结语

混凝土的耐久性向来是波斯湾地区港口工程设计师需要面临的挑战之一。由于过快的腐蚀速度, 每年波斯湾地区混凝土修复补强的费用十分高昂, 所以混凝土结构耐久性设计越来越受到重视^[6]。Life-365 主要是针对氯盐环境下的使用寿命计算软件, 十分适合该地区的港口工程结构使用寿命的计算分析。本文结合当地的自然环境, 确定了主要的计算参数, 结论得到业主咨工的认可。为水工混凝土耐久性设计提供了重要的设计参数。

同时, 影响港口工程结构使用年限的因素较为众多, 不仅仅是设计计算参数选取的问题, 也

包含施工质量控制及后期维护水平等诸多因素^[7]。在实际设计工作中, 需要结合计算软件及当地的规范、工程经验来综合考虑, 确保混凝土结构使用寿命满足要求。

参考文献:

[1] Life-365 Consortium II. Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides[M]. Washington DC: SFA, 2012.

[2] Concrete Society. Guide to the design of concrete structure in the Arabian Peninsula [R]. Bahrain: Society of Engineers, 2008.

[3] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].

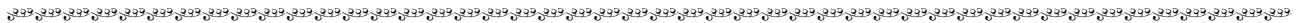
[4] Hootion R D, Bentz E, Kojundic T. Long-term chloride penetration resistance of silica fume concretes based on field exposure[C]. The Netherlands: 2nd International Symposium. Service Life Design for Infrastructure. 2010: 503-512.

[5] Glass G K, Buenfeld N R. On the current density required to protect steel in atmospherically exposed concrete structure[J]. Corrosion Science, 1995, 37(10):1 643-1 646.

[6] MohammadShekarchi, Farid Moradi. Concrete durability issues in the Persian Gulf [J]. CBM-CI International Workshop, 2012(10) : 357-370.

[7] JTS 257-2—2012 海港工程高性能混凝土质量控制标准[S].

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 51 页)

[2] 李顺, 余其俊, 韦江雄. 聚羧酸减水剂的分子结构对水泥水化过程的影响[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(4): 613-619.

[3] Kinoshita M, Yonezawa T, Yuki Y. Chemical structure and performance of a new type high range water reducing agent for ultra high strength concrete [J]. Semento, Konkurito Ronbunshu, 1993, 47: 196-201.

[4] Ohta A, Sugiyama T, Tamska Y. Fluidizing mechanism and application of polycarboxylate based superplasticizers[C]// Rome, Italy: 5th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, 1997: 359-378.

[5] Lim G G, Hong S S, kim D S, et al. Slump loss control of cement paste by adding polycarboxylic type slump-releasing dispersant[J]. Cem Concr Res, 1999, 29(2) : 223-229.

[6] Yamada K, Takahashi T, Hanehara S, et al. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(2) : 197-207.

[7] Liao T S, Hwang C L, Ye Y S, et al. Effects of a carboxylic acid/sulfonic acid copolymer on the material properties of cementitious materials[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(4) : 650-655.

[8] LI Chongzhi, FENG Naiqian, LI Yongde, et al. Effects of

polyethylene oxide chains on the performance of polycarboxylate-type water-reducers [J]. Cem Concr Res, 2005, 35(5) : 867-873.

[9] LI Shun, WEN Ziyun, WANG Hengchang. Synthesis of polycarboxylate-type superplasticizer and its effects on the performance of cement-based materials[J]. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(7) : 884-889.

[10] LI Shun, WEN Ziyun. Dispersibility and air entraining performance of polycarboxylate-type water reducers [J]. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(4) : 616-621.

[11] Plank J, Sachsenhauser B, Reese J D. Experimental determination of the thermodynamic parameters affecting the adsorption behaviour and dispersion effectiveness of PCE superplasticizers[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(5) : 699-709.

[12] 彭进平, 余倩, 关汉睢, 等. 两种异噻唑防腐抑菌效果的研究[J]. 广州化工. 2003, 31(1) : 34-36.

[13] 何国庆, 贾英民, 丁立孝. 食品微生物学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.

[14] 中国科学院微生物研究所细菌分类组. 一般细菌常用鉴定方法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

(本文编辑 郭雪珍)