



采用耐久性指数对码头混凝土结构 耐久性设计的评估

郑伟¹, 陈龙², 汤雁冰²

(1. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510231; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 海洋环境中, 因钢筋锈蚀导致混凝土结构耐久性下降的现象普遍存在。从码头结构设计、混凝土的材料和施工等方面对广西防城港旅游码头主体混凝土结构的耐久指数(T_p)进行分析计算, 并结合结构所处的腐蚀环境的环境指数(S_p)对混凝土结构的腐蚀风险进行评估, 结果表明: 必须从码头结构设计、混凝土的原材料、混凝土和施工等方面严格控制, 才可保证其50 a的耐久性设计使用年限。

关键词: 耐久性设计; 环境指数; 耐久指数

中图分类号: TU 377.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0083-06

Concrete durability index calculation method applied in durability evaluation of marine engineering

ZHENG Wei¹, CHEN Long², TANG Yan-bing²

(1. Engineering Design Institute Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510231, China;

2. Engineering Technology Research Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The corrosion risk of concrete structure of Guangxi Fangcheng tourist boat pier is investigated by comparing the environment index with the durability index. The durability index is analyzed from the design, concrete materials and construction. The results show that the concrete structure can satisfy 50 years' design life if the concrete materials, design and construction are controlled strictly.

Keywords: durability design; environment index; durability index

大量实体工程调查表明, 我国海洋工程结构未完成服役期而过早劣化破坏的主要原因是耐久性问题。耐久性不足不仅会增加使用过程中的维护费用、影响工程的正常使用, 而且会使结构达不到设计的使用年限, 造成严重的资源浪费^[1]。为了保证海洋工程混凝土结构的耐久性, 众多规范对混凝土结构耐久性设计指标进行了规定, 但是影响结构耐久性的因素十分复杂, 除了环境因素和设计指标, 材料和施工的稳定性对耐久性也有一定的影响。设计者在设计阶段充分考虑评价众多因素对混凝土结构耐久性的影响, 是一个关键问题。

日本土木学会混凝土委员会根据多年的研究成果, 编制了《混凝土结构耐久性设计指南》, 提出定量的环境指数和耐久指数设计方法, 从码头结构设计、混凝土的原材料、混凝土和施工等多方面定量设计评估混凝土结构的耐久性, 为设计者提供较为全面和简便的耐久性设计方法^[2]。本文以广西防城港圆筒型沉箱旅游码头为例, 运用耐久性指数设计计算方法, 综合定量评估了码头关键部位的腐蚀风险, 为码头结构耐久性设计提供依据, 也为我国类似海洋工程的耐久性设计提供参考。

收稿日期: 2014-02-18

作者简介: 郑伟 (1982—), 男, 工程师, 主要从事港口航道工程咨询、设计工作。

1 耐久性指数设计理论

根据现有的理论^[2],在对混凝土结构的抗腐蚀能力进行评估时,对于结构的各个部分,必须保证耐久指数(T_p)大于或等于环境指数(S_p),即 $T_p \geq S_p$ 。

当所有混凝土构件都满足 $T_p \geq S_p$ 时,混凝土结构工程不经大修即可达到设计使用年限的要求。

当部分混凝土构件不满足 $T_p \geq S_p$, 即 $T_p < S_p$ 时,混凝土结构工程存在达不到设计使用年限的要求的风险。

1.1 环境指数

用环境指数(S_p)来评定混凝土结构物所处的环境条件。环境指数(S_p)是由环境条件及所要求的免维修期而定,环境指数一般由式(1)确定^[2]:

$$S_p = S_0 + \sum(\Delta S_p) \quad (1)$$

式中: S_0 表示一般环境下的环境指数特征值,一般环境指无冻融、氯化物或其他化学腐蚀物质作用的环境^[3]; ΔS_p 表示高盐分等恶劣环境条件下环境指数增量。

1.2 耐久指数

耐久指数(T_p)是综合考虑码头结构设计、混凝土材料和施工等对混凝土结构抗腐蚀能力产生显著影响的各个因素进行取值计算得出,耐久指数(T_p)可按式(2)进行计算^[2]:

$$T_p = 30 + \sum(\Delta T_{p,i}) \quad (2)$$

式中: $\Delta T_{p,i}$ 表示与码头结构设计、混凝土材料和施工等因素有关的耐久指数特征值。

2 结果与讨论

2.1 工程概况及关键部位环境指数分析

广西防城港旅游码头采用坐床式大圆筒结构,预制大圆筒上部(高程-0.7 m以上)及现浇胸墙处于水位变动区和浪溅区。防城港所处环境为典型的海洋环境,工程所在地属亚热带气候。

根据已有的研究结果^[2],在一般环境下,可认为免维修期在 10~15 a,环境指数特征值 $S_0 = 0$;

在一般环境下,免维修期在 50 a,环境指数特征值 $S_0 = 100$;在一般环境下,免维修期在 100 a,腐蚀风险指数特征值 $S_0 = 150$ 。根据免维修期的时间,环境指数特征值 S_0 可相应增减。

防城港旅游码头免维修的设计使用寿命为 50 a,对应的环境指数特征值 S_0 设为 100。

ΔS_p 根据构件所处的环境条件而定。环境指数增量 ΔS_p 数值为 10~70,环境越严酷,环境指数增量越大^[2]。防城港旅游码头处于亚热带海洋环境,不存在冻融的影响。根据相似环境暴露试验和工程调查结果^[4-5],处于海洋环境浪溅区和水变区的混凝土结构,混凝土表面的氯离子可以通过吸收、扩散和渗透等多种传输途径侵入混凝土内,同时供氧条件充分,使浪溅区和水变区的混凝土结构达到腐蚀的时间最短,浪溅区和水变区的环境指数增量 ΔS_p 取 70;位于水下区的混凝土结构因缺氧,使钢筋的阴极腐蚀反应受到抑制导致其腐蚀速度非常缓慢,甚至停止,水下区的环境指数增量取 10。

根据式(1)计算可得:预制大圆筒上部(高程-0.7 m以上)及现浇胸墙的环境指数为 170。

2.2 耐久指数分析

码头结构设计、混凝土材料及混凝土结构施工都会影响混凝土结构的抗腐蚀能力^[2],下面就从这几个方面对混凝土结构的腐蚀风险进行分析,腐蚀风险分析主要是计算对混凝土结构耐久性有影响的因素的耐久指数特征值,计算中的主要数据来源于设计值。

2.2.1 与设计工作有关的耐久指数特征值^[2]

与设计有关的混凝土结构抗腐蚀能力主要与设计工程师、保护层厚度、主筋与构造筋的设计、施工缝、温控和混凝土表面处理措施有关,其相关的耐久指数特征值见表 1。表中关于温度裂缝的耐久指数特征值,利用混凝土浇筑后构件内部最高温度时构件内外温度差 ΔT_i ,即 $15/\Delta T_i$ 算得。

表 1 与设计工作、构件的形状、钢筋的详细设计、施工图有关的耐久指数特征值

涉及项目	计算公式($\Delta T_{p,i}$)及取值范围	本工程的参数取值及说明	$\Delta T_{p,i}$
工程师	2		2
从事设计工作的年数	$A_1 - 7(4 \sim -2)$ A_1 : 从事设计工作的年数(a)	本工程设计负责人工作年限超过 20 a	4
保护层	$30/4 \times (A_2 - 5)$ A_2 : 保护层厚度(cm)	圆筒 $A_2 = 6$ 胸墙 $A_2 = 7$	圆筒上部: 7.5 现浇胸墙: 15
主筋	$15 \times [1 - (2A_3)^{1/2} / A_4]$ (15 ~ -25) A_3 : 主筋的排数; A_4 : 主筋的水平净间隙/粗骨料最大尺寸	$A_4 = 5$	圆筒上部: -25 现浇胸墙: 1
构造钢筋	$25 A_5(10 \sim 0)$ A_5 : 构造钢筋的断面积/混凝土的断面积(%)	圆筒 $A_5 = 14.67$ 胸墙 $A_5 = 1.96$	圆筒上部: 10 现浇胸墙: 10
施工缝	垂直施工缝: -20 A_6 ; 水平施工缝: -10 A_6 。 A_6 : 施工缝的施工方法 无施工缝($A_6 = 0$); 喷砂($A_6 = 0.3$); 缓凝剂 + 高压空气和高压水清洗($A_6 = 0.5$); 高压空气和高压水清洗($A_6 = 0.7$); 无处理($A_6 = 1.0$)	本工程无施工缝, 取值为 0	0
施工图	保护层表示不清楚: -5 受力钢筋没在同一张图上表示: -5 没有明确表示是否有施工缝: -25		0 0 0
温度裂缝	$20(1 - 1/A_7)$ (10 ~ -20) A_7 : 温度裂缝指数 $A_7 = 15/\Delta T_i$	本工程混凝土浇筑后构件内部 内外温差 ΔT_i 不超过 20 ℃	-6.66
弯曲裂缝	$5(A_8^2 - 7 A_8 + 6)$ (30 ~ 0) A_8 : 恒载引起的弯曲裂缝宽度/允许值	本工程 A_8 取值为 0	30
模板	使用透水型模板的情况下: 5 或 10 使用永久型模板的情况下: 5 配合构件的形状特别制作的模板的情况下: 5	本工程为配合构件的形状特别制作的模板	5
表面防护	表面铺设石材或瓷砖的情况下: 20 表面涂抹具有抗气候变化的树脂的情况下: 15 表面铺设塑料的情况下: 10 表面铺设聚合物水泥或树脂混凝土: 5	本项目设计有重防腐涂层, 取值为 15	15

2.2.2 与混凝土的原材料及配合比有关的耐久指数特征值^[2]

本工程混凝土原材料及配合比要求遵循 JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》规定, 现场配合比报告见表 2。

水泥种类、骨料的吸水率 and 外加剂等都会影响混凝土构件的耐久性, 与混凝土的原材料有关的耐久指数特征值的取值计算及计算结果见表 3。本项目掺合料设计为硅灰, 混凝土配制中未使用引气剂, 项目位于亚热带地区, 不存在冻融的影响。

表 2 混凝土原材料及配合比

结构物	水灰比	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硅灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	坍落度/ mm
圆筒(高程 -1.0 m 以上的范围)	0.337	338	719	1 059	150	90	17	10.00	185
胸墙	0.324	366	719	1 059	154	90	19	9.99	160

注: 水泥采用华润水泥 P.042.5; 砂来自北海合浦, 细度模数 2.6; 使用合浦碎石和水质良好的自来水; 粉煤灰来自广西北海, II 级; 硅灰来自埃肯; 减水剂产自惠州红墙。

表 3 与混凝土原材料有关的耐久指数特征值

涉及项目	计算公式及取值范围	本工程的参数取值及说明	$\Delta T_{p,i}$
水泥	干燥收缩或自收缩小的水泥:10 普通水泥:0	本工程水泥采用普通硅酸盐水泥	0
骨料的吸水率	$2(2 - A_9) + 4(1 - A_{10})$ A_9 :细骨料的吸水率(%) A_{10} :粗骨料的吸水率(%)	$A_9 = 0.4$ $A_{10} = 1.3$	2
粒径比	粒径比超出了标准粒径比范围的情况下:-5 一般情况下:0	本工程无取值为0	0
掺合料	膨胀剂:10 硅灰:10 干燥收缩减缓剂:10 双掺粉煤灰和矿渣:10	本工程采用了硅灰,取值为10	10
引气剂	使用引气剂:0 不适用引气剂:-15	本工程没有使用引气剂,取值为0	0

2.2.3 与混凝土自身性能及施工有关的耐久指数特征值^[2]

混凝土自身性能同样会影响混凝土结构的抗腐蚀能力,另外与混凝土施工有关的混凝土结构的腐蚀风险主要受施工主任工程师、施工现场管理、浇筑振捣工艺和养护等因素影响。与混凝土自身性能及施工有关的耐久指数特征值的取值计算及计算结果见表4。表中关于混凝土的自充填性有影响的构件形状和尺寸的影响系数(A_{12})值难以获得,但是如果混凝土构件规则,没有小尺寸的截面, A_{12} 可取较大的值^[2],本项目结构的形状相对规则,没有特别小的截面,因此, A_{12} 的值取其中间值(0)。

2.2.4 与钢筋计模板支撑系统施工有关的耐久指数特征值^[2]

钢筋的加工、定位件、绑扎和支撑模板系统的施工均会影响混凝土结构的抗腐蚀能力,与其相关的耐久指数特征值计算值见表5。

表 4 与混凝土自身性能及施工有关的耐久指数特征值

涉及项目	计算公式及取值范围	本工程的参数取值及说明	$\Delta T_{p,i}$
流动性	$2(A_{11} - 10) + A_{12}(1 - A_{11}/30)$ A_{11} :坍落度(cm) A_{12} :对混凝土的自充填性有影响的构件形状和尺寸的影响系数($-15 \leq A_{12} \leq 15$)	$A_{12} = 0$	圆筒上部:17 现浇胸墙:12
抗离析性	$5 - A_{13}(A_{11})^2$ A_{13} :材料的抗离析性($0 \leq A_{13} \leq 0.06$)	$A_{13} = 0.02$	圆筒上部:-1.85 现浇胸墙:-0.12
水灰比	$55 - A_{14}$ A_{14} :水灰比(%)	圆筒 $A_{14} = 33.7$, 胸墙 $A_{14} = 32.4$	圆筒上部:11.3 现浇胸墙:12.6
用水量	$0.5(160 - A_{15})$: $A_{15} \leq 160$ $1.0(160 - A_{15})$: $A_{15} > 160$ A_{15} :单位体积混凝土的用水量(kg/m^3)	圆筒 $A_{15} = 150$, 胸墙 $A_{15} = 154$	圆筒上部:5 现浇胸墙:3
氯盐的含量	$5 - 0.5(10A_{16})$ A_{16} :所有氯盐的量(kg/m^3)	本工程规定所有氯盐的量不超过0.08, $A_{16} = 0.08$	4.6
混凝土制造工厂的管理状况	制造工厂不符合标准认定情况下:-10 设置了自动计量记录装置情况下:4 使用搅拌性能特别好的搅拌机情况下:2 在骨料储藏上方设置了顶棚的情况下:2 细骨料表面水率的管理 $\pm 0.5\%$:4	本工程的混凝土制造,采用标准化管理	0 4 2 2 4
施工主任工程师	25 ~ -10		25

续表 4

涉及项目	计算公式及取值范围	本工程的参数取值及说明	$\Delta T_{p,i}$
接收	接收现场无总承包单位工程师常驻：-5		0
	对材料的计量记录：5		5
浇筑现场管理	工程指挥人员没在浇筑现场常驻：-5		0
浇筑高度	$2(1.5 - A_{17})$ A_{17} ：混凝土的自由落下高度(m)	根据现场浇筑工艺， $A_{17} = 1$	1
浇筑速度	$20 - A_{18} (10 \sim -10)$ A_{18} ：最大浇筑速度(m^3/h)	根据现场浇筑工艺， $A_{18} = 60$	-10
振捣	在工厂用附着式振捣器和内部振捣器：15 在工厂用附着式振捣器：10 在现场使用附着式和内部振捣器：5 内部振捣器：0 不进行振捣密实：-25	圆筒为预制，胸墙为现浇	圆筒上部：15 现浇胸墙：5
养护	使用特殊养护措施：10 使用保湿膜：5 按普通表面进行处理：0	根据现场养护条件而定	圆筒上部：10 现浇胸墙：5
养护龄期	$2(A_{19} - 5)A_{19} \leq 5 (A_{19} - 5)A_{19} > 5 (3 \sim -8)$ A_{19} ：养护龄期(天)	$A_{19} \geq 15$	3

表 5 与钢筋及模板支撑系统施工有关的耐久指数特征值

设计项目	计算公式及取值	本工程的参数取值及说明	$\Delta T_{p,i}$
钢筋加工	确认钢筋加工形状是按原定尺寸进行的：5		5
定位件的种类	水泥砂浆、陶瓷：0 塑料定位件：-5 钢制定位件：-10	定位件为水泥垫块	0
定位件数量	定位件不足：-10	无定位件不足	0
钢筋绑扎	绑扎钢筋的铁丝：		5
	经过除锈处理 5 铁丝向内侧弯曲 5	本工程为镀锌钢丝绑扎	5
模板施工	连接模板材料的金属部分残留在混凝土保护层内：-10		0
	锥形空穴填充材料：		
	塑料：-5		0
	水泥砂浆：0 无收缩水泥砂浆、水泥砂浆制作的锥形预制块：5 嵌块：经除锈处理的嵌块：5		5
支撑系统	钢制支撑系统：0 反复使用的支撑系统：5 木制支撑系统：-5	由于反复使用的支撑模板的支撑系统，有可能减少伴随模板变形而引起的施工误差，相比一般的支撑系统，精度更高	5

2.3 耐久性定量评估

通过比较分析广西防城港旅游码头混凝土结构所处环境的环境指数和综合考虑码头结构设计、混凝土材料和施工等影响耐久性的耐久指数特征

值，评估广西防城港旅游码头混凝土结构能否满足 50 a 免维修的耐久性设计使用年限，结果见表 6，从表 6 可以看出：处于腐蚀环境较严重的圆筒上部和现浇胸墙，耐久指数（ T_p ）均大于环境

指数 (S_p), 但差值不大, 说明必须要从码头结构设计、混凝土材料和施工等方面严格控制, 从理论上即可避免混凝土中的钢筋发生锈蚀, 确保混凝土结构 50 a 的耐久性设计使用寿命。

表 6 混凝土主体结构耐久性评估结果

构件	环境指数 S_p	耐久指数 T_p	$T_p - S_p$
圆筒上部	170	175.9	5.9
现浇胸墙	170	190.4	20.4

同样通过表 2 和表 6 看出, 在海洋工程中, 处于浪溅区和水位变动区的混凝土结构, 由于所处腐蚀环境比较恶劣, 影响结构耐久性因素众多, 为安全起见, 对该部位设计重防腐涂层对确保结构的耐久性是十分有必要的。

3 结论

1) 引入环境指数和耐久指数对广西防城港旅游码头处于腐蚀严重区的混凝土结构的腐蚀风险进行评估, 通过耐久性指数计算及与环境指数的比较表明: 处于水位变动区和浪溅区的预制大圆筒上部及现浇胸墙能够满足 50 a 免维修的耐久性设计使用年限要求。

2) 通过环境指数和耐久指数的比较分析可知, 耐久指数 (T_p) 虽均大于环境指数 (S_p), 但差值不大, 影响耐久性指数的原因较多, 必须从码头结构设计、混凝土的原材料、混凝土和施工这 4 个方面严格控制, 才能保证处于腐蚀严重区的混凝土结构 50 a 的设计使用寿命。

3) 通过环境指数和耐久指数的计算及比较, 充分说明对于处于浪溅区和水位变动区的混凝土结构, 设计重防腐涂层可确保其耐久性。

参考文献:

- [1] 王胜年. 我国海港工程混凝土耐久性技术发展及现状[J]. 水运工程, 2010(10): 1-7.
- [2] 日本土木学会. 混凝土结构耐久性设计指南及算例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] GB/T 50476—2008 混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [4] 范志宏, 杨福麟, 黄君哲, 等. 海工混凝土长期暴露试验研究[J]. 水运工程, 2005(9): 45-48.
- [5] 郑薇, 熊建波, 范志宏. 华南地区部分码头海工混凝土结构耐久性调查[J]. 公路, 2009(9): 273-276.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

中国港湾承建的卡塔尔多哈新港一期码头方块安装完成

近日, 由中国港湾承建的卡塔尔多哈新港一期工程提前完成了所有码头方块安装任务, 完成重要工程节点。卡塔尔首相阿卜杜拉、交通部部长贾西姆、中国驻卡塔尔大使高有祯等出席了专题新闻发布会。

阿卜杜拉在项目现场详细了解了工程建设进展情况, 高度评价了中国港湾在新港建设中发挥的积极示范作用。贾西姆在新闻发布会上表示, 中国港湾为多哈新港建设做出了重要贡献, 实现了 1 400 万工时的安全生产, 在项目安全、环保、质量等方面均取得良好成绩。高有祯对中国港湾项目建设成绩表示祝贺, 称赞中国港湾在卡塔尔树立了中资企业的良好典范。

据了解, 多哈新港项目是中东地区最大的港口建设工程, 是 2022 年卡塔尔世界杯的重要支撑项目, 总投资 100 亿美元, 计划 2016 年投入运营。中国港湾承建的一期工程是新港后期各项工程建设的基础和主体, 工程于 2011 年开工建设。中国港湾科学组织, 精心施工, 提前 134 d 完成了方块安装任务, 安装验收合格率为 100%, 为项目年底提前完工打下坚实基础。

(摘编自《中国交通建设网》)