



# 港口工程钢筋混凝土结构性能退化模型研究

杨国平<sup>1</sup>, 贡金鑫<sup>2</sup>, 吴锋<sup>3</sup>, 李荣庆<sup>1</sup>

(1.中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024; 3.中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 根据应力和氯离子共同作用下港口工程混凝土结构的性能退化机理, 确定了描述结构性能退化的参数: 以承载力描述结构安全性退化, 以刚度和纵向裂缝描述结构适用性退化。考虑了应力大小、持续时间和氯离子对结构性能的综合影响, 提出了港口工程钢筋混凝土结构钢筋锈蚀率计算模型。以钢筋锈蚀率为表征参数, 通过理论分析和室内试验, 建立了港工钢筋混凝土结构承载力衰减模型、纵向裂缝开展模型和刚度退化模型。

**关键词:** 港口工程; 性能退化; 钢筋锈蚀率

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0041-06

## Performance degradation mode of RC structure for port engineering

YANG Guo-ping<sup>1</sup>, GONG Jin-Xin<sup>2</sup>, WU Feng<sup>3</sup>, LI Rong-qing<sup>1</sup>

(1. CCCC Harbor Engineering Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Shanghai Third Harbor Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Mechanics of performance degradation for harbor engineering under stress and chloride ions is discussed. The safety of structure is described by bearing capacity while the applicability is described by stiffness and longitudinal crack. The model for corrosion rate of reinforcement for RC port structures is proposed after considering the effects of stress intensity and duration and chloride ions on structure performance. The deterioration model of bearing capacity, development model of longitudinal crack and degradation model of stiffness characterized by corrosion rate of reinforcement are established based on the theoretical analysis on multiple factors and lab corrosion experiments.

**Key words:** harbor engineering; performance degradation; corrosion rate of reinforcement

我国针对港口工程的历次调查结果<sup>[1-2]</sup>显示, 处于海洋环境下的混凝土结构性能退化问题突出, 使用年限短, 其中以高桩梁板式结构的腐蚀破坏最为严重。施工质量和当时相关技术标准的落后是导致港口结构过早退化或退役的主要原因之一。经行业组织对相关规范<sup>[3-4]</sup>和技术标准<sup>[5]</sup>进行修订和颁布后, 新建港口工程结构的使用情况有所改善, 但是距离《国家中长期科学和技术发展规划纲要》提出的“降低全寿命成本”要求还

有相当的差距。

存在的问题主要有两方面: 一是现有结构设计方法重视荷载作用下结构的安全性和适用性, 忽视其在荷载和环境使用条件下的耐久性能, 耐久性考虑仅限于材料和构造层面, 尚不能与结构设计定量结合起来; 二是工程初期建设与后期维护脱节, 工程设计阶段基本不考虑由结构性能退化引起的后期维护问题, 建设成本分析中对后期维护成本考虑不足。造成以上问题的根本原因是

收稿日期: 2013-07-04

作者简介: 杨国平(1973—), 男, 教授级高工, 主要从事港口及航道设计、科研工作。

对多因素作用下港口工程混凝土结构的性能退化规律认识不足，制约了考虑结构性能退化的结构设计方法的发展，也成为设计阶段制定合理维护策略的瓶颈。建立合理的结构性能退化模型是解决以上问题的基础。

目前单因素作用下的性能退化模型虽已取得了一定成果<sup>[6-8]</sup>，但难以反映港口工程结构所处环境条件恶劣、性能退化影响因素众多的特点。影响港口工程混凝土结构性能退化的众多因素中，氯离子和应力的联合作用最为典型。已有的氯离子和应力联合作用下结构性能退化的研究成果<sup>[9-11]</sup>主要集中于对现象的描述，对退化模型研究较少，少数研究者<sup>[12]</sup>建立了荷载作用下混凝土氯离子扩散系数与应力的关系，但在工程实用方面尚有很大距离，且对钢筋脱钝后的模型研究鲜有报道。针对这一现状，本文在总结已有研究成果的基础上，通过进行补充性试验和理论分析对氯离子和应力联合作用下的港口工程混凝土结构性能退化模型进行了研究，为进一步认识结构性能退化规律和建立合理设计方法和维护策略奠定了基础。

### 1 港口工程钢筋混凝土结构性能退化模型构建

结构的安全性退化主要体现为构件承载力的降低。结构的适用性退化体现为构件挠度增大、横向裂缝和纵向裂缝的出现。与横向裂缝相比，海洋环境中更应该控制的是混凝土构件钢筋锈蚀导致的纵向裂缝。这是由于纵向裂缝一方面有一定发展规律可循；另一方面对结构的影响更大，危害更严重。因此，结构使用后期，以刚度和纵向裂缝描述结构适用性的降低。

将钢筋腐蚀率作为描述结构性能退化的基本参数，分别建立承载力、刚度和纵向裂缝与钢筋锈蚀率的关系。分别以 $R(t)$ 、 $B(t)$ 和 $w(t)$ 表示结构投入使用后某时刻的承载力、刚度和纵向裂缝，则结构性能退化模型可表示为：

$$R(t) = R_0 f(k_{Cl^-}, k_{load}, c, \frac{W}{B}, k_T, k_{RH}, t) = R_0 f[\eta(t)] \quad (1)$$

$$B(t) = B_0 f_2(k_{Cl^-}, k_{load}, c, \frac{W}{B}, k_T, k_{RH}, t) = B_0 f_2[\eta(t)] \quad (2)$$

$$w(t) = f_3(k_{Cl^-}, k_{load}, c, \frac{W}{B}, k_T, k_{RH}, t) = f_3[\eta(t)] \quad (3)$$

式中： $R_0$ 为结构初始时刻的承载力； $k_{Cl^-}$ 、 $k_{load}$ 、 $k_T$ 和 $k_{RH}$ 分别为与氯离子侵蚀、荷载、温度和湿度有关的参数； $c$ 为混凝土保护层厚度； $\frac{W}{B}$ 为混凝土水胶比； $t$ 为时间； $B_0$ 为结构初始时刻的刚度； $\eta(t)$ 为结构某时刻的锈蚀率； $f_1(\cdot)$ 、 $f_2(\cdot)$ 和 $f_3(\cdot)$ 分别为与锈蚀率有关的函数。

## 2 钢筋锈蚀率计算模型

### 2.1 钢筋锈蚀全过程

对于氯离子引起的混凝土中的钢筋锈蚀，普遍认为分为图1中的3个阶段，第1阶段为结构竣工到钢筋表面氯离子浓度达到钢筋脱钝、开始锈蚀的临界浓度的时间段，第2阶段为钢筋开始锈蚀到混凝土保护层出现沿钢筋的纵向裂缝的时间段，第3阶段为混凝土出现沿钢筋的纵向裂缝后钢筋加速开裂的阶段。本文针对3个阶段分别进行研究。

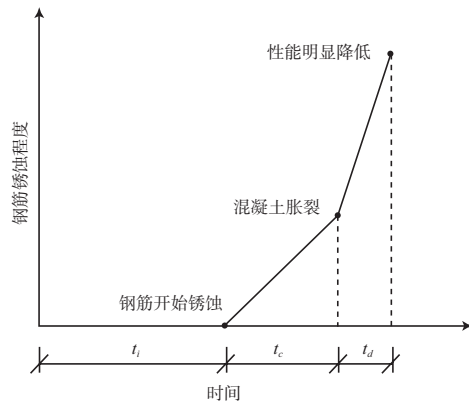


图1 混凝土构件钢筋锈蚀的三个阶段

#### 1) 钢筋锈蚀的诱导期。

第1阶段称为钢筋锈蚀的诱导期，用 $t_i$ 表示。目前普遍采用以Fick第二定律为基础的表达形式：

$$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{2\sqrt{D_0 t_0^m t^{1-m} / (1-m)}} \right] \right\} \quad (4)$$

式中： $C$ 为距混凝土表面 $x$ 处的氯离子浓度； $x$ 为距混凝土表面的距离； $t$ 为时间； $C_s$ 为表面氯离子浓度； $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数； $D$ 为氯离子扩散系数； $D_0$ 为暴露时间 $t_0$ 时的扩散系数，美国life-365<sup>[13]</sup>中给出的28 d时的 $D_0=10^{(-12.6+2.4W/C)}$ ； $m$ 为混凝土掺和料用量影响系数<sup>[13]</sup>。

$$m=0.2+0.4(FA/50+SG/70) \quad (5)$$

引入系数 $k_D$ 以考虑温度、相对湿度和荷载因素对氯离子扩散的影响:

$$k_D = k_{D,T} k_{D,RH} k_{D,load} \quad (6)$$

式中:  $k_{D,T}$ 为温度影响系数;  $k_{D,RH}$ 为相对湿度影响系数;  $k_{D,load}$ 为荷载影响系数。

根据目前公认度较高的研究成果, 温度影响系数 $k_{D,T}$ 可按下式计算<sup>[15]</sup>, 即

$$k_{D,T} = \exp \left[ b_e \left( \frac{1}{T_0 + 273} - \frac{1}{T + 273} \right) \right] \quad (7)$$

式中:  $b_e$ 为回归参数;  $T_0$ 为基准温度, 一般取 20 °C;  $T$ 为混凝土所处环境的温度 (°C), 取结构所在地平均气温。

相对湿度影响系数 $k_{D,RH}$ 根据Saetta等<sup>[16]</sup>的研究成果, 采用下式:

$$k_{D,RH} = \left[ 1 + \frac{(1 - RH_{con})^4}{(1 - RH_{con,0})^4} \right]^{-1} \quad (8)$$

式中:  $RH_{con}$ 为混凝土内部的相对湿度;  $RH_{con,0}$ 为混凝土内部的临界相对湿度。

系数 $k_{D,load}$ 的大小与混凝土构件的加载水平有关。由于问题的复杂性, 目前对此开展的研究较少。Francois等<sup>[12]</sup>研究得出系数 $k_{D,load}$ 是钢筋应力 $\sigma_s$ 的三次方的函数:  $k_{D,load} = 1 + 1.64 \times 10^{-8} \sigma_s^3$ 。如果建立了适当的计算模型, 通过 $\sigma_s$ 的大小便可确定系数 $k_{D,load}$ 。根据对已有试验结果的分析, 考虑应力水平等因素的影响, 通过计算校准, 建议荷载影响系数 $k_{D,load}$ 按下式计算:

$$k_{D,load} = 1 + 2.1 \left( \frac{\sigma_q}{f_{yk}} \right)^3 \geq 0.5 \quad (9)$$

式中:  $\sigma_q$ 为正常使用极限状态准永久组合下的钢筋应力 (拉应力取正值, 压应力取负值);  $f_{yk}$ 为钢筋屈服强度标准值。

同时, 性能退化规律应体现应力作用水平 (大小和持续时间) 的影响。比较合理的方法是首先根据构件的受力特点进行分类, 建议按梁、板、桩进行分类, 每类构件可再根据应力水平进行细分, 以此体现应力水平对性能退化规律的影响。

港口工程钢筋混凝土结构构件的配筋一般由横向裂缝控制。若将构件恰好满足横向裂缝要求时的配筋量称为标准配筋量, 当构件实际配筋量大于标准配筋量时, 富裕配筋将减小钢筋应力,

有利于提高结构耐久性。应力大小的影响可通过配筋富裕程度来体现, 配筋富裕程度通过实配钢筋量/标准配筋量或横向裂缝相对宽度 (允许裂缝宽度限值/实际计算控制裂缝宽度) 来表征。

应力持续时间反映设计使用年限内设计控制荷载作用于结构上的总时间。对于受弯构件, 可根据控制组合下的应力构成情况对构件进行分组来体现。建议根据重现期大于 10 a 的可变作用产生的效应占总作用效应的比值 $S_{T>10a}/S$ 划分为以下 3 组: 第 1 组为 $S_{T>10a}/S < 30\%$ 的构件 (典型构件为水平布置、竖向承受使用荷载为主的高桩码头面板); 第 3 组为 $S_{T>10a}/S > 60\%$ 的构件 (典型构件为竖向布置、水平承受波浪力为主的沉箱前墙); 第 2 组为 $30\% \leq S_{T>10a}/S \leq 60\%$ 的构件。

受弯构件横向裂缝宽度与钢筋应力成正比。对于一般受弯构件, 当按现行规范计算构件裂缝宽度恰好满足规范规定的裂缝宽度限值时, 钢筋的相对应力基本为 0.6。如表 1 中的第 1 组构件, 荷载经常达到限值, 设计控制荷载持续时间较长, 因此, 钢筋相对应力取为 0.6; 以此为参考, 对于第 3 组构件, 设计的控制荷载出现的概率很小, 作用于结构的时间很短, 在服役期的大部分时间内钢筋都是处于低应力状态, 经过校准计算, 钢筋相对应力取为 0.2; 处于两者之间的第 2 类构件, 取为 0.4。

对于桩, 选取两种典型受力状态开展研究: “1”指偏拉情况, “2”指偏压情况, 钢筋相对应力的确定方法与受弯构件相似。综上, 将构件分组与 $\sigma_q/f_{yk}$ 汇总于表 1。

表 1 钢筋应力与屈服强度比值的取值

构件分类	构件分组	$\sigma_q/f_{yk}$
梁、板	1	0.6
	2	0.4
	3	0.2
桩	1	0.3
	2	-0.4

考虑温度、湿度和应力水平的影响后, 可得出钢筋锈蚀的诱导时间:

$$t_i = \left\{ (1 - m) \left[ \frac{c}{2\sqrt{k_D D_0 t_0^m} \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_t}{C_s} \right)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{1-m}} \quad (10)$$

式中： $c$ 为混凝土保护层厚度； $C_r$ 为引起混凝土中钢筋发生锈蚀的临界氯离子浓度，根据JTJ 302—2006的规定<sup>[14]</sup>取值；其余符号意义同前。

2) 钢筋开始锈蚀到混凝土纵向开裂的时间。

可将钢筋锈蚀模型大致分为均匀锈蚀和点蚀两种。这两种锈蚀模型都不能完全反映钢筋锈蚀过程中实际形状的变化。考虑到钢筋锈蚀过程的模拟本身就是一个定性和定量结合的过程，本文采用均匀锈蚀模型描述钢筋的锈蚀。

当钢筋锈蚀速度为常量时，可将保护层开始开裂所经历的时间 $t_c$ 表示为：

$$t_c = \frac{\delta_{cr}}{\lambda_1} \quad (11)$$

式中： $\delta_{cr}$ 为保护层开裂时钢筋的临界锈蚀深度； $\lambda_1$ 为保护层开裂前钢筋的锈蚀速度。

规范<sup>[14]</sup>给出的保护层开裂时的钢筋临界锈蚀深度为：

$$\delta_{cr} = 0.012 \frac{c}{d} + 0.00084f_{cu,k} + 0.018 \quad (12)$$

保护层顺筋开裂前钢筋的锈蚀速度可用下式表示：

$$\lambda_1 = 0.0116i_{corr} \quad (13)$$

式中： $\lambda_1$ 为保护层顺筋开裂前钢筋的锈蚀速度（mm/a）； $i_{corr}$ 为钢筋锈蚀电流密度（ $\mu A/mm^2$ ）。

基于已有试验结果<sup>[17]</sup>，引入荷载影响系数 $k_{i,load}$ ，建立锈蚀电流密度与时间的关系为：

$$i_{corr}(t_p) = k_{i,load} i_{corr}(1) \times 0.85t_p^{-0.29} \quad (14)$$

式中： $t_p$ 为钢筋开始锈蚀后的某一时刻； $i_{corr}(1)$ 为钢筋初锈时的锈蚀电流密度，基于已有研究成果<sup>[18]</sup>并考虑相对湿度修正后：

$$i_{corr}(1) = \begin{cases} \frac{13.5(1 - W/B)^{-1.64}}{c} & (\text{普通混凝土}) \\ \frac{6.5(1 - W/B)^{-1.64}}{c} & (\text{高性能混凝土}) \end{cases} \quad (15)$$

$$\eta(t) = \frac{d_2 - [d - 2\delta(t)]^2}{d^2} = \begin{cases} 0 & t < t_i \\ 1 - \left[ 1 - 2 \times \frac{0.0139k_{i,load}i_{corr}(1)(t - t_i)^{0.71}}{d} \right]^2 & t_i \leq t < t_i + t_c \\ 1 - \left[ 1 - 2 \times \frac{0.0139k_{i,load}i_{corr}(1)t_c^{0.71} + \lambda_2(t - t_i - t_c)}{d} \right]^2 & t_i + t_c \leq t < t_i + t_c + t_e \end{cases} \quad (21)$$

### 3 承载力衰减模型

由钢筋混凝土基本理论可知，对于适筋的单筋混凝土受弯构件，其受弯承载力与纵向受

拉钢筋的屈服力 $A_s f_y$ （ $A_s$ 为钢筋截面面积， $f_y$ 为钢筋屈服强度）近似成正比，将钢筋锈蚀率以 $\eta(t)$ 表示，当钢筋遭受锈蚀后，钢筋的截面面积减少为

$$k_{i,load} = 1 + 1.5 \left( \frac{\sigma_q}{f_{yk}} \right)^3 \geq 0.5 \quad (16)$$

目前尚缺乏对 $k_{i,load}$ 的研究。结合工程实践和校准计算，建议 $k_{i,load}$ 按下式计算：

式中：钢筋应力 $\sigma_q/f_{yk}$ 可按表1取值。

钢筋开始锈蚀后 $t_p$ 时刻的锈蚀深度按下式计算：

$$\delta(t_p) = \int_0^{t_p} \lambda_1 dt = 0.0139k_{i,load}i_{corr}(1)t_p^{0.71} \quad (17)$$

若 $t_c$ 时刻的锈蚀深度达到临界锈蚀深度，则混凝土保护层发生顺筋开裂，即

$$0.0139k_{i,load}i_{corr}(1)t_c^{0.71} = \delta_{cr} \quad (18)$$

由式（12）和式（18）可得出钢筋初锈到混凝土保护层开裂的时间 $t_c$ 为

$$t_c = \left( \frac{0.8641 \times \frac{c}{d} + 0.0605f_{cu,k} + 1.2961}{k_{i,load}i_{corr}(1)} \right)^{1.4085} \quad (19)$$

3) 混凝土保护层纵向开裂后加速腐蚀的时间。

如图1所示，混凝土保护层纵向开裂后加速腐蚀的时间是混凝土性能劣化过程中的第3阶段。由于混凝土沿钢筋纵向开裂，钢筋的锈蚀过程更为复杂。

若将混凝土保护层纵向开裂后的时间表示为 $t_e$ ，则 $t_e$ 内钢筋锈蚀深度：

$$\delta(t_e) = \int_0^{t_e} \lambda_2 dt = \lambda_2 t_e \quad (20)$$

式中： $t_e$ 为混凝土保护层纵向开裂后经历的时间； $\lambda_2$ 为混凝土保护层纵向开裂后的平均锈蚀速度，按JTJ 302—2006《港口水工建筑物检测与评估技术规范》<sup>[14]</sup>建议取值。

### 2.2 钢筋锈蚀率计算

在结构整个使用时间 $t$ 内，钢筋的锈蚀率可表示为（假设钢筋直径均为 $d$ ）：

拉钢筋的屈服力 $A_s f_y$ （ $A_s$ 为钢筋截面面积， $f_y$ 为钢筋屈服强度）近似成正比，将钢筋锈蚀率以 $\eta(t)$ 表示，当钢筋遭受锈蚀后，钢筋的截面面积减少为

$[1-\eta(t)]A_s$ , 钢筋的屈服力减小为  $[1-\eta(t)]\Omega_p A_s f_y$ , 其中  $\Omega_p$  为描述钢筋屈服强度和钢筋与混凝土粘结性能降低的参数, 与钢筋锈蚀量有关, 根据对文献中关于  $\Omega_p$  的研究<sup>[19-22]</sup>, 本文将  $\Omega_p$  假定为:  $\Omega_p = 1 - 0.2\eta$ , 则构件锈蚀后的剩余承载力可近似表示为

$$R(t) = [1-\eta(t)][1-0.2\eta(t)]R_0 \quad (22)$$

式中:  $R_0$  为构件锈蚀前的承载力;  $\eta(t)$  为钢筋锈蚀率, 由式 (21) 计算。

#### 4 纵向裂缝开展模型

为了研究锈蚀率-纵向裂缝宽度关系, 通过电化学快速锈蚀方法进行了混凝土试块纵向裂缝宽度的试验研究, 分别拟合出单点裂缝宽度  $w$  与锈蚀率  $\eta$  的计算公式如下:

$$\eta = \begin{cases} 0.028w + 0.006 & c/d = 1 \\ 0.063w + 0.004 & c/d = 1.56 \\ 0.049w + 0.008 & c/d = 1.88 \\ 0.062w + 0.003 & c/d = 2.19 \end{cases} \quad (23)$$

由式 (23) 可得出不同  $c/d$  时纵向裂缝随锈蚀率  $\eta(t)$  的时变关系如式 (24) 所示。其中, 当  $c/d$  不等于式中所示数值时, 可通过线性插值确定。

$$w(t) = \begin{cases} \frac{\eta(t) - 0.006}{0.028} & c/d = 1 \\ \frac{\eta(t) - 0.004}{0.063} & c/d = 1.56 \\ \frac{\eta(t) - 0.008}{0.049} & c/d = 1.88 \\ \frac{\eta(t) - 0.003}{0.062} & c/d = 2.19 \end{cases} \quad (24)$$

对于既有结构, 可通过测量构件的纵向裂缝宽度, 根据式 (23) 计算钢筋锈蚀率, 再根据本文建立的钢筋锈蚀率与结构性能参数之间的关系, 进一步判断结构的使用状态; 对于新建结构, 在设计阶段可根据式 (24) 和式 (21) 预测构件的纵向裂缝开展规律, 为制定设计准则和设计方法提供依据。

#### 5 刚度退化模型

钢筋锈蚀会造成混凝土梁的抗弯刚度退化, 进而导致挠度增大, 影响钢筋混凝土梁的正常使用。文献[23]在充分借鉴已有的试验数据的基础上, 给出了锈蚀率与抗弯退化系数的近似公式。

本文采用这一公式, 结合第2节的钢筋锈蚀率计算公式, 建立钢筋混凝土受弯构件的刚度退化模型如下:

$$\alpha = 0.464e^{-\eta^{0.053}} + 0.605 \quad \eta > 0 \quad (25)$$

式中:  $\alpha$  为抗弯刚度退化系数;  $\eta$  为钢筋锈蚀率, 按式 (21) 计算。

锈蚀梁的抗弯刚度  $B_{\text{corr}}$  可按下式计算:

$$B_{\text{corr}} = \alpha B_0 \quad (26)$$

式中:  $\alpha$  为抗弯刚度退化系数;  $B_0$  为钢筋未锈蚀时构件的抗弯刚度。

#### 6 结论

1) 对多因素作用下结构的性能退化机理进行了探讨, 在此基础上选取了描述结构性能退化的参数: 以承载力描述结构安全性退化, 以刚度和纵向裂缝描述结构适用性退化。

2) 考虑了应力大小、持续时间和氯离子对结构性能的综合影响并进行了量化分析, 其中应力大小引起的影响通过配筋富裕程度进行体现, 持续时间引起的影响通过对不同类型的构件进行分组和定义相对应力进行体现。在此基础上, 提出了港口工程混凝土结构的时变劣化钢筋锈蚀率计算模型。

3) 建立了以钢筋锈蚀率为表征参数的承载力衰减模型、纵向裂缝开展模型和刚度退化模型。模型体现了港口工程的特点, 合理考虑了氯离子和应力水平对结构性能退化的影响, 推进了性能退化模型向工程实用方面的转化。

#### 参考文献:

- [1] 潘德强. 我国海港工程混凝土结构耐久性现状及对策[J]. 华南港工, 2003(2): 3-13.
- [2] 中国交通建设股份有限公司, 中交水运规划设计院有限公司. 港口工程全寿命周期设计方法理论分析与研究[R]. 北京: 中国交通建设股份有限公司, 2012.
- [3] JTJ 267—1998 港口工程混凝土结构设计规范[S].
- [4] JTJ 275—2000 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S].
- [5] JTJ 269—1996 水运工程混凝土质量控制标准[S].
- [6] Odd E. Gjrv. Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments[M]. London: Taylor & Francis Group, 2008.

[7] 刘秉京. 混凝土结构耐久性设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[8] 杨娟娟. 含氯环境下未开裂混凝土中钢筋锈蚀速度模型[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.

[9] A Konin, R Francois, G Arliguie. Penetration of chlorides in relation to the microcracking state into reinforced ordinary and high strength concrete [J]. Materials and Structures, 1998, 31:310-316.

[10] 林毓梅, 冯琳. 在海水中混凝土应力腐蚀试验研究[J]. 水利学报, 1995(2): 40-45.

[11] 吴相豪, 罗来瑜. 受应力腐蚀的混凝土力学性能的初步探讨[J]. 南昌水专学报, 1994(1):13-16.

[12] François R, Arliguie G. Effect of microcracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete members [J]. Magazine of Concrete Research, 1999(2):143-150.

[13] E C Bentz , M D A Thomas. Life-365 computer program for predicting the service life and life cycle costs of RC exposed to chloride[R]. Gaithersburg:2000.

[14] JTJ 302—2006 港口水工建筑物检测与评估规范[S].

[15] 史波. 氯离子环境下基于概率和性能的混凝土结构耐久性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[16] Saetta A V, Scotta R V, Vitaliani R V. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete [J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(5): 441-451.

[17] Liu T , Weyers R E. Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(3): 365-379.

[18] Vu K A T, Stewart MG. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models [J]. Structural Safety, 2000; 22(4): 313-333.

[19] Mangat Pritpal S, Elgarf Mahmoud S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(1): 149-158.

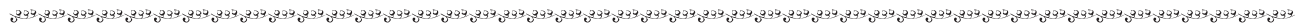
[20] 王庆霖, 池永亮, 牛荻涛. 锈后无粘结钢筋混凝土梁的模拟试验与分析[J]. 建筑结构, 2001(4): 51-53.

[21] 金伟良, 赵羽习. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, (5): 9-11.

[22] 陶峰, 王林科, 张章. 服役钢筋混凝土构件承载力的试验研究[J]. 工业建筑, 1996, (4): 17-21.

[23] 吴锋, 卓杨, 张章. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯刚度退化研究[J]. 水运工程, 2013(3): 86-90.

( 本文编辑 武亚庆 )



( 上接第40页 )

2) 与宏海号2×11 000 t轨道门式起重机出运工艺相适应的码头平面布置简单, 而码头结构设计要求高, 设计提出超宽整体卸荷式钢桩组合板桩码头, 垂直、水平承载能力高, 整体性好, 结构新型, 是板桩码头结构形式的集成创新。

3) 对于超宽整体卸荷式板桩码头, 结构受力复杂, 无成熟结构计算方法。设计将开展原型观测, 通过对施工及使用期不同阶段板桩结构的变形、内力及土压力的实测和分析, 研究该种新型结构的工作机理和计算方法, 为今后类似工程结构的设计提供依据和借鉴。

4) 本工程“ $\phi$  1 219 mm钢管桩+AZ20-700 mm钢板桩”组合墙及 $\phi$  1 000 PHC的桩基布置对沉桩施工提出了严格的要求, 桩位、桩的斜度及垂直度控制远远超过规范规定标准。为研究桩基沉桩施工方案, 设计与施工进行多次专题研究, 提出

了相应的沉桩施工工法, 目前沉桩施工已全部完成, 沉桩控制标准达到设计要求, 表明桩基布置具有可实施性, 通过本项目的桩基工程施工推动了沉桩工艺水平的提高。

**参考文献:**

[1] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 宏华海洋油气装备(江苏)有限公司石油勘探、钻井、集输设备制造项目工程可行性研究报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2010.

[2] 张宜群, 宋友良. 半潜式钻井平台总装合拢技术方案研究[C]// 北京: 中国造船工程学会. 第四届全国船舶与海洋工程学术会议文集, 2009.

[3] 雷鹏. 半潜式钻井平台总装合拢新工艺[J]. 港口设计, 2012(2): 1-4.

( 本文编辑 郭雪珍 )