



考虑性能退化的港口工程 钢筋混凝土结构设计方法研究^{*}

杨国平¹, 李荣庆¹, 贡金鑫²

(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)

摘要: 提出了考虑性能退化的港口工程钢筋混凝土结构设计方法, 以承载力、纵向裂缝和挠度为控制指标, 通过在现有的承载能力极限状态设计和正常使用极限状态验算中分别增加耐久性的要求加以实现。工程算例表明, 该方法与目前的设计习惯衔接良好、与工程实际符合性好、可操作性强。

关键词: 港口工程; 性能退化; 耐久性极限状态

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0074-06

Design method for reinforced concrete structures of port engineering considering performance degradation

YANG Guo-ping¹, LI Rong-qing¹, GONG Jin-xin²

(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)

Abstract: This paper proposes a design method for reinforced concrete structures of port engineering considering performance degradation, which takes the bearing capacity, longitudinal crack and deflection as control parameters and is realized by adding durability requirements to the existing design of ultimate limit states and service limit states. The examples show that this method is well coordinated with the current design and accords well with the engineering practice. Moreover, it is quite applicable in the structural design.

Key words: harbor engineering; performance degradation; durability limit state

现行结构设计规范^[1-2]通常假定材料性能不随时间变化, 这与结构在环境、荷载等作用影响下性能不断退化的实际工作状态不符。虽然有关规范^[1-3]从材料、构造等方面对混凝土结构耐久性做出了规定, 但并不能考虑结构性能退化, 缺乏考虑结构性能退化的设计方法。有关定量设计方法提出了具体设计表达式, 较有代表性的有日本《混凝土结构耐久性设计指南及算例》^[4]的环境指数-耐久指数法和耐久年限分析法、欧洲 Duracrete 项目《混凝土耐久性设计与再设计指南》^[5]中的极限状态设计法以及国内研究人员提

出的耐久性系数设计法^[6]。以上方法大多未与结构承载力建立定量联系, 也没有考虑应力对结构性能的影响。本文在对氯离子和应力共同作用下的结构性能退化规律分析^[7]和已建立的结构耐久性极限状态^[8]的基础上, 提出了相应的设计方法。

按现行规范规定的最低耐久性要求设计的港口工程钢筋混凝土结构构件, 比较概率分析结果^[7]和提出的耐久性极限状态^[8]发现: 承载力可靠指标部分情况不满足不低于 3.5 的要求, 纵向裂缝宽度大部分不满足纵向裂缝宽度 3 mm 具有

收稿日期: 2013-07-21

^{*}基金项目: 交通运输建设科技项目 (2009328521076)

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。

95%保证率的要求,挠度则较易满足要求。因此,必须针对每一指标采取相应的设计保证措施,使其全部满足耐久性极限状态。3个指标中,对纵向裂缝宽度的要求最难实现,因此,本文首先确定构件满足纵向裂缝宽度要求时的保护层厚度和水胶比,然后计算满足这一前提下构件50 a时的承载力可靠指标和刚度退化系数,在此基础上给出相应的设计保证措施和设计流程。

1 满足纵向裂缝宽度要求时的保证措施

1.1 满足纵向裂缝宽度要求时水胶比与混凝土保护层厚度的关系

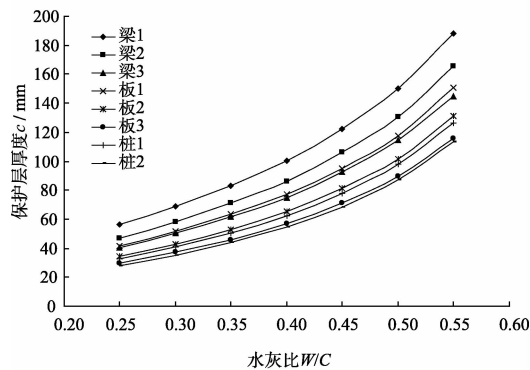
为满足纵向裂缝宽度3 mm具有95%保证率的要求,需要确定3 mm的裂缝宽度具有95%保证率时混凝土保护层厚度和水胶比的关系。

若裂缝宽度3 mm具有保证率 P ,即^[7]

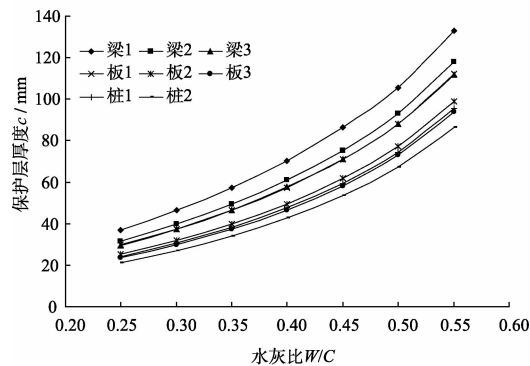
$$P = P(W < 3) = (1-p) + p \cdot \frac{\Phi\left(\frac{3-\mu_w}{\sigma_w}\right) - \Phi\left(\frac{w_l-\mu_w}{\sigma_w}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{w_l-\mu_w}{\sigma_w}\right)} \quad (1)$$

按以下步骤确定95%保证率下的水胶比和对应的混凝土保护层厚度:1)给定水胶比;2)根据各变量的统计特性按Monte-Colar进行模拟,得到开裂概率 p 和裂缝宽度的样本值;3)由裂缝宽度样本值,采用极大似然方法估计 μ_w 和 σ_w ;4)由式(1)计算保证率 P ;5)若 P 为95%,则此时的混凝土保护层厚度即为所求值,否则,重新假定混凝土保护层厚度转2)继续计算。

对计算得到的数据进行回归分析,建立有效保护层厚度和水胶比之间的关系如式(2)所示。另外,建议设计中最大水胶比不超过0.5,混凝土有效保护层厚度不小于50 mm。图1给出了构件第50 a的纵向裂缝宽度满足小于3 mm保证率为95%的要求时,南方地区浪溅区混凝土保护层厚度与水胶比的关系,其他情况下类似,不再给出。



a) 普通混凝土



b) 高性能混凝土

图1 南方地区,浪溅区混凝土保护层厚度与水胶比的关系

$$c_e = a \exp\left(b \cdot \frac{W}{B}\right) \geq 50 \text{ mm} \quad (2)$$

式中: c_e 为混凝土有效保护层厚度; a , b 为系数,由满足纵向裂缝宽度3 mm具有95%保证率的水灰比和保护层厚度数据回归分析得到,如表1所示; $\frac{W}{B}$ 为水胶比。

1.2 根据配筋富裕系数修正系数 a 和 b

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,将恰好满足横向裂缝要求时的配筋量称为标准配筋量。引入配筋富裕系数 K_b (允许横向裂缝宽度限值/实际计算控制裂缝宽度),通过调整表1中的数值对混凝土保护层厚度进行修正以考虑应力大小对结构性能退化的影响。根据工程经验, K_b 取值范围为1.0~2.0。调整系数 a 和 b 时,首先确定构件类型和分组,然后按同类构件就近内插或外延。

表 1 系数 a 和 b 的值

环境 条件	构件类型	分组	$\frac{\sigma_q}{f_{yk}}$	普通混凝土				高性能混凝土			
				南方		北方		南方		北方	
				a	b	a	b	a	b	a	b
大气 区	梁、板	1	0.6	13.783	4.111	8.709	4.486	9.853	4.193	6.947	4.418
	梁、板	2	0.4	10.806	4.298	6.581	4.718	8.174	4.300	5.738	4.530
	梁、板	3	0.2	9.110	4.378	5.787	4.831	7.550	4.344	5.263	4.584
	桩	1	0.3	10.066	4.354	6.064	4.789	7.761	4.329	5.419	4.568
	桩	2	-0.4	8.285	4.503	4.737	5.022	6.726	4.408	4.686	4.646
浪 溅 区	梁	1	0.6	20.800	3.966	13.739	4.318	13.090	4.199	9.217	4.470
	梁	2	0.4	16.679	4.135	10.759	4.515	10.807	4.327	7.549	4.609
	梁	3	0.2	14.098	4.207	9.600	4.621	9.982	4.377	6.938	4.665
	板	1	0.6	14.477	4.215	9.270	4.578	10.064	4.359	6.944	4.641
	板	2	0.4	11.362	4.406	6.950	4.842	8.248	4.493	5.648	4.781
	板	3	0.2	9.550	4.495	6.120	4.958	7.597	4.544	5.164	4.843
	桩	1	0.3	10.568	4.470	6.390	4.918	7.817	4.527	5.329	4.821
	桩	2	-0.4	8.693	4.627	5.003	5.161	6.748	4.616	4.564	4.920
水 位 变 动 区	梁、板	1	0.6	14.812	4.140	10.237	4.435	10.869	4.235	7.554	4.491
	梁、板	2	0.4	11.470	4.348	7.779	4.676	8.958	4.359	6.180	4.625
	梁、板	3	0.2	9.579	4.449	6.933	4.763	8.249	4.411	5.661	4.685
	桩	1	0.3	10.668	4.408	7.224	4.729	8.490	4.392	5.841	4.663
	桩	2	-0.4	8.607	4.596	5.717	4.955	7.328	4.485	5.011	4.761

注：梁、板分组按重现期大于 10 a 的作用产生的作用效应占总效应的比值 $S_{T>10}/S$ 确定： $S_{T>10}/S < 30\%$ ，为第 1 组； $30\% \leq S_{T>10}/S \leq 60\%$ ，为第 2 组； $S_{T>10}/S > 60\%$ ，为第 3 组。桩 1 指偏拉情况，桩 2 指偏压情况。

1.3 根据裂缝相对宽度计算值确定保护层厚度

实际工程中，多数钢筋混凝土结构都是带裂缝工作。裂缝的出现使混凝土保护层不能充分发挥阻止氯离子扩散的作用。如果在结构性能退化规律分析中仍采用实际保护层厚度，将片面扩大混凝土保护层的作用，显然是不合理的。所以，耐久性分析中应考虑裂缝的影响，对过大混凝土保护层厚度部分（ > 50 mm）进行折减。由于目前关于这方面的研究较少，笔者建议，自钢筋外表面算起，混凝土保护层 50 mm 以内的部分可以充分发挥作用；而大于 50 mm 的部分，根据裂缝相对宽度计算值确定其有效厚度。

将按式(2)计算得出的保护层厚度 c_e 视为有效保护层厚度，即这部分保护层可以充分发挥阻止氯离子扩散的作用，将实际采用的混凝土保护层厚度记为 c （设计图纸标注尺寸），则

$$c = 50 + \frac{(c_e - 50)}{\xi_c} \quad (3)$$

式中： c 为实际采用的混凝土保护层厚度； c_e 为

按式(2)计算得出的混凝土有效保护层厚度； ξ_c 为折减系数，按裂缝相对宽度计算值确定： $W/W_{\max} = 1.0$ 时，取 0.7； $W/W_{\max} = 0.5$ 时，取 1.0； $W/W_{\max}$ 为其他值时，按线性内插确定。

当实际混凝土保护层厚度大于按式(3)计算的值时，即满足第 50 a 的纵向裂缝宽度不超过 3 mm 的保证率为 95% 的要求。

2 考虑性能退化的承载力设计表达式

根据表 1 中系数 a 和 b ，确定构件不同混凝土水胶比时的保护层厚度，重新计算满足纵向裂缝宽度要求时钢筋混凝土构件的承载力可靠指标表明，无论是普通钢筋混凝土构件还是高性能钢筋混凝土构件，设计使用年限为 50 a 时，除浪溅区的梁外，可靠指标均能满足大于 3.5 的要求。因此，除浪溅区单排配筋的梁外，当混凝土保护层厚度大于式(3)的计算结果时，其承载力自然满足要求；对于浪溅区的梁，可通过提高初始承载力予以满足。

我国港口工程混凝土结构设计采用的是以分项系数表达的极限状态设计方法。按规范设计表达式进行设计的结构具有相应的可靠度水平。为与现行规范设计方法相协调,本文在现行设计表达式的基础上,通过可靠度分析给出了承载力提高系数,设计时仍采用以分项系数表达的设计表达式,如式(4)所示。

$$\gamma_0 S_d \leqslant \frac{R_{0d}}{\gamma_c}$$

(4)

式中: γ_0 和 S_d 意义同规范^[1]; R_{0d} 为结构构件的初始承载力设计值; γ_c 为可靠度分析得出的承载力提高系数,处于浪溅区单排配筋的梁,按表2采用;其他情况,取1.0。

表2 浪溅区单排配筋梁的承载力提高系数

混凝土类型	区域	构件分组	水胶比 W/B (混凝土保护层厚度按式(2)计算)					
			0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
普通混凝土	南方	梁1	1.436	1.407	1.387	1.379	1.372	1.336
		梁2	1.464	1.442	1.426	1.418	1.410	1.376
		梁3	1.507	1.489	1.471	1.459	1.444	1.404
	北方	梁1	1.441	1.418	1.403	1.398	1.392	1.356
		梁2	1.504	1.488	1.474	1.466	1.458	1.175
		梁3	1.515	1.497	1.480	1.469	1.416	1.077
高性能混凝土	南方	梁1	1.488	1.471	1.455	1.442	1.333	
		梁2	1.505	1.490	1.475	1.427	1.111	
		梁3	1.543	1.529	1.511	1.351	1.006	
	北方	梁1	1.484	1.467	1.450	1.450		
		梁2	1.533	1.519	1.396	1.058		
		梁3	1.540	1.525	1.328			

3 考虑性能退化的挠度验算表达式

当混凝土有效保护层厚度满足式(2)要求时,重新分析刚度退化规律,结果表明,对于不同水胶比的混凝土构件,第50 a的刚度退化平均不超过20%。比较合理的方法是通过提高初始挠度控制标准来满足耐久性极限状态对挠度的要求,即在初始设计时采用式(5)验算构件挠度:

$$f \leqslant [f]$$

(5)

式中: f 为按现行规范规定计算的挠度; $[f]$ 为挠度限值,轨道梁取 $l_0/1\,000$ ($0.8 \times l_0/800$),一般梁取 $l_0/600$,板取 $l_0/300$ 。

4 考虑结构性能退化的钢筋混凝土结构设计流程

综合1~3节的分析,提出考虑耐久性极限状态的结构设计流程(图2)。

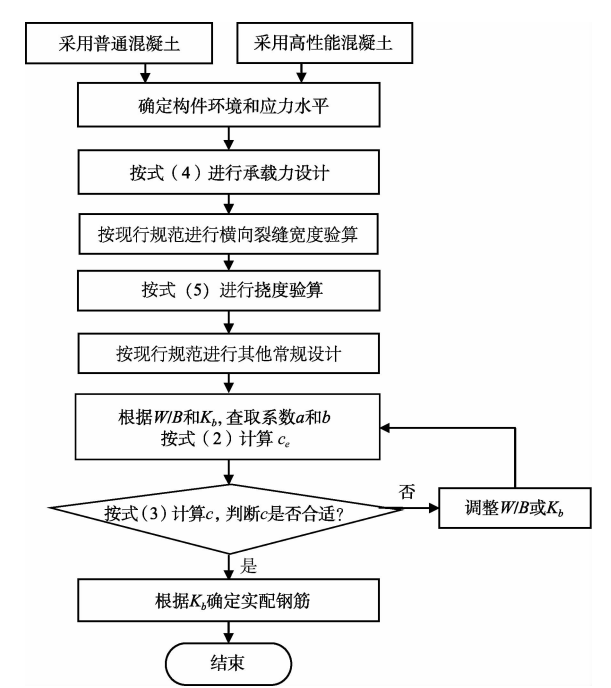


图2 考虑结构性能退化的钢筋混凝土结构设计流程

5 计算实例

5.1 工程概况

某码头结构采用钢筋混凝土沉箱结构,原设计沉箱前墙采用普通混凝土,混凝土等级为 C40,水灰比为 0.4,墙厚 350 mm,混凝土保护层厚度为 50 mm。该工程于 2005 年 8 月开始建设,2007 年 7 月竣工。选取沉箱前墙为研究对象。

5.2 原设计计算

设计高水位(最不利水位)时的作用计算结果如图 3 所示。选取作用组合设计值最大截面(−0.6 m 处),原设计结果见表 3。

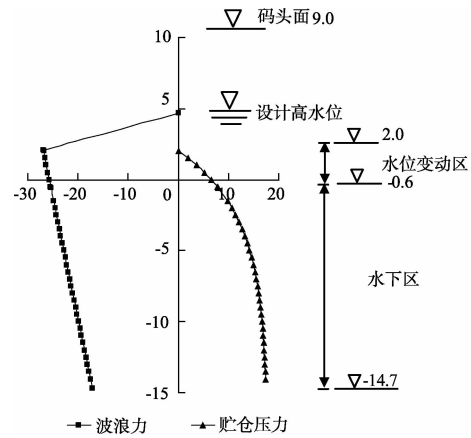


图 3 作用计算

表 3 原设计结果

部位	极限状态	作用效应设计值/(kN·m·m ⁻¹)	截面配筋	横向裂缝宽度/mm
外侧跨中	承载能力	40.068	4φ16	0.15
	正常使用	19.032		
内侧支座	承载能力	79.544	4φ22	0.17
	正常使用	37.782		

5.3 采用本文方法对原设计的分析

配筋控制截面处(−0.6 m), $S_{T>10}/S=66\%$ ($>60\%$),属板 3 组的构件(对应 $\sigma_q/f_{yk}=0.2$)。

外侧跨中:按本文 1.2 节所述计算 $K_b=1.33$,按表 1 和 1.3 节所述方法查得 $a=9.11$, $b=4.474$,按式(2)计算 $c_e=54.5\text{ mm}$ 。由 $\frac{W_{\max}}{[W_{\max}]}=0.75$,计算 $\xi_c=0.85$,按式(3)计算 $c=55.3\text{ mm}>50\text{ mm}$ (原设计采用的混凝土保护层厚度)。

内侧支座:按上述方法计算 $c=56.8\text{ mm}>50\text{ mm}$ (原设计采用的保护层厚度)。

可以看出,原设计采取的混凝土保护层厚度小于为满足 50 a 纵向裂缝宽度小于 3 mm 具有 95% 保证率要求时应采取的混凝土保护层厚度。结构不能满足耐久性极限状态要求,下节将按本文方法重新进行设计。

5.4 按本文方法重新设计

本工程沉箱前墙属板 3 组的构件。承载能力极限状态设计和正常使用极限状态验算同常规设计。分别采取增加配筋、减小水灰比、同时增加配筋和减小水灰比 3 种方案,保护层厚度分析结果见表 4。

表 4 原设计与本设计 3 种方案的分析比较

部位	设计方法	实配钢筋	$[W_{\max}]/\text{mm}$	$W_{\max}/\text{mm}$	W/C	K_b	c 计算值/mm
外侧跨中	原设计	4φ16	0.2	0.150	0.40	1.33	55.3
	方案 1	5φ16	0.2	0.119	0.40	1.68	53.3
	方案 2	4φ16	0.2	0.150	0.38	1.33	50.0
	方案 3	5φ16	0.2	0.119	0.38	1.68	48.5
内侧支座	原设计	4φ22	0.2	0.170	0.40	1.18	56.8
	方案 1	5φ22	0.2	0.132	0.40	1.51	54.2
	方案 2	4φ22	0.2	0.170	0.38	1.18	51.0
	方案 3	5φ22	0.2	0.132	0.38	1.51	49.0

6 结语

本文提出了考虑结构性能退化的港口工程钢筋混凝土结构设计方法,以承载力、纵向裂缝和挠度为控制指标,通过在现有的承载能力极限状态设计和正常使用极限状态验算中分别增加耐久性的要求加以实现:

1) 承载力方面,为满足第 50 a 不低于耐久性极限状态规定的承载力可靠指标不小于 3.5 的要求,建立了可考虑配筋量、水灰比和保护层厚度等因素影响的定量设计方法;

2) 纵向裂缝方面,为满足第 50 a 纵向裂缝宽度小于 3 mm (对应保证率为 95%) 的要求,建立了可考虑混凝土种类、环境条件、构件类型、应力水平和保护层厚度等影响因素的定量设计方法;

3) 挠度方面,提出了可满足耐久性极限状态对挠度要求的定量设计方法。

参考文献:

[1] JTJ 267—1998 港口工程混凝土结构设计规范[S].

[2] GB 50158—2010 港口工程结构可靠性设计统一标准[S].

[3] JTJ 275—2000 海港工程混凝土结构防腐技术规范[S].

[4] The European Union-Brite Euram. General Guidelines for Durability Design and Redesign[R]. Bruxelles: The European Union-Brite Euram, 2000.

[5] 日本土木学会. 混凝土结构耐久性设计指南及算例[M]. 向上, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[6] 李清富, 赵国藩, 李云贵. 关于港工混凝土结构耐久性若干问题的讨论[J]. 港口工程, 1993(5): 21-27.

[7] 李荣庆, 贡金鑫, 杨林虎. 港口工程钢筋混凝土结构性能退化规律概率分析[J]. 水运工程, 2014(1): 64-69.

[8] 杨国平, 李荣庆, 贡金鑫. 港口工程混凝土结构耐久性极限状态研究[J]. 水运工程, 2014(3): 80-84.

(本文编辑 武亚庆)

~~~~~  
(上接第 73 页)

表 11 直立式岸壁折角处船长系数  $\xi$

| 两直立式岸<br>壁间夹角<br>$\theta/(^{\circ})$ | 载质量/t    |                |           |          |                |           |
|--------------------------------------|----------|----------------|-----------|----------|----------------|-----------|
|                                      | 双侧停船     |                |           | 单侧停船     |                |           |
|                                      | DWT>10 万 | 5 000<DWT≤10 万 | DWT≤5 000 | DWT>10 万 | 5 000<DWT≤10 万 | DWT≤5 000 |
| 60                                   |          | 1.45           | 1.55      |          | 1.30           | 1.40      |
| 70                                   | 1.31     | 1.35           | 1.40      | 1.19     | 1.25           | 1.30      |
| 90                                   | 1.22     | 1.25           | 1.30      | 1.15     | 1.20           | 1.25      |
| 120                                  | 1.15     | 1.15           | 1.20      | 1.13     | 1.13           | 1.18      |
| 150                                  | 1.10     | 1.10           | 1.15      | 1.10     | 1.10           | 1.15      |

4 结语

探索直立式岸壁折角处泊位长度及船舶(岸)间距与靠泊船型尺度间的相关关系和变化规律,在港口岸线越来越紧张的今天,确是一项值得深入研究的工作。

本研究提出的直立式岸壁折角处单侧靠泊船舶时船长系数取值,补充了原有规范中缺乏的不对称靠泊状态下的泊位长度计算参数取值情况,是对原有规范的合理补充。优化修正后的船长系数与原有规范合理兼容,部分优化成果已作为研究素材纳入正在进行的总体规范修编中。

在此基础上,针对未来成主力发展的大型船舶,结合港口岸线的实际建设、运营及船舶操船

要求等因素优化后的船长系数取值,可在保证船舶操船安全的前提下,减少折角处泊位因船型尺度较大而产生的多余计算长度,节约宝贵的岸线资源。

参考文献:

[1] JTJ 211—1999 海港总平面设计规范[S].

[2] JTJ 211—1987 港口工程技术规范·第一篇·海港总体及工艺设计[S].

[3] 吴澎. 深水航道设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[4] 洪碧光. 船舶操纵原理与技术[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2007.

(本文编辑 武亚庆)