



港口工程混凝土结构耐久性极限状态研究*

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: 通过对有关耐久性和耐久性极限状态定义的总结, 结合港口工程结构特点, 提出了可用于结构设计的港口工程混凝土结构的耐久性极限状态。对钢筋混凝土结构构件和采用螺纹钢作为预应力筋的梁、板, 以承载力、挠度和纵向裂缝宽度分别劣化到某一限值作为控制的耐久性极限状态; 对于采用钢绞线或钢丝作为预应力筋的预应力混凝土结构构件和采用螺纹钢作为预应力筋的桩, 以钢筋脱钝作为耐久性极限状态。

关键词: 港口工程; 耐久性极限状态; 承载力可靠指标; 挠度; 纵向裂缝

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0080-05

Durability limit states for reinforced concrete structures of port engineering

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: The structural durability limit states which can be used in the structure design are proposed by summarizing existing definition about durability and durability limit states and considering the characteristics of harbor structures. For the ordinary RC elements and pre-stressing beams and slabs made with deformed bars, it is proposed that the threshold values of decreased bearing capacity, increased deflection and longitudinal crack width are taken as the control parameters for the structural durability limit states. For pre-stressing RC components with steel wires and pre-stressing RC piles with deformed bars, the time at depassivation of reinforcement bars is taken as the durability limit state.

Key words: harbor engineering; durability limit states; reliability index for bearing capacity; deflection; longitudinal crack

结构的安全性、适用性和耐久性为结构可靠性的3个基本方面。GB 50158—2010《港口工程结构可靠性设计统一标准》^[1]和JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[2]分别针对安全性和适用性给出了明确的极限状态。然而, 对结构耐久性表述却不多, 具体体现在: 1) 从现有的极限状态来看, 结构的耐久性未能明确其判别标准, 没有耐久性极限状态的规定, 结构耐久性设计缺少目标。2) 现行规范在设计中没有计入材料

性能随时间变化, 与结构在长期使用过程中性能不断退化的实际状态不符。其实质就是未考虑耐久性对安全性和适用性的影响。虽然现行规范从材料、构造、施工、养护等方面对混凝土结构的耐久性设计做出了规定, 但缺乏考虑结构抗力退化、与承载力层次相对应的设计方法。这些都是目前结构设计中的重要不足。因此, 需要对结构耐久性与现有的结构设计理论进行有效整合, 完善现有结构设计方法, 而确定结构耐久性极限状

收稿日期: 2013-07-04

*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。

态是以上工作的重要前提。

本文首先分析了结构耐久性与安全性、适用性的关系,然后对已有的耐久性极限状态定义做了总结分析,在此基础上,结合港口工程混凝土结构特点,提出了港口工程混凝土结构的耐久性极限状态。

1 港口工程混凝土结构耐久性与安全性、适用性的关系

GB 50158—2010《港口工程结构可靠性设计统一标准》^[1]对可靠性的定义为:结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力。我国标准对结构可靠性的定义与国际标准ISO 2394:1998《结构可靠性总原则》^[3]和欧洲规范EN 1990:2002《结构设计基础》^[4]基本一致。在结构设计中,结构的安全性、适用性和耐久性三者构成了结构可靠性的基本内涵。

结构的安全性是指结构在规定的设计使用年限内,在正常施工和正常使用时,能安全承受可能出现的各种作用。对港口工程结构设计来说,结构的安全性主要体现为结构构件的承载能力和整体稳定性等方面。结构的适用性是指结构在正常使用期间具有良好的工作性能,如不发生影响正常使用的过大变形、振动或裂缝宽度。与安

全性、适用性的定义相比,耐久性尚无公认的定义。虽然国内外规范^[3,5-7]对耐久性的定义不同,但都要求在设计使用年限内应能满足功能要求。可以看出,结构的安全性是结构抵抗各种作用的能力;适用性是良好的工作性能;耐久性则是结构在长期作用下(荷载、环境)抵抗性能退化的能力,贯穿于结构的整个全寿命周期,既影响结构的承载力,又影响结构的正常使用。

目前我国港口工程混凝土结构设计中采用以概率论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法。对于钢筋混凝土结构构件,根据承载能力极限状态和正常使用极限状态的要求,分别进行承载能力计算和变形、裂缝宽度验算。安全性对应于结构的承载能力极限状态,适用性对应于结构的正常使用极限状态,而缺乏与耐久性相应的耐久性极限状态,使结构耐久性定量设计缺少目标。因此,确定结构耐久性极限状态是实现耐久性定量设计的重要前提。

2 对已有耐久性极限状态定义的评价

目前已提出了多个耐久性极限状态的定义,根据各种定义特点,将其分为按适用性控制、按安全性控制和按具体性能控制3类,总结并对其评价(表1)。

表1 已有耐久性极限状态定义的评价

分类	性质	典型代表	表征参数	评价
按适用性控制	结构由于性能退化导致结构变形不能满足正常使用的要求,以钢筋脱钝或钢筋锈蚀发展到出现混凝土顺筋开裂作为耐久性极限状态	1) GB/T 50476—2008 ^[6] : 冷加工钢筋或直径不大于6 mm的普通热轧钢筋作为受力主筋时,以钢筋脱钝作为耐久性极限状态; 直径大于6 mm的普通热轧钢筋,以构件表面开始出现顺筋裂缝,或钢筋截面的径向锈蚀深度达到0.1 mm时作为耐久性极限状态; 混凝土表面发生轻微损伤 2) 惠云玲 ^[8] : 钢筋直径 $d \leq 10$ mm时,有锈迹; 钢筋直径 $d \geq 12$ mm时,出现沿筋纵裂 3) 王胜年 ^[9] : 钢筋开始锈蚀	钢筋表面氯离子浓度; 钢筋锈蚀深度; 混凝土表面损伤程度	1) 对于港口工程结构来说,标准太严格 2) 已有计算模型还存在许多不确定性,如难以准确选取环境参数等 3) 混凝土表面损伤程度无法定量表述 4) 多用于已有结构的检测和评估,无法直接应用于结构设计
按安全性控制	由于性能退化导致结构不能满足承载力的要求,以承载力降低到一定程度或纵向裂缝开展到一定限值作为耐久性极限状态	1) Duracrete ^[10] : 纵向裂缝宽度达到1.0 mm 2) 惠云玲 ^[8] : 一类构件 $K \leq 0.92$, 二类构件 $K \leq 0.90$; 纵向裂缝宽度 $W \geq 0.6$ mm; 钢筋截面损失率 $\geq 5\%$	纵向裂缝宽度; 承载力降低系数; 钢筋截面损失率	多用于已有结构的检测和评估,无法直接应用于结构设计

续表

分类	性质	典型代表	表征参数	评价
按具体性能控制	根据不同的性能定义不同的耐久性极限状态, 可以是适用性、安全性以及其他性能的关键点	金伟良 ^[11] : 根据业主或使用者对结构的具体要求、环境状况、结构的重要性、可修复性等方面的要求选择相应的性能极限状态	具体性能的控制点	可以考虑环境、材料、荷载在设计使用年限内随着时间的变化关系, 以及整个寿命周期内经济与技术的可行性; 基于性能的设计是结构设计的发展趋势, 但提出具体的可操作的性能极限状态尚需深入研究

3 本文定义的结构耐久性极限状态

工程调查表明, 有很多港工结构构件往往是由于钢筋锈蚀, 使得结构构件有效承载截面面积减小, 而且改变了混凝土与钢筋接触面的性质, 导致粘结性能退化, 从而导致结构承载能力和适用性明显下降, 甚至破坏。这种承载能力和使用性能的改变是由耐久性问题引起的, 所以耐久性极限状态和承载能力极限状态与正常使用极限状态密切相关。笔者认为, 结构耐久性是在长期作用(荷载、环境)下结构抵抗性能(包括承载力和正常使用性能)退化的能力, 如果承载力和正常使用性能之一或全部因耐久性不足而降低到规定的水平, 则结构不再安全或不能够正常使用, 所以耐久性极限状态并不是一个独立的极限状态, 而是与结构安全性和适用性密切相关的。

3.1 钢筋混凝土结构构件

结构的安全性退化主要体现为构件承载力的降低。钢筋锈蚀导致的构件承载力的降低与3种因素有关, 即钢筋屈服强度的降低、截面面积的减小和钢筋与混凝土粘结性能的降低。其中钢筋屈服强度的降低和钢筋与混凝土粘结性能的降低均与钢筋锈蚀率有关, 钢筋锈蚀严重时, 钢筋屈服强度和钢筋与混凝土粘结性能都会有明显的下降, 从而影响结构的安全性。

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。在长期荷载作用下, 由于钢筋混凝土梁受压区混凝土的徐变和收缩, 挠度将随时间的增大而增大。在设计中采用长期刚度计算长期挠度。规范中采用挠度增大系数考虑长期刚度与短期刚度的区别, 以受压钢筋和受拉钢筋配筋率来表示。结构性能退化导致的挠度

增大主要是由于构件的刚度随着钢筋锈蚀的进行而不断降低, 所以在设计中应考虑钢筋锈蚀引起的刚度降低造成的挠度增大。

设计中进行验算的是荷载作用下构件的横向裂缝。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。纵向裂缝处的钢筋锈蚀和体积膨胀可使混凝土保护层剥落, 钢筋的暴露又加快了锈蚀速度, 使钢筋截面进一步减小, 最终导致结构破坏, 影响构件的使用性能和安全。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。

根据以上分析, 对于钢筋混凝土构件, 选取承载力、挠度和纵向裂缝宽度作为耐久性极限状态的控制指标。

1) 承载力可靠度。

安全是结构设计最基本的要求, 我国GB 50158—2010《港口工程结构可靠性设计统一标准》^[1]规定, 港口工程二级结构50 a设计基准期的最小可靠指标为3.5。目标可靠指标是对港口工程结构要求的最低可靠指标, 是静态指标。按现行的JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[2]规定的钢筋和混凝土强度值计算的受弯构件50 a设计基准期的可靠指标 $\beta_{50a内}=4.334$, 大于统一标准规定的最小可靠指标。如果换算为年可靠指标, 则 $\beta_a=5.317$, 这个值也是考虑结构抗力衰减时的初始年可靠指标。如果要求港口混凝土结构受到腐蚀后继续使用, 且满足统一标准规定的最低要求, 则第50 a的可靠指标可取为3.5。即考虑性能退化后的承载力可靠指标可取为3.5。如图1

所示, 在结构初始建成时刻, 承载力可靠指标较高, 在环境和材料内部因素的作用下, 结构性能随时间不断退化, 到第50 a时, 承载力可靠指标下降到3.5, 认为结构达到基于安全性考虑的耐久性极限状态。对于第50 a可靠指标小于3.5的情况, 可通过提高构件初始承载力或采取减缓退化速度等措施来满足。

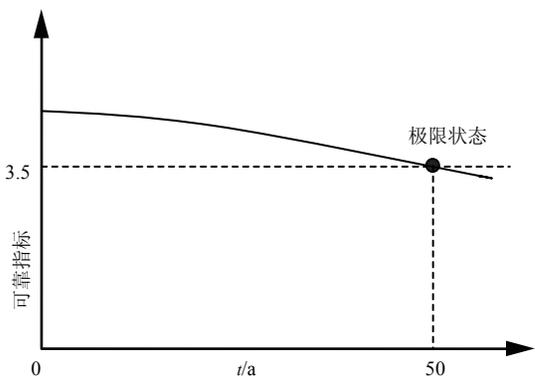


图1 承载力可靠指标随时间的变化

2) 纵向裂缝宽度。

JTJ 302—2006《港口水工混凝土建筑物检测与评估技术规范》^[7]将外观劣化度分为A、B、C和D级别, 所有构件无裂缝时为A级; 对于板, 裂缝宽度小于0.3 mm时为B级, 裂缝宽度在0.3~1.0 mm时为C级, 裂缝宽度大于1.0 mm时为D级; 对于梁、桩和桩帽, 裂缝宽度小于0.3 mm时为B级, 裂缝宽度在0.3~3.0 mm时为C级, 裂缝宽度大于3.0 mm时为D级。按上述原则, 裂缝宽度达到3 mm以上时结构已属于严重破坏。因此, 本文选取纵向裂缝宽度3 mm作为控制标准, 采用工程上常用的95%作为保证率, 取第50 a纵向裂缝小于3 mm (95%保证率) 作为纵向裂缝要求的耐久性极限状态。若第50 a纵向裂缝宽度达不到上述要求时, 可通过提高耐久性要求 (采取高性能混凝土、增加混凝土保护层厚度、减小水灰比或减小应力水平等) 加以实现。

3) 挠度。

挠度控制属于钢筋混凝土构件正常使用极限状态设计的内容。挠度过大会影响结构的使用, 特别是有吊车的码头。JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[2]规定了钢筋混凝土构件的挠度控制要求作为初期验算标准。钢筋混凝土构

件中的钢筋腐蚀后, 截面面积减小, 钢筋与混凝土的粘结性能降低, 从而构件的刚度下降, 挠度增加, 见图2。

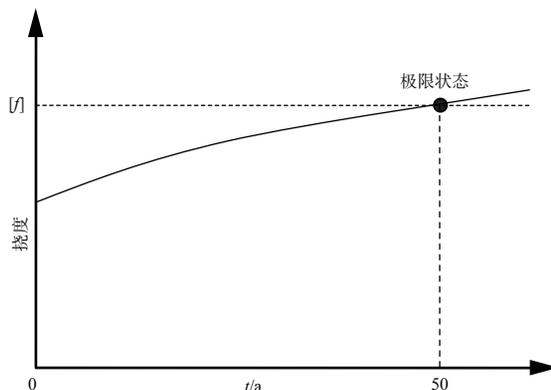


图2 挠度随时间的变化

在码头使用后期, 对于轨道梁, 若变形过大, 将影响码头起重设备正常使用, 因此仍采用现行规范规定的限值作为码头使用50 a时的控制标准, 这样对于轨道梁可仅进行50 a时的挠度验算; 对于一般梁和板, 变形仅影响外观, 对结构使用不会造成较大影响, 因此不再对50 a时的挠度限值作规定。将50 a时的最大挠度限值列于表2。

表2 最大挠度限值 $[f]$

构件种类	$[f]$	
	规范提出的初期控制标准	50 a时控制标准
轨道梁	$l_0/800$	$l_0/800$
一般梁	$l_0/600$	
板	$l_0/300$	

注: l_0 为计算跨度, 按规范规定取值。

3.2 预应力混凝土结构构件

预应力混凝土结构一般采用钢绞线、钢丝或螺纹钢筋作为受力钢筋。

当采用钢绞线或钢丝作为预应力筋时, 预应力筋的强度高、延性差, 构件承载力富裕程度也相对较小, 受拉混凝土边缘以不出现拉应力或不出现横向开裂控制, 混凝土保护层能充分发挥阻止氯离子在混凝土中扩散的作用, 且该类构件对钢筋锈蚀敏感, 一旦锈蚀, 高应力状态下锈蚀发展速度快, 构件有脆性破坏的特征, 破坏后果严重, 因此建议以钢筋脱钝作为耐久性极限状态。

当采用螺纹钢筋作为预应力筋时, 与钢绞

线或钢丝相比，其强度相对较低，延性好，且一般配置预应力筋与非预应力筋共同满足承载力要求，构件破坏模式接近延性破坏。因此，对于采用螺纹钢筋作为预应力筋的梁、板，建议参照3.1节所述的耐久性极限状态指标进行控制。对于桩，因其位置重要，一旦发生破坏，很难修复，后果严重，因此，建议以钢筋脱钝作为耐久性极限状态。

4 结论

1) 结构耐久性是在长期作用(荷载、环境)下抵抗性能(承载力和正常使用性能)退化的能力，承载力和正常使用性能之一或全部因耐久性不足而降低到规定的水平，则结构不再安全或不能够正常使用。

2) 耐久性极限状态并不是一个独立的极限状态，而是与结构安全性和适用性密切相关的。

3) 针对港口工程钢筋混凝土结构构件和预应力混凝土结构构件分别建立了耐久性极限状态。

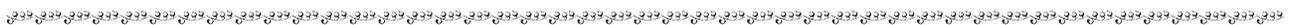
对钢筋混凝土结构构件和采用螺纹钢筋作为预应力筋的梁、板，以承载力、挠度和纵向裂缝宽度分别劣化到某一限值作为控制的耐久性极限状态：承载力以可靠指标进行控制，结构使用到第50 a时的可靠指标不低于3.5；纵向裂缝以第50 a纵向裂缝宽度小于3 mm作为控制标准，对应的保证率为95%；仅对轨道梁挠度作要求，采用现行规范规定的最大挠度限值作为第50 a的控制标准。

对于采用钢绞线或钢丝作为预应力筋的预应力混凝土结构构件和采用螺纹钢筋作为预应力筋的桩，以钢筋脱钝作为耐久性极限状态。

参考文献：

- [1] GB 50158—2010 港口工程结构可靠性设计统一标准[S].
- [2] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].
- [3] ISO 2394: 1998 General principles on reliability for structures[S].
- [4] EN1990: 2002 Eurocode—Basis of structural design[S].
- [5] GB 50153—2008 工程结构可靠性设计统一标准[S].
- [6] GB/T 50476—2008 混凝土耐久性设计规范[S].
- [7] JTJ 302—2006 港口水工建筑物检测与评估技术规范[S].
- [8] 惠云玲. 混凝土结构钢筋锈蚀耐久性损伤评估及寿命预测方法[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 19-22.
- [9] 王胜年. 基于暴露试验和实体工程调查的海工混凝土结构耐久性寿命预测理论和方法[J]. 中国港湾建设, 2010(5): 68-74.
- [10] Sarja A, Vesikari E. Probabilistic performance based durability design of concrete structures: General guidelines for durability design and redesign [R]. Denmark: The European Union, 2000.
- [11] 金伟良, 钟小平. 结构全寿命的耐久性与安全性、适用性的关系[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 1-7.

(本文编辑 武亚庆)



著作权授权声明

全体著作权人同意：论文将提交《水运工程》期刊发表，一经录用，本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。