· 综　合 ·

设计使用年限 50 年以上港口工程结构设计方法研究

杨国平，李荣庆，胡家顺
（中交水运规划设计院有限公司，北京 100007）

摘要：针对设计使用年限 50 年以上港口工程主体结构缺乏设计方法的问题，对设计中涉及的作用标准值取值和耐久性定量设计等核心技术内容进行了系统研究。明确了可提高设计使用年限的港口工程和相应的结构可靠度水平，采用概率分析方法，确定了作用标准值的设计使用年限调整系数，提出了堆货荷载、起重运输机械荷载、波浪力等的作用标准值取值方法；基于氯离子扩散理论与碳化模型，提出海水环境与淡水碳化环境下混凝土结构耐久性定量设计方法，包括结构耐久性极限状态定义、使用年限校核公式和锈蚀后挠度计算方法。研究表明：通过港口工程结构作用标准值的合理确定和耐久性定量设计，可使设计使用年限 50 年以上港口工程结构达到与现行 50 年标准相同的可靠度水平，研究成果为长寿命港口工程结构设计提供了技术支撑与工程应用依据。

关键词：设计使用年限；港口工程；作用标准值；耐久性定量设计
中图分类号：U65　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)09-0016-11

Design method of port engineering structures with design service life greater than 50 years

YANG Guoping, LI Rongqing, HU Jiashun
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In view of the lack of design method for the main structure of port engineering with a design service life greater than 50 years, the contents such as the standard value of action and the quantitative design of durability involved in the design are systematically studied. The port engineering that can improve the design service life and the corresponding structural reliability level are clarified. The probability analysis method is used to determine the adjustment coefficient of the design service life of the action standard value, and the determination methods for the action standard value such as the stacking load, lifting and transportation machinery load, and wave forces and so on are proposed. Based on the chloride ion diffusion theory and carbonation model, a quantitative design method for the durability of concrete structures in seawater environment and freshwater carbonation environment is proposed, including the definition of structural durability limit state, the check formula of service life and the calculation method of deflection after corrosion. The research shows that through the reasonable determination of the standard value of the port engineering structure and the quantitative design of the durability, the port engineering structures with a design service life of more than 50 years can reach the same reliability level as the current 50-year standard. The research results provide technical support and engineering application basis for the structural design of long-life port engineering.

Keywords: design service life; port engineering; standard value of action; quantitative durability design

我国港口工程建设经过多年发展，标准体系日趋完善，现行标准体系以设计使用年限 50 年为基准，有力保障了我国大量港口工程的建设质量。然而，随着经济社会发展和对工程质量要求的不

收稿日期：2026-02-05　　**录用日期：**2026-03-10
作者简介：杨国平(1973—)，男，硕士，全国水运工程勘察设计大师，正高级工程师，研究方向为水运工程规划、设计、科研与咨询。

水运工程

断提高，对大型深水码头、防波堤等重要港口工程的主体结构，适当提高结构设计使用年限的需求日益迫切。在技术层面，设计使用年限延长后面临两个核心问题：一是可变作用取值方法，因设计基准期 50 年与设计使用年限不再匹配，需对可变作用标准值进行调整以保证结构可靠度水平一致；二是耐久性定量设计方法，在更长使用年限下，海水氯离子侵蚀和淡水碳化导致的钢筋锈蚀问题更为突出，需建立系统且可量化的耐久性设计体系。

在国际上，英国采用风险与成本平衡原则确定防波堤的波浪重现期[1]，日本提出了按结构重要性取 1~3 倍设计使用年限作为波浪重现期的规定[2]，但上述标准在作用调整和耐久性定量设计方面尚不够完善。国内 GB 50158—2010《港口工程结构可靠度设计统一标准》[3] 和 JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》[4] 也主要针对 50 年设计使用年限，缺乏延长使用年限后的系统性设计规定。

针对上述问题，交通运输部水运局组织编制了 JTS/T 200—2023《设计使用年限 50 年以上港口工程结构设计指南》[5]（简称《指南》）。本文结合《指南》的编制背景和技术要点，系统阐述三个方面的核心内容：1）设计使用年限 50 年以上港口工程结构的可靠度水平定位与设计框架；2）涵盖堆货荷载、波浪、地震等作用标准值确定方法；3）考虑环境、荷载、材料、构造等多因素耦合影响的结构耐久性定量设计方法，以期为长寿命港口工程结构设计提供参考。

1　可提高设计使用年限的港口工程

文献[6]针对是否全面提高港口工程结构设计使用年限的问题，从经济、功能、技术和政策方面对可行性进行了研究，结合我国港口使用现状，提出了永久性港口建筑物设计使用年限仍采用 50 年，对于特别重要的港口工程，可结合业主要求，采用 50 年以上的建议。《指南》中对采用 50 年以上的情况进行了细化，规定符合下列条件的码头、防波堤等港口工程主体结构可适当提高结构的设计使用年限，取 50 年以上：1）对设计使用年限有特殊要求；2）具有重要战略意义或重要经济意义。其中，特殊要求立足保障特定使用功能；重要战略意义侧重考量工程功能，一旦中断将引发严重后果；重要经济意义主要从受自然条件等不利因素制约、结构建设和维护困难、一次建好全寿命成本最优的角度考虑。设计使用年限 50 年以上的港口工程主体结构，其设计使用年限可根据使用要求或全寿命成本最优确定。其中的使用要求包括结构功能和使用特殊要求。

2　结构可靠度水平设置

我国港口工程结构设计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。GB 50158—2010《港口工程结构可靠性设计统一标准》规定了设计使用年限内、港口工程结构持久状况承载能力极限状态情况下，一级、二级、三级安全等级结构的最小目标可靠指标分别为 4.0、3.5 和 3.0。表中数值针对设计使用年限 50 年作出规定，反映了我国以往港口工程结构的可靠度水平，在设计中可作为可靠指标的下限值使用，设计时可根据业主的要求采用不同的可靠指标，取值不得低于表中限值。《指南》遵循费用投入水平适度，与现行结构关键控制指标一致的原则，充分考虑经济性与安全性，规定设计使用年限 50 年以上的港口工程结构目标，其可靠指标、结构极限状态设计控制指标与现行标准保持一致。

3　作用标准值确定

GB 50158—2010《港口工程结构可靠性设计统一标准》规定了永久性港口建筑物结构的设计使用年限采用 50 年。作用于港口码头结构的可变作用随时间随机变化，设计基准期是为确定可变作用等的取值而选用的时间参数，港口工程结构采用 50 年。对于设计使用年限为 50 年的港口工程

水运工程

结构，设计使用年限与设计基准期均采用 50 年，两者相互协调，不需对可变荷载标准值进行调整。对于设计使用年限大于 50 年的结构，设计使用年限与设计基准期不再匹配，可变作用出现大值的概率增大，为保证结构设计使用年限超过 50 年时具有与设计使用年限为 50 年时相同的可靠度水平，应适当提高可变荷载的标准值。

港口工程结构上的作用包括自重力、施工荷载、堆货荷载和人群荷载、起重运输机械荷载、铁路列车荷载、汽车荷载、船舶荷载、风荷载、冰荷载、水流力、波浪力、土压力、地震作用、温度作用、外加位移和变形、水位、偶然作用等。根据作用的特点，识别与设计使用年限有关的作用，分析国内外规范中的有关规定，以现有统计资料为基础，通过理论分析，依据等超越概率原则，研究确定了设计使用年限大于 50 年的作用标准值的取值或计算方法。

3.1　自重力和施工荷载

结构自重力在结构建成后即为一个确定的值，不随时间变化，所以不需对其标准值进行调整，与设计使用年限无关。施工荷载会随时间变化，现行规范中规定的施工荷载标准值已经考虑了施工阶段的变化，设计使用年限延长与施工阶段无关。因此，结构自重力和施工荷载均按现行规范确定。

3.2　堆货荷载和人群荷载

堆货荷载和人群荷载在设计使用年限内其值随时间变化，且变化与其平均值相比不可忽略，属于可变荷载。当结构设计使用年限大于 50 年时，应对堆货荷载的标准值进行调整。由概率分析得到可变作用等超越概率下的设计使用年限调整系数 γ_L，见式(1)。

$$\gamma_L = \frac{F_{Q_T}^{-1}\{[F_{Q_T}(Q_k)]^{T_L/T}\}}{Q_k} \tag{1}$$

式中：T_L 为结构设计使用年限；T 为设计基准期；Q_k 为荷载标准值；$F_{Q_T}(\cdot)$ 为设计使用年限 T_L 内可变荷载的最大值概率分布函数；$F_{Q_T}^{-1}(\cdot)$ 为 $F_{Q_T}(\cdot)$ 的反函数。

根据荷载统计参数计算集装箱荷载以外的码头堆货荷载和人群荷载设计使用年限调整系数 γ_L，见表 1。设计使用年限处于表中档次之间时，可按线性内插确定。集装箱装载和堆存可控性较好，荷载不确定性相对较小，因此不考虑设计使用年限调整系数。

表 1　码头堆货荷载和人群荷载设计使用年限调整系数 γ_L

Tab. 1　Design service life adjustment coefficients of wharf surcharge and pedestrian loads

结构设计使用年限/a	50	75	100	120
γ_L	1.00	1.05	1.10	1.15

3.3　起重运输机械荷载

普通流动起重机、除港口大型机械外的运输机械，荷载主要受自身重力、载运荷载、实际工况等影响，因此荷载基本不受设计使用年限限制，对设计使用年限 50 年以上港口工程与现有规范保持一致。

港口大型机械，特别是岸边装卸船机，在强风以及非工作状态下的荷载通常大于工作状态下的荷载。对于新建、改建、扩建的沿海码头按所在地 50 年一遇最大风速设防，并要求最低按照 55 m/s 风速设防，起重机设计规范均按此进行规定。因此，对于设计使用年限 50 年以上港口工程大型机械荷载标准值，在工作状态下，与现有规范保持一致；非工作状态下，采用与设计使用年限相对应重现期的风荷载计算确定。

3.4　铁路列车荷载

JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》[7]规定，铁路列车竖向荷载标准值必须采用中-活荷载。铁路行业荷载设计基准期为 100 年，根据列车荷载的概率分布和统计参数对不同设计使用年限的铁路荷载调整系数进行分析，设计使用年限为 110 年时，调整系数为 1.006，使用年限为 120 年时，调整系

水运工程

数为 1.011，为便于应用，铁路列车荷载不考虑设计使用年限调整系数，按现行 TB/T 3466—2016《铁路列车荷载图式》[8]确定。

3.5　汽车荷载

汽车荷载标准值一般根据相应码头需求的车辆具体荷载确定。港口工程的车辆荷载一般为重车荷载或特种荷载，车辆装载比较稳定，运输方式与公路上的汽车也不同，时间影响不大，但随着发展新车型出现的可能性较大，因此规定汽车荷载标准值应根据现状车型和未来发展趋势论证确定。

3.6　船舶荷载

对于环境荷载所引起的船舶荷载，与船舶实际可能遇到的系泊标准有关；对于系缆点的设计荷载，则由缆绳破断力作为其界值，两者均与设计使用年限无关。考虑到设计使用年限 50 年以上的码头结构，在掩护条件不良或受过往船只船行波影响的条件下，出现超越泊稳标准而导致绞盘刹车失效引起缆绳破断的情况可能性增大，因此将其作为非正常状况，对系缆结构安全性进行核算。

3.7　风荷载

风荷载标准值计算与风荷载体型系数、风压高度变化系数和基本风压有关。现行规范采用重现期为 50 年的基本风压。设计使用年限不同时，应选取重现期为设计使用年限的基本风压。当地有 25 年以上的最大风速实测资料时，应通过统计分析确定；当地年最大风速资料不足 25 年时，宜与附近地区有长期资料或有规定基本风压的风压值进行对比后确定。缺乏实测资料时，提供不同重现期的风压比值。

3.8　冰荷载

冰荷载计算中，与设计使用年限有关的参数主要包括单层平整冰计算冰厚、冰的单轴抗压强度标准值和冰的弯曲强度标准值，建议根据多年统计实测资料按不同重现期取值，重现期不应小于结构设计使用年限。

3.9　水流力

水流力计算中，与设计使用年限有关的参数为设计流速。水流设计流速应取建筑物所处范围内，且在结构设计使用年限内可能出现的最大流速，该流速可采用最大平均流速，也可根据相应表面流速推算。对于海港工程，海流可能最大流速可取潮流可能最大流速与风海流可能最大流速的矢量和；对于河港工程，设计流速的确定应符合现行 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》[9]的有关规定。

3.10　波浪力

波浪力属于自然荷载，根据重现期确定波浪设计参数，对应于设计使用年限 50 年以上时的重现期按等超越概率原则确定。

码头结构设计应选取与设计使用年限对应的波浪重现期标准确定波浪要素。与设计使用年限对应的波浪重现期按式(2)确定。

$$T_{RL}/T_R = T_L/T \tag{2}$$

式中：T_{RL} 为与设计使用年限 T_L 对应的重现期，a；T_R 为与设计基准期 T 对应的重现期，a；T_L 为结构设计使用年限，a；T 为设计基准期，取 50 年。

参考国外相关标准并总结国内外有关工程经验，提出了防波堤和护岸结构设计所采用的设计波浪标准。英国标准规定，防波堤波浪重现期确定根据损坏后果和经济成本进行平衡，建议结构稳定性按设计使用年限内 5%超越概率的波浪进行校核，该情况下可以接受一定破坏。日本标准规定防波堤结构的波浪重现期，综合设计使用年限、工程重要性和工程位置的自然条件合理确定，如果超越概率小于 30%，则重现期需要取 3 倍设计使用年限。工程实践中，设计使用年限为 50 年的防波堤，设计波浪标准有采用 475 年重现期校核的实例。因此规定防波堤和护岸结构设计应综合考虑损坏后果、经济成本和维护条件，经论证分析后确定设计波浪标准。波浪重现期可取 1～3 倍

水运工程

设计使用年限，特别重要的防波堤结构，波浪重现期可取 3 倍设计使用年限以上。

3.11 土压力

土压力分为土体自重力引起的土压力和码头面可变荷载引起的土压力，前者属于永久作用，不需考虑对土压力进行调整；后者的调整系数与相应可变作用保持一致，采用与设计使用年限相对应的可变作用标准值进行计算。

3.12 地震作用

水运工程抗震设计中常用的地震动参数主要包括水平向地震动峰值加速度和水平向地震系数。建议首先通过场地地震危险性分析确定地震动参数，与现行水运工程抗震设计规范相协调，采用设计使用年限内超越概率 10% 的地震动参数。无地震危险性分析结果时，可以采用设计使用年限调整系数进行计算。根据烈度的概率分布，计算分析不同设计使用年限下对应的地震动峰值加速度和水平向地震系数。为便于应用，以 50 年为基础，给出不同设计使用年限的地震动参数调整系数，按式(3)计算不同设计使用年限下对应的地震动参数。

$$A_T = \gamma_{LE} A \tag{3}$$

式中：A_T 为不同设计使用年限对应的地震动参数；γ_{LE} 为考虑设计使用年限的地震动参数调整系数，当设计使用年限为 75 年时取 1.20，当设计使用年限为 100 年时取 1.30，当设计使用年限为 120 年时取 1.40；A 为设计使用年限 50 年的地震动参数，按现行 JTS 146—2012《水运工程抗震设计规范》[10]的有关规定取值。

3.13 温度作用

现行港口工程结构设计规范中尚无温度作用计算规定。设计使用年限 50 年以上时，参考 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》[11]和 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》[12]，结合港口工程结构特点，提出温度作用计算规定。需要考虑温度作用主要指温度变化对结构应力和变形影响较大的情况，如分段长度较大的高桩结构。对于港口工程结构，均匀温度作用对结构影响最大，其取值和计算方法较为成熟。对梯度温差和非线性变化的温度作用的取值和计算目前尚没有较为成熟统一的方法，因此，仅对均匀温度作用做出规定，其他情况参考有关文献或根据设计经验酌情处理。

3.14 外加位移和变形

外加位移和变形是指由地面、地基、岸坡变形等作用引起的结构或构件的位移和变形。国内外有关规范均未明确变形和位移对结构影响的具体规定。从概念上讲，位移、变形最大值出现概率均与年限有关，因此其具体取值应考虑设计使用年限的影响。对于设计使用年限内可能出现外加位移和变形的情况，应根据结构设计使用年限内可能出现的最大位移或变形值进行结构分析，宜考虑结构与地基相互作用，其引起的作用效应可作为永久作用参与作用效应组合。

3.15 水位

港口工程结构设计水位按确定方法可分为两类：一类是按某高低潮累积频率或历时保证率选取的水位，另一类是按某一重现期选取的极值水位。按某累积频率或历时保证率选取的水位，如海港工程中的设计高、低水位，河港工程中设计低水位和按照多年历时保证率确定的设计高水位，该类水位在设计年限时间段内基本无变化，与设计使用年限无关。按某一重现期选取的极值水位，如海港工程中的极端高、低水位，河港工程中按某一重现期确定的设计高水位，水位重现期标准不同时，此类极值水位数值变化较大。

因此，海港工程中的设计高水位和设计低水位、河港工程中设计低水位，按现行 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》的有关规定确定。海港工程中的极端高水位和极端低水位，按不小于结构设计使用年限的重现期对应的设计水位确定，其中直接掩护罐区的护岸防浪墙顶高程确定时，

水运工程

极端高水位重现期应按式(2)确定。河港工程中设计高水位按照多年历时保证率确定时，多年历时保证率应按现行 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》的有关规定确定；按重现期确定时，重现期应按式(2)确定。

3.16　偶然作用

偶然作用是指在设计使用年限内不一定出现，而一旦出现其量值很大，且持续期很短的事故作用，如非正常撞击、爆炸、火灾等，目前没有合适的概率模型，一般通过协议确定设计值。港口工程结构设计中，有特殊要求时考虑偶然作用。

4　混凝土结构耐久性设计基本措施

港口工程结构耐久性影响因素复杂，调查表明，氯盐腐蚀引起的钢筋锈蚀破坏，是我国海水环境混凝土结构最严重、最普遍的破坏形式。淡水环境混凝土耐久性主要受到水流冲刷、大气中腐蚀气体，以及受冻地区的冻融循环作用等。我国沿海海水环境及大部分内陆地区的内河环境，由于水中腐蚀性化学物质含量相对较少，一般不存在化学腐蚀问题，但在地下水丰富的西部地区或受到污染的地区，可能会存在水中的硫酸盐和酸类等物质，这些物质对混凝土的腐蚀主要是化学腐蚀以及盐类侵入混凝土也有可能产生盐结晶的物理腐蚀。

在分析研究其他行业标准的基础上，通过对典型工程的调研，提出以上环境下钢筋的混凝土保护层厚度、混凝土强度等级、混凝土水胶比最大允许值、混凝土抗冻耐久性指数和混凝土的抗氯离子渗透性指标层厚度等规定作为设计使用年限 50 年以上时结构耐久性设计的基本要求。

4.1　混凝土保护层厚度

钢筋的混凝土保护层厚度对混凝土结构耐久性影响较大，JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》和 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》[13]中，针对设计使用年限为 50 年的混凝土结构，均从耐久性角度对其最小厚度做了规定。通过对国内外有关规范的分析，针对海水环境、淡水环境和化学腐蚀环境，在现行 50 年设计使用年限对混凝土保护层厚度规定的基础上，均增加 5 mm 作为设计使用年限 50 年以上时混凝土保护层厚度的基本要求。

4.2　混凝土最低强度等级和水胶比最大允许值

参考国内有关规范，按耐久性要求的混凝土最低强度等级，针对海水环境下普通混凝土、淡水环境和中等化学腐蚀的混凝土结构，在设计使用年限为 50 年时相应规定的基础上，提高 1 个等级作为设计使用年限 50 年以上时混凝土最低强度等级的基本要求。减小了海水环境部分条件、淡水环境和中等化学腐蚀下的水胶比，作为设计使用年限 50 年以上时混凝土水胶比最大允许值的基本要求。

4.3　混凝土抗冻耐久性指数

JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》中对于设计使用年限 50 年的混凝土结构，主要针对抗冻等级做出规定。对于设计使用年限大于 50 年的混凝土结构，其他行业一般以抗冻耐久性指数为控制指标。参考 GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》[14]和 JTG/T 3310—2019《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》[15]，结合我国水运行业有关设计使用年限 100 年工程的实践经验，提出设计使用年限大于 50 年时，对混凝土抗冻耐久性指数的规定。对于设计使用年限为 120 年的工程，因缺乏工程实例，提出进行论证分析确定抗冻耐久性指数的规定。

4.4　混凝土的抗氯离子渗透性指标

我国水运行业对海洋环境氯离子渗透性指标的规定，对于设计使用年限为 50 年的工程，以电通量指标表示；对于设计使用年限 50 年以上的工程，以电迁移试验方法测定的氯离子扩散系数表示。水利和水电行业[16-17]对于设计使用年限大于 50 年的工程，给出了电量指标和氯离子扩散系

水运工程

数限值，国家标准以氯离子扩散系数控制；公路行业对于 30、50 和 100 年的工程，给出了氯离子扩散系数和电通量值。结合我国各行业规范规定和工程调研，立足于现行水运行业规范有效衔接，针对设计使用年限 50 年以上的工程，采用电迁移试验方法测定的氯离子扩散系数作为控制指标，并在现有规范基础上进一步提高控制要求。

5　混凝土结构耐久性定量设计

海水环境和淡水碳化环境下钢筋锈蚀模型研究成果较多，具备耐久性定量设计的条件。而冻融环境、化学腐蚀环境中对结构的腐蚀，至今尚缺乏足够的数据积累和研究成果，国内外未见定量设计方法。以下介绍海水环境和淡水碳化环境下的耐久性设计要点。

5.1　结构耐久性极限状态

针对不同构件特点，对结构耐久性极限状态进行了规定。海水环境和淡水碳化环境下，钢筋混凝土结构以钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝时的状态为耐久性极限状态。海水环境和淡水碳化环境下，采用钢绞线、钢丝的预应力混凝土构件，预应力筋的截面积小、应力高，一旦锈蚀，高应力状态发展速度快，构件呈脆性破坏，后果严重，因此规定以钢筋脱钝作为耐久性极限状态。预应力桩因其位置特殊，一旦发生破坏，后果严重且很难修复，因此规定也以钢筋脱钝作为耐久性极限状态。相较于钢绞线或钢丝，采用螺纹钢筋作为预应力筋的预应力混凝土构件，其应力低、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。因此规定以钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝时的状态为耐久性极限状态。

5.2　海水环境结构设计使用年限校核

5.2.1　设计使用年限校核要求

针对不同构件的耐久性极限状态定义，海水环境和淡水碳化环境中钢筋混凝土结构以及采用螺纹钢筋作为预应力筋的预应力构件，设计使用年限应满足式(4)要求；海水环境和淡水碳化环境中预应力桩基和采用钢绞线、钢丝的预应力混凝土构件，设计使用年限应满足式(5)要求。

$$t_{\mathrm{d}} \leqslant t_{\mathrm{i}} + t_{\mathrm{c}} \tag{4}$$

$$t_{\mathrm{d}} \leqslant t_{\mathrm{i}} \tag{5}$$

式中：t_{d} 为设计使用年限，a；t_{i} 为氯离子侵入混凝土或混凝土碳化导致钢筋发生锈蚀所经历的时间，a；t_{c} 为钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间，a。

5.2.2　海水环境氯离子侵入混凝土导致钢筋发生锈蚀所经历的时间

海水环境氯离子侵入混凝土导致钢筋发生锈蚀所经历的时间可按式(6)和(7)计算，仅介绍重点参数。

$$t_{\mathrm{i}} = t_{\mathrm{s}} + \frac{0.031\,7x^2}{4k_{\mathrm{cl}}D_{\mathrm{cl},0}\left(\frac{t_0}{t_{\mathrm{s}}}\right)^{n_{\mathrm{cl}}}\left[\mathrm{erf}^{-1}\left(1-\frac{c_{\mathrm{cr}}-c_{t_{\mathrm{s}}}}{c_{\mathrm{s}}-c_{t_{\mathrm{s}}}}\right)\right]^2} \tag{6}$$

$$c_{t_{\mathrm{s}}} = c_0 + (c_{\mathrm{s}} - c_0)\left\{1 - \mathrm{erf}\left[\frac{\sqrt{0.031\,7}\,x}{\sqrt{\frac{4k_{\mathrm{cl}}D_{\mathrm{cl},0}t_{\mathrm{s}}}{1-n_{\mathrm{cl}}}\left(\frac{t_0}{t_{\mathrm{s}}}\right)^{n_{\mathrm{cl}}}}}\right]\right\} \tag{7}$$

式中：t_{i} 为氯离子侵入混凝土导致钢筋发生锈蚀所经历的时间，a；t_s 为混凝土氯离子扩散系数衰减至恒定值的时间，a，宜取 20 a；x 为混凝土保护层厚度计算值，mm；k_{cl} 为混凝土氯离子扩散系数影响系数；$D_{\mathrm{cl},0}$ 为 t_0 时刻混凝土的氯离子扩散系数，$10^{-12}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$；$t_0$ 为采用快速氯离子迁移系数法测定氯离子扩散系数时的混凝土龄期，a，取 0.076 7 a(28 d)或 0.153 4 a(56 d)；erf(·)为误差函数；c_{cr} 为混凝土临界氯离子浓度计算值；$c_{t_{\mathrm{s}}}$ 为混凝土氯离子扩散稳定时的氯离子浓度；c_0 为混凝土初始氯离子浓度计算值；c_s 为混凝土表面氯离子浓度计算值；n_{cl} 为混凝土扩散系数龄期因子。

水运工程

混凝土 28 d 快速试验氯离子扩散系数计算值可按式(8)估算，采用 56 d 快速试验氯离子扩散系数时，应对式(8)的计算值乘以系数 $2^{-n_{cl}}$。

$$D_{cl,0} = \gamma_{D,cl} 10^{1.95-1.25\left(\frac{0.32c+0.26F_A+0.42S_G}{w}\right)} \tag{8}$$

式中：$D_{cl,0}$ 为 28 d 混凝土快速试验氯离子扩散系数，$10^{-12}m^2/s$；$\gamma_{D,cl}$ 为混凝土氯离子扩散系数分项系数；c 为每立方米混凝土的凝胶材料中水泥的用量，kg；F_A 为每立方米混凝土的凝胶材料中粉煤灰的用量，kg；S_G 为每立方米混凝土的凝胶材料中粒化高炉矿渣的用量，kg；w 为每立方米混凝土中水的用量，kg。

混凝土氯离子扩散系数影响系数体现结构环境条件、混凝土氯离子渗透性试验方法转换、结构荷载影响。《指南》制定过程中重点对式(9)所示结构荷载影响系数 $k_{f,cl}$ 进行了补充完善。

$$k_{f,cl} = 1 + 2.1(\sigma_q/f_{yk})^3 \tag{9}$$

式中：f_{yk} 为钢筋屈服强度标准值，N/mm^2；σ_q/f_{yk} 为正常使用极限状态准永久组合下，钢筋应力与钢筋屈服强度标准值的比值，或预应力钢筋合力点处混凝土法向应力等于零时的预应力钢筋应力与其屈服强度的比值，可根据构件受力类型进行确定，见表 2。

表 2　构件受力类型及钢筋应力与钢筋屈服强度比值
Tab. 2　Member stress type and value of the ratio of steel stress to steel yield strength

构件与受力类型		σ_q/f_{yk}	
		钢筋混凝土	预应力混凝土
梁、板等受弯构件	1	0.6	–
	2	0.4	0.2
	3	0.2	−0.1
桩	1	0.3	0.1
	2	−0.4	−0.5

针对海港工程中常见的梁、板和桩，以钢筋应力比 σ_q/f_{yk} 体现荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响。钢筋混凝土受弯构件的配筋一般由横向裂缝宽度控制，横向裂缝宽度与钢筋应力和混凝土应力成正比。对于一般的受弯构件，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，相对应力 σ_q/f_{yk} 基本为 0.6，如表 2 中的“1”类构件，荷载经常达到限值，设计控制荷载持续时间较长，因此相对应力 σ_q/f_{yk} 取为 0.6；对于“3”类构件，设计的控制荷载出现的概率较小，作用于结构的时间较短，在服役期的大部分时间内结构均处于低应力状态，经过校准计算，相对应力 σ_q/f_{yk} 取为 0.2；处于两者之间的“2”类构件，取为 0.4。对于预应力混凝土受弯构件，“2”类和“3”类分别指裂缝控制等级为二级和一级的构件。对于钢筋混凝土桩，“1”类指偏心受拉构件，“2”类指偏心受压构件。对于预应力混凝土桩，“1”类和“2”类分别指裂缝控制等级为二级和一级的构件。

5.2.3　钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间

钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间可按式(10)计算：

$$t_c = \left(\frac{p}{0.014 i_{c0}}\right)^{1.4} \tag{10}$$

式中：t_c 为钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间，a；p 为混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的临界锈蚀深度，mm；i_{c0} 为钢筋初锈时的电流密度，$\mu A/mm^2$。

钢筋初锈时的电流密度可按式(11)计算：

$$i_{c0} = \frac{72.0k_{co}\left(1-\frac{w}{c+2.1F_A+3.4S_G}\right)^{-1.64}}{x} \tag{11}$$

式中：k_{co} 为钢筋锈蚀环境条件影响系数；w 为每立方米混凝土中水的用量，kg；x 为混凝土保护层厚度设计值，mm。

5.3　淡水环境结构使用年限校核

5.3.1　混凝土碳化导致钢筋发生锈蚀所经历的时间

国内外提出多种混凝土碳化公式，各公式的表达形式差异显著。考虑国内目前缺少混凝土碳化速率的标准试验方法，且加速碳化试验方法与自然暴露碳化速率相关性的研究成果不足，参考 GB/T 51355—2019《既有混凝土结构耐久性评定标准》[18]提出碳化模型，见式(12)。在混凝土碳

化残量计算中，针对港口工程特点提出了局部环境系数的取值范围。

淡水环境混凝土碳化导致钢筋发生锈蚀所经历的时间可按式(12)计算。

$$t_i = \left(\frac{x - x_0}{k}\right)^2 \tag{12}$$

式中：t_i 为碳化作用下钢筋开始锈蚀所经历的时间，a；x_0 为碳化残量，mm；k 为混凝土碳化系数，mm/$\sqrt{a}$。

5.3.2　钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间

碳化环境钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝的时间预测模型有多种表达形式，《指南》参考JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》和DuraCrete，*Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures*[19] 的锈胀开裂模型，计算见式(13)。

$$t_c = \frac{p}{w_t V} \tag{13}$$

式中：w_t 为湿度等效时间系数；V 为腐蚀速率，mm/a。

5.4　挠度验算

针对钢筋混凝土构件的承载力和刚度退化规律的研究表明，当钢筋混凝土受弯构件达到设计使用年限时，由于钢筋锈蚀导致的承载力幅度变化较小，而对钢筋混凝土受弯构件变形的影响较大，因此规定对钢筋混凝土受弯构件应进行考虑刚度退化后的挠度验算。在国内有关研究成果[20]的基础上，给出了锈蚀钢筋混凝土受弯构件刚度降低系数，见式(14)和(15)。

$$\alpha(\eta_s) = 0.45e^{-\eta_s/0.05} + 0.55 \tag{14}$$

$$\eta_s = \frac{0.056 i_{c0} \cdot (t_d - t_i)^{0.71}}{d} \tag{15}$$

式中：$\alpha(\eta_s)$ 为锈蚀引起的钢筋混凝土构件刚度降低系数；η_s 为锈蚀纵向钢筋的锈蚀率，不大于 0.25；i_{c0} 为钢筋初锈时的电流密度；t_d 为结构设计使用年限，a；t_i 为钢筋开始腐蚀阶段所经历的时间，a；d 为锈蚀纵向钢筋的等效直径，mm。

6　钢结构耐久性设计

钢结构按钢构件腐蚀平均截面积损失达到设计预留的腐蚀裕量时的状态为耐久性极限状态。钢结构采用防腐蚀措施时，结构设计应留有适当的腐蚀裕量，钢结构不同部位的单面腐蚀裕量可按式(16)计算。式中考虑了阴极保护参与钢结构设计使用年限的计算，阴极保护措施包括牺牲阳极和外加电流阴极保护。

$$\Delta\delta = K[(1-P)t_1 + (t - t_1)] \tag{16}$$

式中：$\Delta\delta$ 为钢结构单面腐蚀裕量，mm；K 为钢结构单面平均腐蚀速度，mm/a；P 为保护效率，%，涂层、金属热喷涂及包覆有机复合层在其设计年限内可取 50%～95%，阴极保护取不小于 90%；t_1 为防腐蚀措施的设计保护年限，a；t 为钢结构的设计使用年限，a。

7　结构设计框架

设计使用年限 50 年以上港口工程结构设计框架见图 1。该设计框架的核心流程为：首先根据工程使用要求或全寿命成本分析，确定结构的设计使用年限；其次进行技术经济比较综合分析选定结构形式，根据设计使用年限要求确定作用标准值，进行结构作用效应计算；再次进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计；最后进行结构耐久性定量设计。

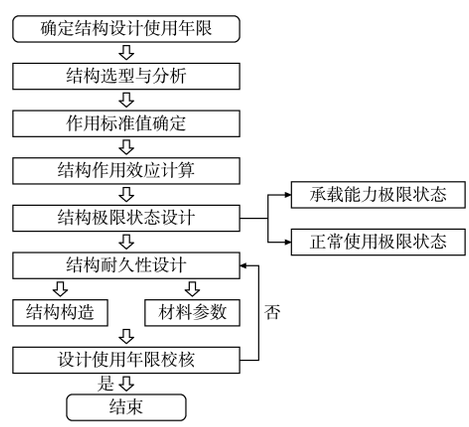

图 1　设计使用年限 50 年以上港口工程结构设计框架

Fig. 1　Design framework of port engineering structures with design service life greater than 50 years

水运工程

设计关键环节之一是对可变作用标准值进行设计使用年限调整。将现行 50 年基准期的标准值调整为与设计使用年限相匹配的取值；对于结构自重力、施工荷载等与年限无关的作用，仍按现行规范取用。关键环节之二是针对耐久性进行设计使用年限校核。对于海水环境混凝土结构，计算钢筋初始锈蚀时间和锈蚀诱发保护层开裂时间；对于淡水碳化环境，计算碳化深度和钢筋锈蚀发展过程；对于钢结构，根据采取的防腐蚀附加措施，通过腐蚀余量公式进行设计。此外，还需考虑刚度退化因素，对锈蚀后的钢筋混凝土受弯构件进行挠度验算。

综上，设计使用年限 50 年以上港口工程结构设计以现有标准体系为基础，在遵循现有设计框架和设计方法的前提下，针对使用年限延长带来的技术问题进行专项研究和补充规定，同时注重《指南》的可操作性。

8　结语

1）明确港口工程结构延长设计使用年限的适用范围。对设计使用年限有特殊要求、具有重要战略意义或重要经济意义的码头、防波堤等港口工程主体结构，可适当提高结构的设计使用年限，取 50 年以上，其设计使用年限可根据使用要求或全寿命成本最优确定。

2）建立设计使用年限 50 年以上港口工程结构的作用标准值确定方法。对于堆货荷载、人群荷载等使用荷载，设计使用年限为 75、100 和 120 年时，调整系数分别为 1.05、1.10 和 1.15；对于波浪、风、地震等自然作用，规定了按设计使用年限对应重现期确定标准值的方法；对于结构自重力等与设计使用年限无关的作用，维持现行标准取值不变。

3）针对不同构件特点，进一步明确了可用于定量设计的结构耐久性极限状态。海水环境和淡水碳化环境下，钢筋混凝土结构以钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝时的状态为耐久性极限状态；海水环境和淡水碳化环境下，预应力桩基和采用钢绞线、钢丝的预应力混凝土构件，以氯离子侵入混凝土或混凝土碳化导致预应力筋发生锈蚀时的状态为耐久性极限状态；采用螺纹钢筋作为预应力筋的预应力构件以钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝时的状态为耐久性极限状态。

4）提出海水环境和淡水碳化环境下混凝土结构耐久性定量设计方法。建立了考虑材料组成、应力水平和环境因素影响的氯离子扩散系数计算公式，提出使用年限校核方法；建立了淡水碳化环境下的耐久性设计表达式。同时，提出锈蚀后钢筋混凝土受弯构件刚度退化系数和挠度计算方法。

5）构建设计使用年限 50 年以上港口工程结构的设计框架。以现行可靠度设计体系为基础，通过作用标准值调整和耐久性定量校核，实现设计使用年限从 50 年向更长年限的过渡，为《指南》的工程应用提供了清晰的技术路线。

6）设计使用年限延长至 50 年以上涉及多种复杂因素的耦合作用，目前对混凝土化学腐蚀环境下的耐久性定量设计、更高使用年限(如 120 年以上)的长期性能演化规律等方面的研究尚不充分，建议在后续研究中加强相关基础数据的积累和理论模型的完善。

参考文献：

[1] Maritime works-Part1-2: General. Code of practice for assessment of actions: BS 6349-1-2: 2016+A1: 2017[S]. London: BSI Standards Limited, 2017.

[2] Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan [S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2020.

[3] 港口工程结构可靠性设计统一标准: GB 50158—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Unified standard for reliability design of port engineering structures: GB 50158-2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

[4] 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Standard for durability design of port and waterway

engineering structure: JTS 153-2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.

[5] 设计使用年限 50 年以上港口工程结构设计指南: JTS/T 200—2023[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2024.
Guidance for design of port engineering structures with design service life greater than 50 years: JTS/T 200-2023[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2024.

[6] 杨国平, 李荣庆. 提高港口工程结构设计使用年限的可行性研究[J]. 水运工程, 2019(2): 28-33, 45.
YANG G P, LI R Q. Feasibility of improving design working life of port engineering structure [J]. Port & waterway engineering, 2019(2): 28-33, 45.

[7] 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
Load code for harbour engineering: JTS 144-1-2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2010.

[8] 铁路列车荷载图式: TB/T 3466—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Train load diagram: TB/T 3466-2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[9] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015(2022 版)[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015 (2022ed.) [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.

[10] 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
Code for seismic design of water transport engineering: JTS 146-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

[11] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Load code for the design of building structures: GB 50009-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[12] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60-2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.

[13] 水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Design code for concrete structures of port and waterway engineering: JTS 151-2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.

[14] 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for design of concrete structure durability: GB/T 50476-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[15] 公路工程混凝土结构耐久性设计规范: JTG/T 3310—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Code for durability design of concrete structures in highway engineering: JTG/T 3310-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[16] 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范: SL 654—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
Code for rational service life and durability design of water resources and hydropower projects: SL 654-2014[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.

[17] 水工混凝土结构设计规范: DL/T 5057—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
Design specification for hydraulic concrete structures: DL/T 5057-2009 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

[18] 既有混凝土结构耐久性评定标准: GB/T 51355—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for durability assessment of existing concrete structures: GB/T 51355-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[19] DuraCrete. Probabilistic performance based durability design of concrete structures: general guidelines for durability design and redesign[R]. Gouda: CUR, 2000.

[20] 杨国平, 贡金鑫, 吴锋, 等. 港口工程钢筋混凝土结构性能退化模型研究[J]. 水运工程, 2015(2): 60-65.
YANG G P, GONG J X, WU F, et al. Performance degradation mode of RC structure for port engineering[J]. Port & waterway engineering, 2015(2): 60-65.

(本文编辑 赵娟)

水运工程