

中华人民共和国行业标准

设计使用年限 50 年以上 港口工程结构设计指南

JTS/T 200—2023

主编单位：中交水运规划设计院有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

施行日期：2024 年 3 月 1 日

人民交通出版社股份有限公司

2024 · 北京

交通运输部关于发布 《设计使用年限 50 年以上 港口工程结构设计指南》的公告

2023 年第 65 号

现发布《设计使用年限 50 年以上港口工程结构设计指南》(以下简称《指南》)。《指南》为水运工程建设推荐性行业标准,标准代码为 JTS/T 200—2023,自 2024 年 3 月 1 日起施行。

《指南》由交通运输部水运局负责管理和解释,实施过程中具体使用问题的咨询,由主编单位中交水运规划设计院有限公司答复。《指南》文本可在交通运输部政府网站水路运输建设综合管理信息系统“水运工程行业标准”专栏(mwtis.mot.gov.cn/syportal/sybz)查询和下载。

特此公告。

中华人民共和国交通运输部

2023 年 12 月 29 日

制定说明

本指南是根据 2020 年度水运工程标准编制计划要求,由交通运输部水运局组织有关单位经深入调查研究、广泛征求意见、不断修改完善,编制而成。

我国港口工程建设经过多年发展,在港口工程结构设计方面积累了成熟的经验,对保障我国永久性港口工程满足设计使用年限 50 年的要求起到了重要作用。随着设计使用年限 50 年以上的工程建设需求的进一步增加,为指导设计使用年限 50 年以上的港口工程结构设计,在总结国内外相关实践经验的基础上,结合港口工程结构特点,制定本指南。

本指南共分 7 章 3 个附录,并附条文说明,主要包括作用、结构选型与分析、极限状态设计和耐久性设计等技术内容。

本指南主编单位为中交水运规划设计院有限公司,参编单位为大连理工大学、中交四航工程研究院有限公司、中交第四航务工程局有限公司、中交上海三航科学研究院有限公司和天津大学。本指南编写人员分工如下:

- 1 总则:杨国平 胡家顺
 - 2 术语:李荣庆 杨国平
 - 3 基本规定:杨国平 胡家顺 李荣庆
 - 4 作用:胡家顺 贡金鑫 杨国平 李荣庆 吴哲丰 任增金 陈际丰 陈志乐
张立斌 王安华 储小欢 施 凌 吕亭豫 檀会春
 - 5 结构选型与分析:胡家顺 杨国平 李荣庆 王元战
 - 6 极限状态设计:杨国平 胡家顺 李荣庆
 - 7 耐久性设计:杨国平 贡金鑫 胡家顺 王胜年 范志宏 李荣庆 吴 锋
- 附录 A:贡金鑫 李荣庆
附录 B:范志宏 李荣庆
附录 C:檀会春

本指南于 2023 年 10 月 19 日通过部审,2023 年 12 月 29 日发布,自 2024 年 3 月 1 日起施行。

本指南由交通运输部水运局负责管理和解释。各单位在执行过程中发现的问题和意见,请及时函告交通运输部水运局(地址:北京市建国门内大街 11 号,交通运输部水运局技术管理处,邮政编码:100736)和本指南管理组(地址:北京市东城区国子监街 28 号,中交水运规划设计院有限公司,电话:010-84199239,邮政编码:100007),以便修订时参考。

目 次

1	总则	(1)
2	术语	(2)
3	基本规定	(3)
4	作用	(5)
4.1	一般规定	(5)
4.2	堆货荷载和人群荷载	(5)
4.3	起重运输机械荷载	(5)
4.4	铁路列车荷载	(6)
4.5	汽车荷载	(6)
4.6	船舶荷载	(6)
4.7	风荷载	(6)
4.8	冰荷载	(7)
4.9	水流力	(7)
4.10	波浪力	(7)
4.11	土压力	(8)
4.12	地震作用	(8)
4.13	温度作用	(8)
4.14	外加位移和变形	(9)
4.15	水位	(10)
4.16	偶然作用	(10)
5	结构选型与分析	(11)
5.1	结构选型	(11)
5.2	结构分析	(11)
6	极限状态设计	(13)
6.1	一般规定	(13)
6.2	承载能力极限状态	(13)
6.3	正常使用极限状态	(14)
7	耐久性设计	(15)
7.1	一般规定	(15)
7.2	混凝土结构	(16)
7.3	钢结构	(29)

7.4 维护要求	(31)
附录 A 海水环境混凝土结构设计使用年限校核算例	(34)
A.1 设计条件	(34)
A.2 使用年限计算	(34)
A.3 设计使用年限校核	(36)
附录 B 淡水碳化环境混凝土结构设计使用年限校核算例	(37)
B.1 设计条件	(37)
B.2 使用年限计算	(37)
B.3 设计使用年限校核	(38)
附录 C 本指南用词说明	(39)
引用标准名录	(40)
附加说明 本指南主编单位、参编单位、主要起草人、主要审查人、总校人员 和管理组人员名单	(41)
条文说明	(43)

1 总 则

1.0.1 为指导设计使用年限 50 年以上的港口工程结构设计,做到安全可靠、耐久适用、技术先进和经济合理,制定本指南。

1.0.2 本指南适用于设计使用年限 50 年以上的新建港口工程主体结构设计。

1.0.3 设计使用年限 50 年以上的港口工程结构设计除应执行本指南的规定外,尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 设计使用年限 Design Service Life

设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按预定目的使用的年限。

2.0.2 耐久性极限状态 Durability Limit State

结构或构件因耐久性损伤造成某项性能降低或丧失而不能满足要求的极限状态。

2.0.3 抗冻耐久性指数 Freeze-thaw Resistance Factor

采用标准试验方法、经规定次数快速冻融循环后混凝土的动弹性模量与初始动弹性模量的比值,通常以百分数表示。

2.0.4 耐久性定量设计 Quantitative Durability Design

以结构耐久性极限状态为准则,根据结构所处环境条件和使用荷载条件,通过结构、材料和构造等参数与使用年限的关系,计算验证预定条件下结构可以达到的设计使用年限。

3 基本规定

3.0.1 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。

3.0.2 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。

3.0.3 结构不可更换构件的设计使用年限应与结构设计使用年限相同,可更换构件的设计使用年限可低于结构的设计使用年限,并应在设计文件中明确规定。

3.0.4 结构在设计使用年限内应满足下列功能要求:

- (1)在正常施工和正常使用时,能安全承受设计规定的各种作用;
- (2)在正常使用时具有良好的工作性能;
- (3)在正常维护下具有足够的耐久性能;
- (4)在设计地震状况下主体结构不丧失承载能力;
- (5)有特殊要求时,在发生设定的偶然事件下,主体结构仍能保持整体稳定。

3.0.5 港口工程结构设计应遵守下列原则:

- (1)选择合适结构形式;
- (2)合理选择结构体系,正确进行分析和设计;
- (3)执行质量控制标准;
- (4)做好耐久性和维护设计;
- (5)采取有效的防护措施。

3.0.6 港口工程结构设计时,应分析下列因素对结构耐久性的影响:

- (1)预期的使用要求;
- (2)预估的环境条件;
- (3)材料和制品的性能;
- (4)结构体系的选择;
- (5)构件形状和结构细部构造;
- (6)施工质量和控制水平;
- (7)特殊的保护措施;
- (8)设计使用年限内要进行的维护。

3.0.7 港口工程结构设计宜采用以概率理论为基础、以分项系数表达的极限状态设计方法,有条件时可直接采用可靠指标设计方法。

3.0.8 设计应对勘测、观测、试验、施工、使用等提出相应的质量控制要求,并应提出结构在使用期的定期检测和维护技术要求。

3.0.9 港口工程结构设计时,应根据结构失效可能产生的危及人的生命安全、造成经济损失以及影响社会和环境等后果的严重程度采用不同的安全等级。港口工程结构安全等级的划分应符合表 3.0.9-1 的规定。不同结构安全等级的重要性系数,不应小于表 3.0.9-2 中的数值。

表 3.0.9-1 港口工程结构的安全等级

安全等级	失效后果	适用范围
一级	很严重	有特殊安全要求的结构
二级	严重	一般港口工程结构
三级	不严重	临时性港口工程结构

表 3.0.9-2 不同结构安全等级的重要性系数

结构安全等级	一级	二级	三级
重要性系数 γ_0	1.1	1.0	0.9

注:①安全等级为一级的港口工程结构,当对安全有特殊要求时, γ_0 可适当提高;

②自然条件复杂、维护有困难时, γ_0 可适当提高。

3.0.10 港口工程结构与其组成部分宜取相同的安全等级,必要时可提高其中某些结构构件的重要性系数。

3.0.11 码头结构的构造应符合现行行业标准《码头结构设计规范》(JTS 167)的有关规定;防波堤与护岸结构的构造应符合现行行业标准《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154)的有关规定。

3.0.12 码头附属设施设计应以使用安全、方便且便于维护等为原则,并应符合现行行业标准《码头附属设施技术规范》(JTS 169)的有关规定。

3.0.13 环境对材料、岩土、构件和结构性能的影响无法忽略时,应在结构安全性和耐久性等设计中根据其产生的影响采取相应措施,有条件时应进行定量分析。

3.0.14 码头和防波堤应合理设置永久观测点,宜采用自动化手段进行健康监测。观测点的布置应根据观测要求、建筑物结构形式和所处的自然环境确定,并能全面反映建筑物的工作状态。观测应符合现行行业标准《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235)的有关规定;健康监测应符合现行行业标准《港口水工建筑物结构健康监测技术规范》(JTS/T 312)和《水运工程自动化监测技术规范》(JTS/T 305)的有关规定。

3.0.15 结构设计应结合使用要求等,提出垂直位移和水平位移的控制要求。

3.0.16 设计应提出在码头、防波堤和护岸结构施工过程中采取必要防护措施的要求。

4 作用

4.1 一般规定

4.1.1 确定设计使用年限 50 年以上港口工程结构上的作用,应考虑港口的发展,留有适当的余地。

4.1.2 港口工程结构设计时,应考虑结构上可能出现的各种直接作用和间接作用。

4.1.3 港口工程结构上的作用按随时间的变化可分为永久作用、可变作用和偶然作用。永久作用应包括自重力、预加应力、由土重力和永久荷载引起的土压力、固定水位的静水压力和浮托力等;可变作用应包括堆货荷载、人群荷载、起重运输机械荷载、铁路列车荷载、汽车荷载、载货缆车荷载、船舶荷载、风荷载、冰荷载、水流力、波浪力、可变作用引起的土压力、水位变化引起的作用、施工荷载等。

4.1.4 施工荷载应根据码头的结构形式并结合施工条件、施工工艺和设备等综合确定。

4.1.5 自重力应以标准值作为代表值。自重力的标准值可按结构的设计尺寸和材料的平均密度、固定设备的质量计算确定。

4.2 堆货荷载和人群荷载

4.2.1 码头集装箱荷载标准值应符合现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)的有关规定。

4.2.2 除集装箱荷载外,码头堆货荷载和人群荷载的标准值宜按现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)规定的数值乘以设计使用年限调整系数确定。设计使用年限调整系数可按表 4.2.2 采用。

表 4.2.2 码头堆货荷载和人群荷载设计使用年限调整系数 γ_L

结构设计使用年限(年)	50	75	100	120
γ_L	1.00	1.05	1.10	1.15

注:设计使用年限处于表中档次之间时,可按线性内插确定。

4.3 起重运输机械荷载

4.3.1 起重运输机械荷载标准值应根据装卸工艺选用的机型和实际使用的起重量、幅度等确定。

4.3.2 缺乏实际资料时,港口大型机械荷载标准值应符合下列规定。

4.3.2.1 工作状态下的荷载标准值可按现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)

取值。

4.3.2.2 非工作状态下的荷载标准值,应采用与设计使用年限相对应重现期的风荷载计算确定。

4.3.3 缺乏实际资料时,普通流动起重机械和除港口大型起重机械外的起重运输机械荷载标准值可按现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)取值。

4.4 铁路列车荷载

4.4.1 铁路列车荷载标准值可按现行行业标准《铁路列车荷载图式》(TB/T 3466)确定。

4.4.2 码头结构可不考虑由列车产生的离心力、制动力和牵引力。港内高架栈桥结构所受的离心力、制动力和牵引力,应符合现行行业标准《铁路桥涵设计规范》(TB 10002)的有关规定。

4.5 汽车荷载

4.5.1 汽车荷载标准值可按现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)确定,必要时应根据现状车型和未来发展趋势论证确定。

4.5.2 车辆在码头上的布置方式,应按其可能出现的情况进行排列。

4.5.3 汽车荷载的冲击系数,透空式码头结构可取 1.1~1.3,装载钢铁或用抓斗装载散货时,冲击系数应取大值;实体式码头结构可不计冲击系数。

4.5.4 对引桥或栈桥结构,汽车引起的制动力和离心力,可参照现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)的有关规定,并结合港口的具体情况适当降低。

4.6 船舶荷载

4.6.1 船舶荷载计算方法应符合现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)的有关规定。

4.6.2 对于掩护条件不良或受过往船只船行波影响明显的码头,系缆结构设计应考虑正常工况和非正常工况,并应符合下列规定。

4.6.2.1 正常工况计算方法应符合现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)的有关规定。

4.6.2.2 非正常工况下,系缆力标准值应基于系泊点缆绳的破断力进行计算,分项系数取 1.0。

4.6.2.3 对于开敞式码头,单个系泊点上布置多个快速脱缆钩时,设计时应根据船舶上配置的缆绳绞车考虑非正常工况。资料不足时,可考虑 2 根缆绳同时达到破断力,其余缆绳达到船舶绞车刹车荷载,刹车荷载可取缆绳破断力的 0.6 倍。

4.7 风荷载

4.7.1 计算风荷载所用的基本风压应选取重现期为设计使用年限的基本风压,基本风压的确定应符合下列规定。

4.7.1.1 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。

4.7.1.2 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。

4.7.1.3 缺乏实测资料时,可按表 4.7.1 根据不同重现期风压比值确定。

表 4.7.1 不同重现期的风压比值

重现期(年)	50	75	100	120
风压比值	1.00	1.06	1.10	1.13

注:重现期处于表中档次之间时,可按线性内插确定。

4.7.2 风荷载计算应符合现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)的有关规定。

4.8 冰 荷 载

4.8.1 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宜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。

4.8.2 冰荷载计算应符合现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)的有关规定。

4.9 水 流 力

4.9.1 水流设计流速应取建筑物所处范围内在结构设计使用年限内可能出现的最大流速,最大流速可采用最大平均流速,也可根据相应表面流速推算。

4.9.2 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。

4.9.3 对于河港工程,设计流速的确定应符合现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)的有关规定。

4.9.4 水流力计算应符合现行行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)的有关规定。

4.10 波 浪 力

4.10.1 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可按下式确定:

$$\frac{T_{RL}}{T_R} = \frac{T_L}{T} \quad (4.10.1)$$

式中 T_{RL} ——与设计使用年限 T_L 对应的重现期(年);

T_R ——与设计基准期 T 对应的重现期(年);

T_L ——结构设计使用年限(年);

T ——设计基准期(年),取 50 年。

4.10.2 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。

4.10.3 设计波浪标准的确定宜考虑设计使用年限增加后,气候条件和统计数据样本数量变化对统计要素不确定性的影响。

4.10.4 波浪对建筑物的作用计算应符合现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)的有关规定。

4.11 土 压 力

4.11.1 土体自重引起的土压力标准值应按现行行业标准《码头结构设计规范》(JTS 167)计算。

4.11.2 可变作用引起的土压力标准值,应采用与设计使用年限相对应的可变作用标准值进行计算,计算方法应符合现行行业标准《码头结构设计规范》(JTS 167)的有关规定。

4.12 地 震 作 用

4.12.1 结构抗震设计地震动参数宜通过场地地震危险性分析确定,除液化天然气码头和储罐区护岸外,应采用设计使用年限内超越概率 10% 的地震动参数。

4.12.2 液化天然气码头和储罐区护岸的抗震设计地震动参数应符合下列规定。

4.12.2.1 操作基准地震工况应采用设计使用年限内超越概率 10% 的地震作用水准作为设计地震,结构重要性系数应采用 1.1。

4.12.2.2 安全停运地震工况应采用设计使用年限内超越概率 2% 的地震作用水准作为设计地震,结构重要性系数可取 1.0。

4.12.3 无地震危险性分析结果时,地震动参数可根据不同设计使用年限按下式确定:

$$A_T = \gamma_{LE} A \quad (4.12.3)$$

式中 A_T ——不同设计使用年限对应的地震动参数;

γ_{LE} ——考虑设计使用年限的地震动参数调整系数,按表 4.12.3 确定;

A ——设计使用年限 50 年的地震动参数,按现行行业标准《水运工程抗震设计规范》(JTS 146)的有关规定取值。

表 4.12.3 考虑设计使用年限的地震动参数调整系数 γ_{LE}

结构设计使用年限(年)	50	75	100	120
γ_{LE}	1.0	1.2	1.3	1.4

注:设计使用年限处于表中档次之间时,可按线性内插确定。

4.12.4 地震作用和结构抗震验算方法应符合现行行业标准《水运工程抗震设计规范》(JTS 146)的有关规定。

4.13 温 度 作 用

4.13.1 港口工程结构设计需要考虑温度作用时,应根据工程所在地具体情况、结构材料和施工条件等因素计算温度作用效应。

4.13.2 温度作用应考虑气温变化、太阳辐射和使用热源等因素,作用在结构或构件上的

温度作用应采用其温度的变化来表示。

4.13.3 计算结构或构件的温度作用所采用的材料线膨胀系数可按表 4.13.3 确定。

表 4.13.3 常用材料的线膨胀系数

材料	线膨胀系数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土	10
钢材	12
砌体	6~10

4.13.4 温度作用可按均匀温度作用计算,作用标准值计算应符合下列规定。

4.13.4.1 结构最大温升工况和结构最大温降工况,均匀温度作用标准值应分别按式(4.13.4-1)和式(4.13.4-2)计算。

$$\Delta T_{k,r} = T_{s,\max} - T_{0,\min} \quad (4.13.4-1)$$

$$\Delta T_{k,f} = T_{s,\min} - T_{0,\max} \quad (4.13.4-2)$$

式中 $\Delta T_{k,r}$ ——结构最大温升工况均匀温度作用标准值($^{\circ}\text{C}$);

$T_{s,\max}$ ——结构最高平均温度($^{\circ}\text{C}$);

$T_{0,\min}$ ——结构最低初始平均温度($^{\circ}\text{C}$);

$\Delta T_{k,f}$ ——结构最大温降工况均匀温度作用标准值($^{\circ}\text{C}$);

$T_{s,\min}$ ——结构最低平均温度($^{\circ}\text{C}$);

$T_{0,\max}$ ——结构最高初始平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

4.13.4.2 结构最高平均温度和最低平均温度宜分别根据基本气温按热力学的原理确定。对于暴露于室外的结构或施工期的结构,宜根据结构的朝向和表面吸热性质考虑太阳辐射影响。

4.13.4.3 基本气温可采用与设计使用年限一致重现期的月平均最高气温和月平均最低气温。

4.13.4.4 结构的最高初始平均温度和最低初始平均温度应根据结构的合拢或形成约束的时间确定,或根据施工时结构可能出现的温度按不利情况确定。

4.13.4.5 温度作用分项系数可采用 1.4。

4.14 外加位移和变形

4.14.1 港口工程结构设计时,应分析设计使用年限内可能出现的外加位移和变形对结构的影响。

4.14.2 设计使用年限内可能出现外加位移和变形时,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。

4.14.3 外加位移和变形下的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。

4.15 水 位

4.15.1 海港工程中的设计高水位和设计低水位,应按现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)的有关规定确定。海港工程中的极端高水位和极端低水位,应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,极端高水位重现期应按式(4.10.1)确定。

4.15.2 河港工程中设计低水位应按现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)的有关规定确定。河港工程中设计高水位按多年历时保证率确定时,多年历时保证率应按现行行业标准《港口与航道水文规范》(JTS 145)的有关规定确定;按重现期确定时,重现期应按式(4.10.1)确定。

4.15.3 水位变化引起的自重力、土压力、剩余水压力、波浪力等作用的变化,应经计算分析确定。

4.16 偶然作用

4.16.1 港口工程结构设计中,有特殊要求时应考虑偶然作用。

4.16.2 偶然作用设计值可根据经验和经济性确定。

5 结构选型与分析

5.1 结构选型

5.1.1 港口工程结构形式应根据使用要求、环境条件、施工条件、使用年限和维护条件等进行技术经济比较经综合分析选定;应采用对危害反应不敏感、耐久性好、便于维护的结构形式。

5.1.2 码头结构宜采用重力式结构、高桩结构或板桩结构等形式。采用高桩结构时,基桩宜采用钢管桩、混凝土灌注桩、预应力高强混凝土管桩等;采用板桩结构时,前墙宜采用钢板桩、地下连续墙等。

5.1.3 防波堤与护岸宜采用斜坡式结构或重力式直立结构等。

5.1.4 码头结构构件宜采用钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢结构。防波堤护面块体宜选用混凝土块体或块石。

5.2 结构分析

5.2.1 结构分析应包括作用分析、作用效应分析和抗力分析。

5.2.2 结构分析应以结构理论和工程实践经验为基础,可采用理论计算、数值模拟、模型试验或原型试验等方法,宜按基础与上部结构共同作用进行分析。

5.2.3 结构分析采用的基本假定和计算模型应能合理描述所选择的极限状态下的结构反应。

5.2.4 缺乏合适结构计算模型或现有计算方法精确度达不到要求时,结构的作用、作用效应、破坏形态或结构抗力应通过试验确定。基于试验模型的设计应符合现行国家标准《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158)的有关规定。

5.2.5 波浪、水流、冰凌等条件比较复杂时,码头结构设计宜结合必要的模型试验,合理确定具体结构的形式、尺度及构造。

5.2.6 防波堤结构应进行断面波浪模型试验验证,波浪、水流或地形等条件比较复杂时,应进行三维整体或局部整体物理模型试验。

5.2.7 结构按承载能力极限状态设计时,根据结构和材料对作用的反应,可采用线性理论或非线性理论计算。结构按正常使用极限状态设计时,可采用线性理论计算,必要时应采用非线性理论计算。

5.2.8 结构分析应考虑岸坡变形、冲刷、淤积、土体沉降等因素对结构的不利影响。

5.2.9 材料和岩土的性能应符合下列规定。

5.2.9.1 钢筋、混凝土的物理力学性能应符合现行行业标准《水运工程混凝土结构设

计规范》(JTS 151)的有关规定,钢材的物理力学性能应符合现行行业标准《水运工程钢结构设计规范》(JTS 152)的有关规定。

5.2.9.2 岩土性能指标可通过原位测试、室内试验等直接或间接的方法确定,并应考虑钻探取样扰动、室内外试验条件与实际工程条件的差别等因素影响。

5.2.9.3 土工合成材料性能应符合现行行业标准《水运工程土工合成材料应用技术规范》(JTS/T 148)的有关规定。

5.2.10 地基设计应符合现行行业标准《水运工程地基设计规范》(JTS 147)的有关规定;桩基设计应符合现行行业标准《水运工程桩基设计规范》(JTS 147-7)和《码头结构设计规范》(JTS 167)的有关规定。

5.2.11 桩断面尺寸、沉箱尺寸、回填砂石断面尺寸等几何量变异性较小的结构或构件,几何量可采用确定值,并在设计中规定。变异性较大的地形、地质分层、冲刷、淤积、土体沉降等几何量应采用设计值并应分析其变化对结构的不利影响。

6 极限状态设计

6.1 一般规定

6.1.1 港口工程结构设计采用的作用应包括永久作用、可变作用和地震作用,有特殊要求时可考虑偶然作用。作用取值应符合第4章的有关规定。

6.1.2 港口工程结构设计时应应对不同的设计状况进行分析,设计状况宜分为下列状况:

- (1) 持久状况,持续时段与设计使用年限相当的设计状况;
- (2) 短暂状况,在结构施工和使用过程中一定出现,而与设计使用年限相比,持续时段较短的设计状况,包括施工、维修和短期特殊使用等;
- (3) 地震状况,结构遭受地震作用时的设计状况;
- (4) 偶然状况,偶发的使结构产生异常状态的设计状况,包括非正常撞击、火灾、爆炸等。

6.1.3 根据港口工程结构的设计状况,结构设计应符合下列规定。

6.1.3.1 持久状况应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。

6.1.3.2 短暂状况应进行承载能力极限状态设计,可根据需要进行正常使用极限状态设计。

6.1.3.3 地震状况应进行承载能力极限状态设计。

6.1.3.4 有特殊要求时,也可对偶然状况进行承载能力极限状态设计或防护设计。

6.1.4 港口工程结构设计时,所选择的极限状态应采用相应的结构可能同时出现作用的最不利组合。

6.1.5 极限状态设计中的设计水位取值应符合国家现行标准《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158)和《水运工程抗震设计规范》(JTS 146)的有关规定。

6.2 承载能力极限状态

6.2.1 港口工程结构承载能力极限状态设计表达式应满足下式要求:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (6.2.1)$$

式中 γ_0 ——不同结构安全等级的重要性系数,按表3.0.9-2取值;

S_d ——作用组合的效应设计值;

R_d ——抗力设计值。

6.2.2 承载能力极限状态设计应采用作用的持久组合、短暂组合和地震组合,有特殊要求时可采用作用的偶然组合。

6.2.3 持久组合、短暂组合、偶然组合的效应设计值和抗力设计值应符合现行行业标准

《码头结构设计规范》(JTS 167)、《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154)、《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)和《水运工程钢结构设计规范》(JTS 152)等的有关规定。

6.2.4 地震组合应符合下列规定。

6.2.4.1 地震作用标准值应按第 4.12 节的规定确定。

6.2.4.2 地震作用计算方法和设计表达式应符合现行行业标准《水运工程抗震设计规范》(JTS 146)的有关规定。

6.3 正常使用极限状态

6.3.1 正常使用极限状态设计表达式应满足下式要求：

$$S_d \leq C \quad (6.3.1)$$

式中 S_d ——作用组合的效应设计值,包括变形、裂缝宽度和沉降量等;

C ——结构规定限值,包括规定的最大容许变形、裂缝宽度和沉降量等,应符合现行行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)等的有关规定。

6.3.2 正常使用极限状态设计应根据不同设计目的,分别采用作用的标准组合、频遇组合和准永久组合,各种组合下的效应设计值和抗力设计值应符合现行行业标准《码头结构设计规范》(JTS 167)、《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154)、《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)和《水运工程钢结构设计规范》(JTS 152)等的有关规定。

7 耐久性设计

7.1 一般规定

7.1.1 港口工程结构耐久性宜根据结构设计使用年限和结构所处的环境,并考虑施工条件、维护便利性和全寿命成本等因素进行设计。

7.1.2 港口工程结构耐久性设计前应进行腐蚀环境调查,调查内容应包括水文、气象,水体氯离子含量、pH 值、电阻率,水污染情况和周边其他环境侵蚀介质等。

7.1.3 结构受到环境多重腐蚀因素共同作用时,设计应分别满足每种腐蚀单独作用下的耐久性要求,并应考虑多重腐蚀共同作用时的相互影响。

7.1.4 港口工程结构所处环境类别可按表 7.1.4 的规定进行环境类别划分。

表 7.1.4 港口工程结构环境类别

序号	环境类别	腐蚀特征
1	海水环境	氯盐作用下引起混凝土中钢筋锈蚀
2	淡水环境	一般淡水水流冲刷、溶蚀混凝土和大气环境下混凝土碳化引起钢筋锈蚀
3	冻融环境	冰冻地区冻融循环导致混凝土损伤
4	化学腐蚀环境	硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀

7.1.5 不同环境类别混凝土结构和钢结构应按腐蚀作用程度进行部位或腐蚀条件划分,所处部位或腐蚀条件的划分应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153)的有关规定。

7.1.6 设计时宜选用耐久性良好的材料,并应明确材料的性能指标。

7.1.7 港口工程结构耐久性极限状态可按下列标准确定:

(1)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;

(2)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;

(3)冻融环境和化学腐蚀环境下以混凝土保护层出现损伤,但尚未明显损害构件的承载力和混凝土保护层对钢筋保护时的状态为耐久性极限状态;

(4)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。

7.1.8 处于浪溅区、水位变动区和大气区的钢筋混凝土和预应力混凝土结构,除应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153)的有关规定外,尚应进行耐久性定量设计。

7.1.9 海水环境港口工程混凝土结构水位变动区和浪溅区部位,宜采用高性能混凝土,并宜采取必要的附加防腐蚀措施。桩基透空式结构水位变动区和浪溅区部位应采用高性能混凝土,并应采取必要的附加防腐蚀措施。

7.1.10 港口工程钢结构耐久性设计应采用预留腐蚀裕量与防腐蚀措施联合防护的方式。

7.1.11 港口工程结构耐久性维护应体现预防为主的原则,并应具有连续性和及时性,包括日常检查、定期检测评估和适时维修等。

7.1.12 港口工程结构宜安装耐久性监测装置,长期动态获取混凝土中氯离子渗透与钢筋锈蚀情况、钢结构腐蚀速率与保护电流等参数信息,实时掌握结构耐久性健康状况。

7.2 混凝土结构

结构和构件形式

7.2.1 钢筋混凝土构件和预应力混凝土构件宜采用工厂预制。

7.2.2 结构的表面应有利于排水,应避免水和有害物质在结构的表面积聚,不宜在接缝或止水构造处排水。

7.2.3 结构布置应有利于通风,对水汽易于聚积、通风条件差的混凝土结构宜采取设置透气孔等措施。

7.2.4 构件截面几何形状应简单、平顺,减少棱角、突变和应力集中,暴露部位构件的最小截面尺寸应符合下列规定。

7.2.4.1 直线形构件的最小边长不宜小于混凝土保护层厚度的 6 倍。

7.2.4.2 曲线形构件的最小曲率半径不宜小于混凝土保护层厚度的 3 倍。

7.2.5 结构形式应便于对关键部位进行维护,并应设置检查、检测、维修的通道。

7.2.6 结构构件应便于施工,易于成形。

7.2.7 对处于腐蚀较严重部位的构件,应考虑按可更换构件设计的可能性,无法更换的构件可适当提高结构的耐久性。

构 造

7.2.8 结构易受漂流物、流冰撞击或水流冲击剧烈的部位,宜采取必要的耐冲击和耐磨损措施。

7.2.9 预应力混凝土结构宜采用整体构件,采用节段拼装式或用预应力筋连接相邻构件成为整体时,应在拼接处采取保证预应力筋密封和防腐蚀性能的保护措施。

7.2.10 预应力混凝土结构中的预应力筋应根据具体情况采取表面保护、孔道灌浆等措施,外露的锚固端应采取封锚和混凝土表面处理等措施。

7.2.11 依托主体结构的电接地钢筋应独立设置。

7.2.12 混凝土构件施工期的吊环、紧固件、连接件在构件安装就位后应割除并作表面保护。对浇筑在混凝土中并长期暴露的金属部件应采取必要的防腐蚀措施,并宜与混凝土中的钢筋绝缘。

7.2.13 由于结构变形、不均匀沉降、混凝土收缩或温度效应引起的混凝土应力,应通过合理选择结构体系和支座、合理设置分缝、配置适量钢筋等措施将其控制在允许范围内。

7.2.14 施工缝、伸缩缝等的设置宜避开环境作用不利的部位,否则应采取有效的保护措施。

7.2.15 构件截面配筋在满足混凝土浇筑前提下应符合下列规定。

7.2.15.1 位于海水环境浪溅区、水位变动区的钢筋混凝土构件受力钢筋直径不宜大于0.4倍的混凝土保护层厚度。

7.2.15.2 有控制温度或收缩裂缝要求的混凝土构件应配置分布钢筋,分布钢筋的间距不宜大于80mm,钢筋宜采用直径不大于12mm的带肋钢筋。

7.2.15.3 配有少量构造钢筋的素混凝土结构,钢筋间距不宜大于80mm,钢筋直径不宜大于12mm。

7.2.16 海水环境受力钢筋的混凝土保护层最小厚度宜符合表7.2.16的规定。

表 7.2.16 海水环境受力钢筋的混凝土保护层最小厚度(mm)

建筑物所处地区	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
北方	55	65	60	45
南方	55	70	60	45

注:①箍筋直径大于6mm时混凝土保护层厚度宜按表中规定增加5mm;

②位于水位变动区、浪溅区的现浇混凝土构件,其保护层厚度宜按表中规定增加5mm~10mm;

③南方指历年最冷月月平均气温高于0℃的地区。

7.2.17 海水环境预应力筋的混凝土保护层最小厚度宜符合表7.2.17的规定。

表 7.2.17 海水环境预应力筋的混凝土保护层最小厚度(mm)

所在部位	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
保护层厚度	70	85	70	70

注:①后张法预应力筋的混凝土保护层厚度指预留孔道壁至构件表面的最小距离;

②采用特殊工艺制作的构件,经充分技术论证,对钢筋的防腐蚀作用确有保证时,保护层厚度可适当减小;

③有效预应力小于 $400\text{N}/\text{mm}^2$ 的预应力筋的混凝土保护层厚度可按表7.2.16执行。

7.2.18 淡水环境受力钢筋的混凝土保护层最小厚度宜符合表7.2.18的规定。

表 7.2.18 淡水环境受力钢筋的混凝土保护层最小厚度(mm)

所在部位	水上区		水位变动区	水下区
	水汽积聚	无水汽积聚		
保护层厚度	45	40	45	40

注:箍筋直径大于6mm时,保护层厚度宜按表中规定增加5mm。

7.2.19 淡水环境预应力筋的混凝土保护层最小厚度应符合第 7.2.18 条的规定,且不宜小于 1.5 倍主筋直径,预应力筋采用钢丝、钢绞线时的保护层厚度宜按第 7.2.18 条的规定增加 20mm。采取特殊工艺或专门防腐措施,经技术论证对预应力筋的防腐蚀作用确有保证时,保护层厚度可不受上述规定的限制。

7.2.20 化学腐蚀环境混凝土保护层最小厚度宜符合表 7.2.20 的规定。

表 7.2.20 化学腐蚀环境混凝土保护层最小厚度

环境作用等级	混凝土保护层最小厚度(mm)
中等	60
严重	65
非常严重	65

注:①环境作用等级划分应按现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153)执行;

②预制构件的保护层最小厚度可比表中规定减少 5mm。

7.2.21 配置构造钢筋的素混凝土结构,海水环境构造筋的混凝土保护层最小厚度不应小于 45mm,且不应小于 2.5 倍构造筋直径;淡水环境构造筋的混凝土保护层最小厚度不应小于 35mm。

7.2.22 海水环境板桩结构前墙和锚碇结构采用现浇地下连续墙结构时,受力钢筋的混凝土保护层最小厚度不应小于 75mm,淡水环境可视情况适当减小。

混凝土材料

7.2.23 混凝土原材料中的有害成分含量不应影响混凝土强度、耐久性和体积稳定性等产生不利影响,并应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153)的有关规定。

7.2.24 海水环境下按耐久性要求的混凝土最低强度等级应满足表 7.2.24 的要求。有抗冲耐磨要求时,混凝土强度等级应根据使用要求研究确定,且不应低于 C35,并应根据情况采取抗冲耐磨措施。

表 7.2.24 海水环境按耐久性要求的混凝土最低强度等级

所在部位	普通混凝土		高性能混凝土
	钢筋混凝土和预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土和预应力混凝土
大气区	C35	C25	C40
浪溅区	C45	C30	C45
水位变动区	C40	C30	C40
水下区	C35	C30	C40

7.2.25 海水环境混凝土水胶比最大允许值宜符合表 7.2.25 的规定。

表 7.2.25 海水环境混凝土水胶比最大允许值

环境条件		普通混凝土				高性能混凝土
		钢筋混凝土和预应力混凝土		素混凝土		钢筋混凝土和预应力混凝土
		北方	南方	北方	南方	
大气区		0.50	0.45	0.60	0.60	0.40
浪溅区		0.40	0.40	0.60	0.60	0.35
水位变动区	严重受冻	0.40	—	0.40	—	0.40
	受冻	0.45	—	0.45	—	0.40
	微冻	0.50	—	0.50	—	0.40
	不冻	—	0.45	—	0.60	0.40
不受水头作用		0.50	0.50	0.60	0.60	0.40
水下区	受水头作用	最大作用水头与混凝土壁厚之比小于5	0.50			0.40
		最大作用水头与混凝土壁厚之比为5~10	0.45			0.40
		最大作用水头与混凝土壁厚之比大于10	0.40			0.40

7.2.26 淡水环境下按耐久性要求的混凝土最低强度等级,对钢筋混凝土结构不应小于C30,对素混凝土结构不应小于C25。有抗冲耐磨要求时,混凝土强度等级应根据使用要求研究确定,且不应低于C35,并应根据情况采取抗冲耐磨措施。

7.2.27 淡水环境混凝土水胶比最大允许值宜符合表 7.2.27 的规定。

表 7.2.27 淡水环境混凝土水胶比最大允许值

环境条件		钢筋混凝土和预应力混凝土	素混凝土
水上区	水汽积聚或通风不良	0.55	0.60
	无水汽积聚或通风良好	0.60	0.60
水位变动区	严重受冻	0.50	0.50
	受冻	0.55	0.55
	微冻	0.60	0.60
	不冻	0.60	0.60

续表 7.2.27

环境条件		钢筋混凝土和预应力混凝土	素混凝土
水下区	不受水头作用	0.60	0.60
	受水头作用	最大作用水头与混凝土壁厚之比小于 5	0.55
		最大作用水头与混凝土壁厚之比为 5~10	0.50
		最大作用水头与混凝土壁厚之比大于 10	0.45

7.2.28 化学腐蚀环境下钢筋混凝土结构混凝土最低强度等级和水胶比最大允许值应符合表 7.2.28 的规定。

表 7.2.28 化学腐蚀环境混凝土最低强度等级和混凝土水胶比最大允许值

环境作用等级	混凝土最低强度等级	最大水胶比
中等	C45	0.40
严重	C45	0.40
非常严重	C50	0.36

7.2.29 冻融环境下混凝土的抗冻性能,除应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153)的有关规定外,混凝土抗冻耐久性指数不应低于表 7.2.29 的规定,设计使用年限大于 100 年时,混凝土抗冻耐久性指数应经论证分析确定。

表 7.2.29 混凝土的抗冻耐久性指数 DF

设计使用年限	50 年			75 年			100 年		
	中度饱水	高度饱水	含盐冻融	中度饱水	高度饱水	含盐冻融	中度饱水	高度饱水	含盐冻融
严重受冻地区	60%	70%	80%	65%	75%	83%	70%	80%	85%
受冻地区	50%	60%	70%	55%	65%	75%	60%	70%	80%
微冻地区	45%	50%	60%	53%	55%	65%	60%	60%	70%

注:①中度饱水指冰冻前处于潮湿状态或偶与雨、水等接触,混凝土内饱水程度不高;高度饱水指冰冻前长期或频繁接触水或湿润土体,混凝土内高度水饱和;

②对于厚度小于 150mm 的薄壁混凝土构件,其 DF 值宜增加 5%;

③混凝土的抗冻耐久性应按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)规定的快冻法进行检验;

④设计使用年限处于表中档次之间时,可按线性内插确定。

7.2.30 处于浪溅区、水位变动区和大气区的海港工程钢筋混凝土和预应力混凝土结构,混凝土的抗氯离子渗透性应符合表 7.2.30 的规定。

表 7.2.30 扩散系数法测定的海水环境混凝土抗氯离子渗透性最高限值

部位	大气区	浪溅区	水位变动区
氯离子渗透性指标 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	7.5	4.0	6.0

注:①试验用的混凝土试件,对掺入粉煤灰或粒化高炉矿渣粉的混凝土,应按标准养护条件下 56d 龄期的试验结果评定,其他混凝土应按标准养护条件下 28d 龄期的结果评定;

②表中混凝土抗氯离子渗透性最高限值与表 7.2.16 和表 7.2.17 中规定的混凝土保护层最小厚度相对应;

③扩散系数法应按现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153)执行。

耐久性定量设计

7.2.31 海水环境和淡水碳化环境混凝土结构应进行设计使用年限校核。钢筋混凝土受弯构件,尚应进行刚度退化后的挠度验算。

7.2.32 设计使用年限应根据混凝土结构的保护层厚度、混凝土水胶比等设计参数,采用定量计算模型进行校核。

7.2.33 设计使用年限校核宜采用以概率理论为基础,以分项系数表达的极限状态设计方法。

7.2.34 设计使用年限校核应符合下列规定。

7.2.34.1 海水环境和淡水碳化环境钢筋混凝土结构和采用螺纹钢筋作为预应力筋的预应力混凝土构件,设计使用年限应满足下式要求:

$$t_d \leq t_i + t_c \quad (7.2.34-1)$$

式中 t_d ——设计使用年限(年);

t_i ——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(年);

t_c ——钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间(年)。

7.2.34.2 海水环境和淡水碳化环境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下式要求:

$$t_d \leq t_i \quad (7.2.34-2)$$

式中 t_d ——设计使用年限(年);

t_i ——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(年)。

7.2.35 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(7.2.35-1)和式(7.2.35-2)计算,其中各参数的确定应符合下列规定。

$$t_i = t_s + \frac{0.0317x^2}{4k_{cl}D_{cl,0} \left(\frac{t_0}{t_s}\right)^{n_{cl}} \left[\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{c_{er} - c_{t_s}}{c_s - c_{t_s}} \right) \right]^2} \quad (7.2.35-1)$$

$$c_{t_s} = c_0 + (c_s - c_0) \left\{ 1 - \text{erf} \left[\frac{\sqrt{0.0317x}}{\sqrt{\frac{4k_{cl}D_{cl,0}t_s}{1-n_{cl}} \left(\frac{t_0}{t_s}\right)^{n_{cl}}}} \right] \right\} \quad (7.2.35-2)$$

式中 t_i ——氯离子侵入混凝土导致钢筋发生锈蚀所经历的时间(年);

t_s ——混凝土氯离子扩散系数衰减至恒定值的时间(年),宜取 20 年;

x ——混凝土保护层厚度计算值(mm);

- k_{cl} ——混凝土氯离子扩散系数影响系数；
- $D_{cl,0}$ —— t_0 时刻混凝土的氯离子扩散系数($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)；
- t_0 ——采用快速氯离子迁移系数法(RCM 法)测定氯离子扩散系数时的混凝土龄期(年),取 0.0767 年(28d)或 0.1534 年(56d),龄期按表 7.2.30 确定；
- $\text{erf}^{-1}(\cdot)$ ——误差函数反函数；
- c_{cr} ——混凝土临界氯离子浓度计算值,按占胶凝材料质量百分比计；
- c_{i_1} ——混凝土氯离子扩散稳定时的氯离子浓度,按占胶凝材料质量百分比计；
- c_s ——混凝土表面氯离子浓度计算值,按占胶凝材料质量百分比计；
- c_0 ——混凝土初始氯离子浓度计算值,按占胶凝材料质量百分比计;对于钢筋混凝土,可取 0.1%；预应力混凝土,可取 0.06%；
- $\text{erf}(\cdot)$ ——误差函数；
- n_{cl} ——混凝土扩散系数龄期因子。

7.2.35.1 混凝土临界氯离子浓度计算值可按式(7.2.35-3)计算：

$$c_{cr} = c_{cr,0} \cdot \frac{1}{\gamma_{c_{cr}}} \quad (7.2.35-3)$$

- 式中 c_{cr} ——混凝土临界氯离子浓度计算值,按占胶凝材料质量百分比计；
- $c_{cr,0}$ ——混凝土临界氯离子浓度特征值,按占胶凝材料质量百分比计,无可靠统计资料时,可按表 7.2.35-1 取值；
- $\gamma_{c_{cr}}$ ——混凝土临界氯离子浓度分项系数,应根据相关参数的概率分布函数结合目标可靠指标确定,无可靠统计资料时,大气区可取 1.1,浪溅区可取 1.7,水位变动区可取 1.2。

表 7.2.35-1 混凝土临界氯离子浓度特征值

暴露区域	大气区	浪溅区	水位变动区
$c_{cr,0}$	0.85%	0.75%	0.75%

7.2.35.2 混凝土表面氯离子浓度计算值可按式(7.2.35-4)计算：

$$c_s = A_{c_s} \cdot (w/b) \cdot \gamma_{c_s} \quad (7.2.35-4)$$

- 式中 c_s ——混凝土表面氯离子浓度计算值,按占胶凝材料质量百分比计；
- A_{c_s} ——混凝土表面氯离子浓度回归系数特征值,无可靠统计资料时,可按表 7.2.35-2 取值；
- w/b ——混凝土水胶比；
- γ_{c_s} ——表面氯离子浓度分项系数,应根据相关参数的概率分布函数结合目标可靠指标确定,无可靠统计资料时,大气区可取 1.2,浪溅区和水位变动区可取 1.1。

表 7.2.35-2 混凝土表面氯离子浓度回归系数特征值

暴露区域	大气区	浪溅区	水位变动区
A_{c_s}	6.00	16.45	11.55

7.2.35.3 混凝土保护层厚度计算值可按下式计算:

$$x = x_d - \Delta x \quad (7.2.35-5)$$

式中 x ——混凝土保护层厚度计算值(mm);

x_d ——混凝土保护层厚度设计值(mm);

Δx ——混凝土保护层厚度安全裕度(mm),无统计资料时可按表 7.2.35-3 取值。

表 7.2.35-3 混凝土保护层厚度安全裕度(mm)

混凝土构件类型	预制构件	现浇构件
Δx	5	10

7.2.35.4 混凝土 28d 快速试验氯离子扩散系数计算值可按式(7.2.35-6)估算,采用 56d 快速试验氯离子扩散系数时,应对式(7.2.35-6)的计算值乘以系数 $2^{-n_{cl}}$ 。

$$D_{cl,0} = \gamma_{D_{cl}} 10^{1.95 - 1.25 \left(\frac{0.32c + 0.26FA + 0.425G}{w} \right)} \quad (7.2.35-6)$$

式中 $D_{cl,0}$ ——28d 混凝土快速试验氯离子扩散系数($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$);

$\gamma_{D_{cl}}$ ——混凝土氯离子扩散系数分项系数,应根据相关参数的概率分布函数结合目标可靠指标确定,无可靠统计资料时,可取 1.1;

c ——每立方米混凝土的凝胶材料中水泥的用量(kg);

FA ——每立方米混凝土的凝胶材料中粉煤灰的用量(kg);

SG ——每立方米混凝土的凝胶材料中粒化高炉矿渣的用量(kg);

w ——每立方米混凝土中水的用量(kg)。

7.2.35.5 混凝土氯离子扩散系数影响系数可按下列公式计算:

$$k_{cl} = k_{e,cl} \cdot k_{c,cl} \cdot k_{f,cl} \quad (7.2.35-7)$$

$$k_{c,cl} = \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0 + 273} - \frac{1}{T + 273} \right) \right] \quad (7.2.35-8)$$

$$k_{f,cl} = 1 + 2.1 \left(\frac{\sigma_q}{f_{yk}} \right)^3 \quad (7.2.35-9)$$

式中 k_{cl} ——混凝土氯离子扩散系数影响系数;

$k_{e,cl}$ ——结构环境条件系数,应根据类似工程实测值、暴露试验结果或按(7.2.35-8)计算;无可靠资料时,国内各地区可按表 7.2.35-4 取值;

$k_{c,cl}$ ——混凝土氯离子渗透性试验方法转换系数,根据式(7.2.35-7)与现场长期暴露试验结果的相关系数确定,采用式(7.2.35-7)时取 0.5;

$k_{f,cl}$ ——结构荷载影响系数,小于 0.5 时取 0.5;

U ——混凝土氯离子扩散过程的活化能,取 35000J/mol;

R ——理想气体常数,取 8.314J/K/mol;

T_0 ——基准温度,可取 20℃;

T ——混凝土结构所处环境的温度(℃),可取结构所在地年平均气温;

σ_q ——正常使用极限状态准永久组合下的钢筋应力(N/mm²),拉应力取正值,压

应力取负值；

- f_{yk} ——钢筋屈服强度标准值(N/mm²)；
 σ_q/f_{yk} ——正常使用极限状态准永久组合下的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按表 7.2.35-5 确定。

表 7.2.35-4 结构环境条件系数 $k_{e,d}$

结构所处地区	华南地区	华东地区	北方地区
$k_{e,d}$	1.00	0.85	0.80

表 7.2.35-5 构件受力类型及钢筋应力与钢筋屈服强度比值的取值

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

注:①对于钢筋混凝土受弯构件,“1”类指以使用荷载为主,设计使用年限内波浪作用产生的效应与总作用效应之比小于 30% 的构件(如水平布置、竖向承受使用荷载为主的构件);“2”类指设计使用年限内波浪作用产生的效应与总作用效应之比为 30%~60% 的构件;“3”类指设计使用年限内波浪作用产生的效应与总作用效应之比大于 60% 的构件(如竖向布置、水平承受波浪作用为主的构件);

②对于预应力混凝土受弯构件,“2”类指裂缝控制等级为二级的构件,在标准组合下允许出现拉应力但不超过规定限值,在准永久组合下不允许出现拉应力;“3”类指裂缝控制等级为一级的构件,在标准组合下不允许构件出现拉应力;

③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;

④对于预应力混凝土桩,“1”类指裂缝控制等级为二级的构件,在标准组合下允许出现拉应力但不超过规定限值,在准永久组合下不允许出现拉应力;“2”类指裂缝控制等级为一级的构件,在标准组合下不允许构件出现拉应力。

7.2.35.6 混凝土氯离子扩散系数龄期因子应根据类似工程实测值或暴露试验结果确定,无可靠资料时可按下式确定:

$$n_d = 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA/b}{0.5} + \frac{SG/b}{0.7} \right) \quad (7.2.35-10)$$

式中 n_d ——混凝土氯离子扩散系数龄期因子,大于 0.6 时取 0.6;

FA/b ——混凝土凝胶材料中粉煤灰质量占凝胶材料质量的比例;

SG/b ——混凝土凝胶材料中粒化高炉矿渣质量占凝胶材料质量的比例。

7.2.36 钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间可按下式计算:

$$t_c = \left(\frac{p}{0.014i_{c0}} \right)^{1.4} \quad (7.2.36-1)$$

式中 t_c ——钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间(年);

p ——混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的临界锈蚀深度(mm);

i_{c0} ——钢筋初锈时的电流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)。

7.2.36.1 混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的临界锈蚀深度可按式计算:

$$p = a_1 + a_2 \frac{x}{d} + a_3 f_{cu,k} \quad (7.2.36-2)$$

式中 p ——混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的临界锈蚀深度(mm);
 a_1 ——钢筋的临界锈蚀深度修正系数,无统计资料时,取0.018;
 a_2 ——结构影响系数,无统计资料时,取0.012;
 x ——混凝土保护层厚度计算值(mm);
 d ——钢筋直径(mm);
 a_3 ——强度影响系数,无统计资料时,取0.00084;
 $f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值(N/mm²)。

7.2.36.2 钢筋初锈时的电流密度可按式计算:

$$i_{c0} = \frac{72.0 k_{co} \left(1 - \frac{w}{c + 2.1FA + 3.4SG} \right)^{-1.64}}{x} \quad (7.2.36-3)$$

式中 i_{c0} ——钢筋初锈时的电流密度($\mu\text{A}/\text{cm}^2$);
 k_{co} ——钢筋锈蚀环境条件影响系数,可按表7.2.36取值;
 w ——每立方米混凝土中水的用量(kg);
 c 、 FA 、 SG ——分别为每立方米混凝土的胶凝材料中水泥、粉煤灰和粒化高炉矿渣用量(kg);
 x ——混凝土保护层厚度计算值(mm)。

表 7.2.36 钢筋锈蚀环境条件影响系数

结构所处部位	浪溅区	水位变动区	大气区
k_{co}	1.0	0.5	0.5

7.2.37 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(7.2.37-1)计算。

$$t_i = \left(\frac{x - x_0}{k} \right)^2 \quad (7.2.37-1)$$

式中 t_i ——碳化作用下钢筋发生锈蚀所经历的时间(年);
 x ——混凝土保护层厚度计算值(mm),可按第7.2.35.3款确定;
 x_0 ——碳化残量(mm);
 k ——混凝土碳化系数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)。

7.2.37.1 混凝土碳化系数可按式计算:

$$k = 3K_{CO_2} K_{cl} K_{ct} K_{cs} K_F T^{0.25} RH^{1.5} (1 - RH) \left(\frac{58}{f_{cu,o}} - 0.76 \right) \quad (7.2.37-2)$$

式中 k ——混凝土碳化系数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$);
 K_{CO_2} ——二氧化碳浓度影响系数,取 $\sqrt{C_{CO_2}/0.03}$;

- C_{CO_2} ——二氧化碳浓度,以百分数计,可取 0.03% ~ 0.05% ;
 K_{H_1} ——位置影响系数,构件角区取 1.4,非角区取 1.0 ;
 K_{H_2} ——浇筑面影响系数,浇筑面取 1.2,非浇筑面取 1.0 ;
 K_{H_3} ——工作应力影响系数,受压区取 1.0,受拉区取 1.1 ;
 K_F ——粉煤灰取代系数,可按表 7.2.37-1 取值 ;

表 7.2.37-1 粉煤灰取代系数 K_F

粉煤灰掺量	10%	20%	30%	40%
粉煤灰取代系数	1.01	1.07	1.25	1.65

注:掺 I 级粉煤灰、水胶比小于 0.3 的混凝土, K_F 可取 1.0。

T ——环境温度(℃) ;

RH ——环境相对湿度 ;

$f_{cu,e}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值(N/mm²)。

7.2.37.2 酸雨环境和冻融环境下,宜对混凝土碳化系数乘以碳化速度修正系数,无可靠数据时,可按表 7.2.37-2 取值。

表 7.2.37-2 酸雨和冻融环境下碳化速度修正系数

环境条件		碳化速度修正系数 K
酸雨环境	较轻酸雨区	1.1
	轻酸雨区	1.3
	重酸雨区	1.5
	特重酸雨区	1.7
冻融环境	微冻	1.5
	受冻	2.1
	严重受冻	2.6

注:酸雨区域划分可参考现行行业标准《酸雨和酸雨区等级》(QX/T 372)的有关规定。

7.2.37.3 混凝土碳化残量可按下列公式计算:

$$x_0 = (1.2 - 0.35k^{0.5}) \cdot \lambda - \frac{6.0}{m + 1.6} (1.5 + 0.84k) \quad (7.2.37-3)$$

$$\lambda = \begin{cases} x - 0.389(x - 28)(0.16/k)^{1.5} & k < 1.0 \\ x + 0.066(x - 28)^{0.47k} & 1.0 \leq k < 3.3 \\ x + 0.066(x - 28)^{1.55} & k \geq 3.3 \end{cases} \quad (7.2.37-4)$$

式中 x_0 ——混凝土碳化残量(mm) ;

k ——混凝土碳化系数(mm/√a) ;

λ ——碳化残量修正系数 ;

m ——局部环境系数,可按表 7.2.37-3 确定 ;

x ——混凝土保护层厚度计算值(mm),可按第 7.2.35.3 款确定。

表 7.2.37-3 局部环境系数

环境条件	结构构件示例	m
干燥环境或非干湿交替露天环境	低湿度环境中的结构内部构件; 不接触或偶尔接触雨水的外部构件	1.0
非干湿交替内部潮湿环境	中高湿度环境结构内部构件	2.0
干湿交替环境	表面频繁与水接触的构件	2.5
湿热地区干湿交替环境	湿热地区表面频繁与水接触的构件	4.0
冻融环境	微冻地区构件	2.5
	受冻地区构件	3.5
	严重受冻地区构件	4.0

7.2.38 淡水碳化环境钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间可按式(7.2.38-1)计算,其中有关参数的确定应符合下列规定。

$$t_c = \frac{p}{w_t V} \quad (7.2.38-1)$$

式中 t_c ——钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间(年);
 p ——混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的临界锈蚀深度(mm),按第7.2.36.1款计算;
 w_t ——湿度等效时间系数,可按表7.2.38-1确定;
 V ——腐蚀速率(mm/年)。

表 7.2.38-1 湿度等效时间系数

环境条件	干燥	中等湿度,有遮盖、有水汽	干湿循环,无遮盖	潮湿
w_t	0	0.50	0.75	1.00

7.2.38.1 混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的腐蚀速率可按下式计算:

$$V = 2 \cdot \frac{m_0}{\rho} \cdot \gamma_V \quad (7.2.38-2)$$

式中 V ——腐蚀速率(mm/年);
 m_0 ——腐蚀速率与电阻率比值的常数,取0.882(mm·Ω·m/年);
 ρ ——混凝土产生顺筋裂缝时的电阻率(Ω·m);
 γ_V ——腐蚀速率分项系数,按风险程度可取1.3~1.5。

7.2.38.2 混凝土产生顺筋裂缝时的电阻率可按下式计算:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{t_h}{t_{0,\rho}} \right)^{n_{ca}} \cdot k_{T,ca} \cdot k_{RH,ca} \quad (7.2.38-3)$$

式中 ρ ——混凝土产生顺筋裂缝时的电阻率(Ω·m);
 ρ_0 ——混凝土初始电阻率(Ω·m),可取475Ω·m;
 t_h ——电阻率稳定龄期(年),可取1年;
 $t_{0,\rho}$ ——电阻率测试时的混凝土龄期(年),可取0.0767年;

- n_{ca} ——电阻率的时间因子；
 $k_{T,ca}$ ——温度因子；
 $k_{RH,ca}$ ——湿度因子。

7.2.38.3 电阻率的时间因子可按表 7.2.38-2 确定。

表 7.2.38-2 电阻率时间因子

胶凝材料体系	硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥	单掺矿渣粉	单纯粉煤灰
n_{ca}	0.23	0.54	0.62

7.2.38.4 电阻率的温度因子可按式计算：

$$k_{T,ca} = \frac{1}{1 + K_{ca}(T - 20)} \quad (7.2.38-4)$$

式中 $k_{T,ca}$ ——电阻率的温度因子；

K_{ca} ——温度系数，温度低于 20℃ 取 0.025，高于 20℃ 取 0.073；

T ——环境温度(℃)。

7.2.38.5 电阻率的湿度因子可按表 7.2.38-3 确定。

表 7.2.38-3 电阻率湿度因子

环境条件	$k_{RH,ca}$
相对湿度 50%	7.6
相对湿度 65%	6.5
相对湿度 80%	3.0
相对湿度 95%	1.1
水下区、水位变动区和浪溅区	1.0

7.2.39 钢筋混凝土构件挠度验算应符合第 6.3.1 条规定，其中构件刚度应乘以钢筋锈蚀引起的钢筋混凝土构件刚度降低系数 $\alpha(\eta_s)$ ， $\alpha(\eta_s)$ 可按下列公式计算：

$$\alpha(\eta_s) = 0.45e^{-\eta_s^{0.05}} + 0.55 \quad (7.2.39-1)$$

$$\eta_s = \frac{0.056i_{co} \cdot (t_d - t_i)^{0.71}}{d} \quad (7.2.39-2)$$

式中 $\alpha(\eta_s)$ ——钢筋锈蚀引起的钢筋混凝土构件刚度降低系数；

η_s ——锈蚀纵向钢筋的锈蚀率，不大于 0.25；

i_{co} ——钢筋初锈时的电流密度，按式(7.2.36-3)计算；

t_d ——结构设计使用年限(年)；

t_i ——钢筋开始腐蚀阶段所经历的时间(年)，按第 7.2.35 条或第 7.2.37 条规定计算；

d ——锈蚀纵向钢筋的等效直径(mm)。

混凝土结构防腐蚀措施

7.2.40 海水环境混凝土结构采取的附加防腐蚀措施宜按表 7.2.40 选用。

表 7.2.40 海水环境混凝土结构附加防腐蚀措施

结构所处部位	保护工作年限 20 年及以下	保护工作年限 20 年以上
大气区	表面涂层、硅烷浸渍	环氧涂层钢筋,或环氧涂层钢筋与表面涂层、硅烷浸渍联合保护
浪溅区	表面涂层、硅烷浸渍、钢筋阻锈剂、抗侵蚀抑制剂、抗侵蚀防腐剂等	环氧涂层钢筋、不锈钢钢筋、不锈钢复合钢筋、外加电流阴极保护,或环氧涂层钢筋与表面涂层、硅烷浸渍联合保护
水位变动区	表面涂层、钢筋阻锈剂、抗侵蚀抑制剂、抗侵蚀防腐剂等	环氧涂层钢筋、不锈钢钢筋、不锈钢复合钢筋、外加电流阴极保护,或环氧涂层钢筋与硅烷浸渍联合保护
水下区	不需采取保护措施	不需采取保护措施

7.2.41 淡水环境和化学腐蚀环境混凝土结构附加防腐蚀措施,宜采用混凝土表面涂层、硅烷浸渍保护、混凝土抗侵蚀抑制剂或抗侵蚀防腐剂。

7.2.42 混凝土结构采用的附加防腐蚀措施应明确其保护工作年限、主要材料的性能指标及其检验方法。

7.2.43 不锈钢钢筋、外加电流阴极保护可根据防腐蚀措施的保护工作年限,经论证校核后进行混凝土结构使用年限延长时间的定量设计。表面涂层、硅烷浸渍、钢筋阻锈剂、抗侵蚀抑制剂、抗侵蚀防腐剂等附加防腐蚀措施宜作为耐久性设计的安全储备。

7.2.44 采用不锈钢钢筋的混凝土结构,宜根据不锈钢钢筋的临界锈蚀试验数据调整耐久性定量设计模型中的临界氯离子浓度取值,并应根据不锈钢钢筋与普通钢筋在混凝土结构中的分布情况开展耐久性定量设计。

7.2.45 采用外加电流阴极保护的混凝土结构,可取外加电流保护工作年限的 50% ~ 70%,计入混凝土结构的设计使用年限。

7.3 钢 结 构

结构形式和构造

7.3.1 港口工程钢结构设计宜减少结构的表面积,并应有利于防腐蚀施工。

7.3.2 钢结构设计宜避免狭窄间隙,浪溅区应避免采用小截面的 E 形、K 形、Y 形交叉连接方式或背对背放置的角钢或槽钢等结构形式,宜采用管形构件。浪溅区和大气区钢构件应避免积水。

7.3.3 焊接接头宜连续焊接,搭接接头宜采用双面焊接,浪溅区及以下部位不宜采用螺栓连接和铆接。

7.3.4 埋于混凝土桩帽、墩台或胸墙中的钢桩之间应进行电连接,电连接施工应在浇注混凝土前完成。

7.3.5 预埋钢构件的埋设位置宜避开浪溅区部位,水位变动区及以下部位的辅助构件或预埋件,宜与实施阴极保护的钢结构进行电连接。

7.3.6 施工期与主构件相连接的临时性钢结构完工后应拆除并做好主构件相应部位防腐蚀处理。

7.3.7 水位变动区及以下的钢结构宜采用相同的钢种。采用不同钢种时,应采取消除电偶腐蚀的措施。

耐久性定量设计

7.3.8 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计算:

$$\Delta\delta = K[(1-P)t_1 + (t-t_1)] \quad (7.3.8)$$

式中 $\Delta\delta$ ——钢结构单面腐蚀裕量(mm);

K ——钢结构单面平均腐蚀速度(mm/年),根据现场实测确定或按表 7.3.8 取值;

P ——保护效率(%),涂层、金属热喷涂和包覆有机复合层在其设计保护年限内可取 50%~95%,阴极保护取不小于 90%;

t_1 ——防腐蚀措施的设计保护年限(年);

t ——钢结构的设计使用年限(年)。

表 7.3.8 钢结构单面平均腐蚀速度(mm/年)

环境	部位	平均腐蚀速度	
海水环境	大气区	0.05~0.10	
	浪溅区	有掩护条件	0.20~0.30
		无掩护条件	0.40~0.50
	水位变动区、水下区	0.12	
	泥下区	0.05	
淡水环境	水上区	0.06	
	水下区	0.03	
	泥下区	0.03	

注:①平均腐蚀速度适用于 pH=4~10 的环境条件,对有严重污染的环境,应适当增大;

②对水质含盐量层次分明的河口区或年平均气温高、波浪大、流速大的环境,应适当增大;

③钢板桩岸侧可参照泥下区取值。

钢结构防腐蚀措施

7.3.9 钢结构防腐蚀设计方案应综合考虑环境条件、结构形式、外形尺寸、使用状况和经济成本等因素,经论证后确定,采取的防腐蚀措施宜按表 7.3.9 选用。

表 7.3.9 钢结构防腐蚀措施

所处环境	结构所处部位	保护工作年限 20 年及以下	保护工作年限 20 年以上
海水环境	大气区	涂层保护、金属热喷涂保护	包覆有机复合层保护
	浪溅区	涂层保护、金属热喷涂保护	包覆有机复合层保护
	水位变动区	涂层保护、金属热喷涂保护	包覆有机复合层保护
	水下区	牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护、牺牲阳极阴极保护与涂层联合保护、外加电流阴极保护与涂层联合保护	牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护、牺牲阳极阴极保护与涂层联合保护、外加电流阴极保护与涂层联合保护
	泥下区	牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护	牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护
淡水环境	水上区	涂层保护、金属热喷涂保护	包覆有机复合层保护
	水下区	涂层保护、金属热喷涂保护	牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护、牺牲阳极阴极保护与涂层联合保护、外加电流阴极保护与涂层联合保护
	泥下区	涂层保护、金属热喷涂保护、牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护	牺牲阳极阴极保护、外加电流阴极保护

7.4 维护要求

7.4.1 港口工程结构耐久性维护应包括日常检查、偶发事故受损后的检查、定期检测和适时维修。

7.4.2 港口工程混凝土结构耐久性和防腐蚀措施的日常检查应包括下列内容：

- (1) 混凝土表面蜂窝、麻面、露石等原始缺陷；
- (2) 外力作用造成的裂缝、缺损、松动等；
- (3) 海水和淡水环境下因钢筋锈蚀引起的构件表面锈迹、裂缝、空鼓、剥落和露筋等损伤；
- (4) 冻融和化学腐蚀环境构件表面麻面或脱皮、露石，棱角变圆，松顶等损伤；
- (5) 涂层的粉化、变色、裂纹、起泡和脱落等外观变化；
- (6) 混凝土结构耐久性监测系统的完好性。

7.4.3 港口工程钢结构耐久性和防腐蚀措施的日常检查应包括下列内容：

- (1) 钢结构锈蚀发生的位置、面积和分布情况；
- (2) 钢结构由于外力作用引起的损伤情况；
- (3) 钢结构涂层的破损情况；
- (4) 牺牲阳极阴极保护措施的保护电位；
- (5) 外加电流阴极保护措施的保护电位，直流电源的输出电压和电流，辅助阳极的固定情况，电源、电缆等的连接和使用状态等。

7.4.4 港口工程结构偶发事故受损后的检查应包括下列内容：

- (1) 结构水平位移、竖向位移、整体倾斜等整体变形与变位；
- (2) 混凝土强度、弹性模量等性能参数；
- (3) 混凝土构件挠度、裂缝等；
- (4) 钢结构构件挠度，焊缝、螺栓、锁口等连接破损等；
- (5) 影响结构承载力和正常使用的其他情况。

7.4.5 港口工程混凝土结构耐久性定期检测应符合下列规定。

7.4.5.1 耐久性检测可分为钢筋锈蚀、冻融、化学侵蚀等劣化外观检测和专项检测。

7.4.5.2 附加防腐蚀措施定期检测项目和内容应符合表 7.4.5 的规定。

表 7.4.5 附加防腐蚀措施定期检测项目和内容

检测项目	检测内容
表面涂层	涂层外观、涂层干膜厚度和涂层黏结强度
硅烷浸渍	混凝土中氯离子渗透情况和碳化深度
环氧涂层钢筋、不锈钢钢筋、不锈钢复合钢筋	钢筋腐蚀电位
钢筋阻锈剂、抗侵蚀抑制剂、抗侵蚀防腐剂	钢筋腐蚀电位
外加电流阴极保护	保护电位、电源和电缆状态

7.4.6 钢结构防腐蚀定期检测的项目和内容应符合表 7.4.6 的规定。

表 7.4.6 钢结构防腐蚀的定期检测项目和内容

检测项目	检测内容
涂层	涂层外观、涂层干膜厚度和涂层黏结强度
金属热喷涂	涂层外观、涂层干膜厚度和涂层黏结强度
牺牲阳极阴极保护	保护电位、阳极实际尺寸和腐蚀产物表面溶解情况
外加电流阴极保护	保护电位、电源和电缆状态
包覆有机复合层	包覆层完整性、钢材锈蚀状态

7.4.7 港口工程结构防腐蚀定期检测与评估方法应符合现行行业标准《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)的有关规定,并宜针对结构所处的腐蚀环境进行耐久性预测。

7.4.8 港口工程结构应根据构件的重要程度、环境条件和设计使用年限实施耐久性监测,并应按现行行业标准《水运工程自动化监测技术规范》(JTS/T 305)和《港口水工建筑物结构健康监测技术规范》(JTS/T 312)的有关规定进行监测系统的设计、安装、维护和结果分析。

7.4.9 港口工程结构耐久性维修应符合下列规定。

7.4.9.1 对于状态完好、经检测评估预测其耐久性可达到设计使用年限的结构,可不

采取维修措施。

7.4.9.2 对于检查和检测发现的破损混凝土构件应及时进行修补。对于检测发现防腐措施局部损伤或防腐蚀体系出现异常,经评估进行局部修补或更换可以满足设计保护年限要求的,应及时采取修复措施。

7.4.9.3 对于已出现劣化且经检测评估预测其耐久性不满足设计使用年限要求的结构,应进行耐久性再设计并采取耐久性维修措施。

7.4.10 出现下列情况之一时,应根据检测与评估结果对港口工程结构进行必要的修复设计:

- (1) 环境条件发生较大变化;
- (2) 出现影响结构安全和使用的非正常变形、变位、裂缝、破损和耐久性损伤等;
- (3) 结构因台风、地震等重大自然灾害和偶发事故受损;
- (4) 结构的防腐蚀措施达到设计保护年限。

附录 A 海水环境混凝土结构设计 使用年限校核算例

A.1 设计条件

(1) 华东某新建海港码头的设计使用年限为 100 年,对该码头浪溅区的现浇钢筋混凝土梁进行耐久性设计;

(2) 根据表 7.2.35-4,取混凝土环境系数 $k_{e,cl}=0.85$;梁处于浪溅区,根据表 7.2.35-1,取混凝土临界氯离子浓度特征值 $c_{cr,c}=0.75\%$,根据表 7.2.35-2,混凝土表面氯离子浓度回归系数特征值 $A_{c_s}=16.45$;根据表 7.2.36,钢筋锈蚀环境条件影响系数取 $k_{co}=1.0$;

(3) 钢筋混凝土梁主要承受其自重和码头面荷载,按 1 类构件考虑,根据表 7.2.35-5,钢筋应力与钢筋屈服强度比值取 $\sigma_q/f_{yk}=0.6$;

(4) 选取钢筋混凝土梁混凝土的水胶比 $w/b=0.35$,混凝土强度等级为 C45,掺入粉煤灰占凝胶材料总量 $FA/b=0.15$ 的 I 级粉煤灰和矿渣占凝胶材料总量 $SG/b=0.35$ 的粒化高炉矿渣粉;混凝土初始氯离子浓度计算值取 0.1%;按 $t_0=0.0767$ 年(28d)确定混凝土的氯离子初始扩散系数 $D_{cl,0}$; $t_a=20$ 年后氯离子扩散系数不再变化;

(5) 根据表 7.2.16,海水环境受力钢筋的混凝土保护层最小厚度为 70mm,取 $x_d=70$ mm;采用直径 $d=28$ mm 的钢筋。

A.2 使用年限计算

A.2.1 氯离子侵入混凝土导致钢筋发生锈蚀所经历的时间

(1) 混凝土临界氯离子浓度计算值:

根据式(7.2.35-3):

$$c_{cr} = c_{cr,c} \cdot \frac{1}{\gamma_{c_{cr}}} = \frac{0.75\%}{1.7} = 0.441\% \quad (\text{A.1})$$

(2) 混凝土表面氯离子浓度计算值:

根据式(7.2.35-4):

$$c_s = A_{c_s} \cdot (w/b) \cdot \gamma_{c_s} = 16.45 \times 0.35 \times 1.1 = 6.333\% \quad (\text{A.2})$$

(3) 混凝土保护层厚度计算值:

对于现浇钢筋混凝土梁, $\Delta x=10$ mm。根据式(7.2.35-5):

$$x = x_d - \Delta x = 70 - 10 = 60(\text{mm}) \quad (\text{A.3})$$

(4) 混凝土氯离子扩散系数龄期因子:

根据式(7.2.35-10):

$$\begin{aligned} n_{cl} &= 0.2 + 0.4 \left(\frac{FA/b}{0.5} + \frac{SG/b}{0.7} \right) \\ &= 0.2 + 0.4 \times \left(\frac{0.15}{0.5} + \frac{0.35}{0.7} \right) \\ &= 0.52 < 0.6 \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

取 $n_{cl} = 0.52$ 。

(5) 混凝土 28d 快速试验氯离子扩散系数计算值:

根据 $w/b = 0.35$, $FA/b = 0.15$, $SG/b = 0.35$, 计算 $\frac{c}{w}$ 、 $\frac{FA}{w}$ 、 $\frac{SG}{w}$:

$$\frac{c}{w} = \frac{1 - FA/b - SG/b}{w/b} = \frac{1 - 0.15 - 0.35}{0.35} = 1.429 \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{FA}{w} = \frac{FA/b}{w/b} = \frac{0.15}{0.35} = 0.429 \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{SG}{w} = \frac{SG/b}{w/b} = \frac{0.35}{0.35} = 1.0 \quad (\text{A.7})$$

根据式(7.2.35-6):

$$\begin{aligned} D_{cl,0} &= \gamma_{D,cl} \cdot 10^{1.95 - 1.25 \left(\frac{0.32c + 0.26FA + 0.42SG}{w} \right)} \\ &= 1.1 \times 10^{1.95 - 1.25 \times (0.32 \times 1.429 + 0.26 \times 0.429 + 0.42 \times 1.0)} \\ &= 5.693 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s}) \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

(6) 混凝土氯离子扩散系数影响系数:

根据式(7.2.35-9):

$$k_{f,cl} = 1 + 2.1 \left(\frac{\sigma_g}{f_{yk}} \right)^3 = 1 + 2.1 \times 0.6^3 = 1.454 > 0.5 \quad (\text{A.9})$$

根据式(7.2.35-7):

$$k_{cl} = k_{e,cl} \cdot k_{c,cl} \cdot k_{f,cl} = 0.85 \times 0.5 \times 1.454 = 0.618 \quad (\text{A.10})$$

(7) 氯离子侵入混凝土导致钢筋发生锈蚀所经历的时间:

根据式(7.2.35-2):

$$\begin{aligned} c_{t_s} &= c_0 + (c_a - c_0) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{0.0317x}}{\sqrt{\frac{4k_{cl}D_{cl,0}t_s}{1-n_{cl}} \left(\frac{t_0}{20} \right)^{n_{cl}}}} \right] \right\} \\ &= 0.1\% + (6.333\% - 0.1\%) \times \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{0.0317} \times 60}{\sqrt{\frac{4 \times 0.618 \times 5.693 \times 20}{1-0.52} \times \left(\frac{0.0767}{20} \right)^{0.52}}} \right] \right\} \\ &= 0.150\% \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

根据式(7.2.35-1):

$$\begin{aligned}
 t_i &= t_s + \frac{0.0317x^2}{4k_{cl}D_{cl,0}\left(\frac{t_0}{t_s}\right)^{n_{cl}}\left[\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{c_{cr} - c_{i_s}}{c_s - c_{i_s}}\right)\right]^2} \\
 &= 20 + \frac{0.0317 \times 60^2}{4 \times 0.618 \times 5.693 \times \left(\frac{0.0767}{20}\right)^{0.52} \times \left[\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{0.441 - 0.150}{6.333 - 0.150}\right)\right]^2} \\
 &= 94.19(\text{年})
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

A.2.2 钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间

(1) 混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的临界锈蚀深度:

根据式(7.2.36-2):

$$\begin{aligned}
 p &= a_1 + a_2 \frac{x}{d} + a_3 f_{cu,k} \\
 &= 0.018 + 0.012 \times \frac{60}{28} + 0.00084 \times 45 \\
 &= 0.0815(\text{mm})
 \end{aligned} \tag{A.13}$$

(2) 钢筋初锈时的电流密度:

根据式(7.2.36-3):

$$\begin{aligned}
 i_{co} &= \frac{72.0k_{co}\left(1 - \frac{w}{c + 2.1FA + 3.4SG}\right)^{-1.64}}{x} \\
 &= \frac{72.0 \times 1.0 \left(1 - \frac{1}{1.429 + 2.1 \times 0.429 + 3.4 \times 1.0}\right)^{-1.64}}{60} \\
 &= 1.644(\mu\text{A}/\text{cm}^2)
 \end{aligned} \tag{A.14}$$

(3) 钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间:

根据式(7.2.36-1):

$$t_c = \left(\frac{p}{0.014i_{co}}\right)^{1.4} = \left(\frac{0.0815}{0.014 \times 1.644}\right)^{1.4} = 5.87(\text{年}) \tag{A.15}$$

A.3 设计使用年限校核

根据式(7.2.34-1):

$$t_i + t_c = 94.19 + 5.87 = 100.06(\text{年}) > t_d = 100(\text{年}) \tag{A.16}$$

使用年限满足要求。

附录 B 淡水碳化环境混凝土结构设计 使用年限校核算例

B.1 设计条件

(1) 华南地区某新建内河码头设计使用年限为 100 年,对位于水位变动区的预制梁构件进行耐久性设计;

(2) 码头所处环境温度 T 为 22°C ;环境相对湿度 RH 为 80% ;二氧化碳浓度 C_{CO_2} 为 0.04% ;构件位置影响系数 K_{kl} 按角区取 1.40 ;浇筑面影响系数 K_{kt} 按非浇筑面取 1.0 ;工作应力影响系数 K_{ks} 按受拉区取 1.1 ;酸雨和冻融环境下碳化速度修正系数 K 取 1.3 ;局部环境系数 m 按湿热地区干湿交替环境取 4.0 ;

(3) 混凝土初始电阻率 ρ_0 取 $475\Omega \cdot \text{m}$,电阻率测试时的混凝土龄期 $t_{0,p}$ 取 0.0767 年,电阻率稳定龄期 t_{st} 取 1.0 年;普通硅酸盐水泥,按表 7.2.38-2,电阻率的时间因子 n_{ca} 取 0.23 ;按表 7.2.38-3,对于水位变动区,电阻率湿度因子 $k_{\text{RH,ca}}$ 取 1.0 ;湿度等效时间系数 w_t ,按中等湿度有遮盖有水汽环境,取 0.5 ;

(4) 初步选定采用普通硅酸盐水泥,混凝土水胶比 0.45 ,不使用粉煤灰,粉煤灰取代系数 K_{F} 取 1.0 ;混凝土强度等级 C35, $f_{\text{cu,k}}$ 取 $35\text{N}/\text{mm}^2$,钢筋直径为 20mm ,钢筋的混凝土保护层厚度为 50mm 。

B.2 使用年限计算

B.2.1 混凝土碳化导致钢筋发生锈蚀所经历的时间

(1) 混凝土保护层厚度计算值:

对于预制钢筋混凝土梁, $\Delta x = 5\text{mm}$,根据式(7.2.35-5):

$$x = x_{\text{d}} - \Delta x = 50 - 5 = 45(\text{mm}) \quad (\text{B.1})$$

(2) 混凝土碳化系数计算:

根据式(7.2.37-2)和第 7.2.37.2 款:

$$\begin{aligned} k &= 3K_{\text{CO}_2}K_{\text{kl}}K_{\text{kt}}K_{\text{ks}}K_{\text{F}}T^{0.25}RH^{1.5}(1-RH)\left(\frac{58}{f_{\text{cu,k}}}-0.76\right)K \\ &= 3 \times \sqrt{0.04/0.03} \times 1.4 \times 1.0 \times 1.1 \times 1 \times 22^{0.25} \times 0.8^{1.5} \times (1-0.8) \times \left(\frac{58}{35}-0.76\right) \times 1.3 \\ &= 1.928 \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

(3) 碳化残量修正系数:

根据式(7.2.37-4):

$$\lambda = x + 0.066(x-28)^{0.47k} = 45 + 0.066 \times (45-28)^{0.47 \times 1.928} = 45.86 \quad (\text{B.3})$$

(4) 混凝土碳化残量:

根据式(7.2.37-3):

$$x_0 = (1.2 - 0.35k^{0.5}) \cdot \lambda - \frac{6.0}{m+1.6} (1.5 + 0.84k) = 29.40(\text{mm}) \quad (\text{B.4})$$

(5) 碳化作用下钢筋发生锈蚀所经历的时间:

根据式(7.2.37-1):

$$t_i = \left(\frac{x - x_0}{k} \right)^2 = \left(\frac{45 - 29.40}{1.928} \right)^2 = 65.4(\text{年}) \quad (\text{B.5})$$

B.2.2 钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间

(1) 混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的临界锈蚀深度:

根据式(7.2.36-2):

$$\begin{aligned} p &= a_1 + a_2 \frac{x}{d} + a_3 f_{cu,k} \\ &= 0.018 + 0.012 \times \frac{45}{20} + 0.00084 \times 35 \\ &= 0.0744(\text{mm}) \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

(2) 温度因子:

根据式(7.2.38-4):

$$k_{T,ca} = \frac{1}{1 + K_{ca}(T - 20)} = \frac{1}{1 + 0.073 \times (22 - 20)} = 0.87 \quad (\text{B.7})$$

(3) 混凝土产生顺筋裂缝时的电阻率:

根据式(7.2.38-3):

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{t_h}{t_{0,\rho}} \right)^{n_{\rho}} \cdot k_{T,ca} \cdot k_{RH,ca} = 475 \times \left(\frac{1}{0.0767} \right)^{0.23} \times 0.87 \times 1 = 748.18(\Omega \cdot \text{m}) \quad (\text{B.8})$$

(4) 混凝土产生顺筋裂缝时钢筋的腐蚀速率:

根据式(7.2.38-2):

$$V = 2 \cdot \frac{m_0}{\rho} \cdot \gamma_V = 2 \times \frac{0.882}{748.18} \times 1.4 = 0.0033(\text{mm/年}) \quad (\text{B.9})$$

(5) 钢筋锈蚀导致保护层出现顺筋裂缝所经历的时间:

根据式(7.2.38-1):

$$t_c = \frac{p}{w_i V} = \frac{0.0744}{0.5 \times 0.033} = 45.1(\text{年}) \quad (\text{B.10})$$

B.3 设计使用年限校核

根据式(7.2.34-1):

$$t_i + t_c = 65.4 + 45.1 = 110.5(\text{年}) > t_d = 100(\text{年}) \quad (\text{B.11})$$

使用年限满足要求。

附录 C 本指南用词说明

为便于在执行本指南条文时区别对待,对要求严格程度的用词说明如下:

- (1)表示很严格,非这样做不可的,正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”;
- (2)表示严格,在正常情况下均应这样做的,正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
- (3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的,正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
- (4)表示允许选择,在一定条件下可以这样做的采用“可”。

引用标准名录

- 1.《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082)
- 2.《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158)
- 3.《港口工程荷载规范》(JTS 144-1)
- 4.《港口与航道水文规范》(JTS 145)
- 5.《水运工程抗震设计规范》(JTS 146)
- 6.《水运工程地基设计规范》(JTS 147)
- 7.《水运工程桩基设计规范》(JTS 147-7)
- 8.《水运工程土工合成材料应用技术规范》(JTS/T 148)
- 9.《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151)
- 10.《水运工程钢结构设计规范》(JTS 152)
- 11.《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153)
- 12.《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154)
- 13.《码头结构设计规范》(JTS 167)
- 14.《码头附属设施技术规范》(JTS 169)
- 15.《水运工程水工建筑物原型观测技术规范》(JTS 235)
- 16.《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》(JTS 304)
- 17.《水运工程自动化监测技术规范》(JTS/T 305)
- 18.《港口水工建筑物结构健康监测技术规范》(JTS/T 312)
- 19.《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)
- 20.《铁路列车荷载图式》(TB/T 3466)
- 21.《铁路桥涵设计规范》(TB 10002)
- 22.《酸雨和酸雨区等级》(QX/T 372)

附加说明

本指南主编单位、参编单位、主要起草人、
主要审查人、总校人员和管理组人员名单

主编单位:中交水运规划设计院有限公司

参编单位:大连理工大学

中交四航工程研究院有限公司

中交第四航务工程局有限公司

中交上海三航科学研究院有限公司

天津大学

主要起草人:杨国平(中交水运规划设计院有限公司)

胡家顺(中交水运规划设计院有限公司)

王胜年(中交第四航务工程局有限公司)

贡金鑫(大连理工大学)

李荣庆(中交水运规划设计院有限公司)

(以下按姓氏笔画为序)

王元战(天津大学)

王安华(中交水运规划设计院有限公司)

吕亭豫(中交水运规划设计院有限公司)

任增金(中交水运规划设计院有限公司)

张立斌(中交水运规划设计院有限公司)

吴哲丰(中交水运规划设计院有限公司)

吴 锋(中交上海三航科学研究院有限公司)

陈志乐(中交水运规划设计院有限公司)

范志宏(中交四航工程研究院有限公司)

陈际丰(中交水运规划设计院有限公司)

施 凌(中交水运规划设计院有限公司)

储小欢(中交水运规划设计院有限公司)

檀会春(中交水运规划设计院有限公司)

主要审查人:徐 光

(以下按姓氏笔画为序)

王玉红、王炜正、李天碧、李森林、吴 澎、应永良、沈迪州、
张志明、陈 凯、徐 俊、蒋 千

总校人员:谢 燕、秦 川、刘连生、董 方、王玉红、杨国平、胡家顺、
吴 锋、吴哲丰、范志宏、王元战、李荣庆、檀会春

管理组人员:陈际丰(中交水运规划设计院有限公司)

李荣庆(中交水运规划设计院有限公司)

檀会春(中交水运规划设计院有限公司)

中华人民共和国行业标准

**设计使用年限 50 年以上
港口工程结构设计指南**

JTS/T 200—2023

条文说明

目 次

1	总则	(47)
2	术语	(48)
3	基本规定	(49)
4	作用	(50)
4.1	一般规定	(50)
4.2	堆货荷载和人群荷载	(50)
4.4	铁路列车荷载	(50)
4.5	汽车荷载	(50)
4.6	船舶荷载	(50)
4.7	风荷载	(51)
4.10	波浪力	(51)
4.12	地震作用	(51)
4.13	温度作用	(52)
4.14	外加位移和变形	(52)
4.16	偶然作用	(52)
7	耐久性设计	(53)
7.1	一般规定	(53)
7.2	混凝土结构	(53)
7.3	钢结构	(58)

1 总 则

1.0.3 国家现行有关标准主要包括行业标准《码头结构设计规范》(JTS 167)、《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154)、《水运工程地基设计规范》(JTS 147)、《水运工程抗震设计规范》(JTS 146)等。

2 术 语

2.0.4 预定条件指正常设计、正常施工、正常使用和维护、环境条件、使用荷载条件等。其中正常设计、正常施工、正常使用和维护是国家标准《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158—2010)规定的达到设计使用年限的前提,环境条件和使用荷载条件是进行耐久性定量设计的另外两个前提。

3 基本规定

3.0.1 特殊要求主要是从满足特定使用功能角度考虑;重要战略意义主要从一旦功能中断后果严重的角度考虑;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。

3.0.2 本条中的使用要求包括了结构功能和使用特殊要求。

3.0.9 本条规定参考国家标准《港口工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50158—2010),规定了重要性系数的最小取值。对于设计使用年限50年以上的港口工程结构,安全等级为三级的结构可能用不到,但从设计人员使用习惯出发,未做大的改动,仍保留三级的规定。

3.0.10 必要时是指如果提高某一构件的重要性系数所增加的费用很少,但能减轻整个结构的破坏程度,从而大大减少人员伤亡和财物损失等情况。

3.0.14 随着水运工程自动化监测的快速发展,自动化监测方法和仪器设备等日趋成熟,已在我国水运工程得到较为广泛的应用。对于设计使用年限50年以上的港口工程结构,水运工程自动化监测在全面、准确、实时获取监测数据,改善监测条件方面更具优势,对于保障工程安全运行具有重要意义,因此本条提出采用自动化手段进行健康监测的建议。

4 作 用

4.1 一般规定

4.1.2 直接作用是指施加于结构上的集中力和分布力,如自重、堆货荷载、波浪力等。工程上习惯将这些力称为“荷载”,为了保持用语上的习惯和连续性,“荷载”仅作为直接作用的同义词。间接作用是指引起结构外加变形和约束变形的原因,如地震、温度作用等。

4.2 堆货荷载和人群荷载

4.2.2 本条通过相关专题研究,根据堆货荷载和人群荷载的统计特性,按等超越概率的原则,通过概率分析得出不同设计使用年限的调整系数。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。

4.4 铁路列车荷载

4.4.1 港口工程中的铁路列车荷载是引用了铁路行业有关标准中的计算图示,铁路行业荷载设计基准期为 100 年,本指南编制过程中,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了分析,设计使用年限为 110 年时,调整系数为 1.006,设计使用年限为 120 年时,调整系数为 1.011,为便于应用,本指南不再考虑铁路列车荷载使用年限调整系数。

4.5 汽车荷载

4.5.1 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,但随着发展出现新车型的可能性较大,因此规定必要时应根据现状车型和未来发展趋势论证确定。

4.6 船舶荷载

4.6.2 设计使用年限为 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时,出现超越系泊标准而导致绞盘刹车失效引起缆绳破断的可能性增大,因此考虑将其作为非正常状况,对系缆结构安全性进行核算。

4.7 风 荷 载

4.7.1 行业标准《港口工程荷载规范》(JTS 144-1—2010)条文说明中给出了通过统计分析得到的不同重现期风压比值公式,以国外规范及我国各地风压资料为基础统计,平均得出不同重现期风压比值 μ_R 为:

$$\mu_R = (0.363 \lg T_R + 0.463) / 1.08 \quad (4-1)$$

式中, μ_R 为风压比值, T_R 为重现期(年)。

4.10 波 浪 力

4.10.1 本条通过相关专题研究,根据作用在不同设计使用年限内等超越概率的原则,得出不同设计使用年限的波浪重现期计算公式。

4.10.2 本条是参考国外相关标准并总结国内外有关工程经验提出。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,这种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一般考虑设计使用年限、工程重要性和工程位置的自然条件合理确定,指出如果超越概率小于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,本条中波浪重现期取1~3倍设计使用年限是常规推荐;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。根据设计使用年限、重现期和超越概率的关系,以设计使用年限为100年为例,波浪重现期取100年,超越概率为63.2%;波浪重现期取300年,超越概率为28.3%。

4.12 地 震 作 用

4.12.1~4.12.3 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。首先推荐通过场地地震危险性分析确定地震动参数,与行业标准《水运工程抗震设计规范》(JTS 146—2012)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,一般采用设计使用年限调整系数进行计算。本指南专题计算了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,以50年为基础,给出了不同设计使用年限的地震动参数调整系数,见表4.1。为简化计算,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。

表 4.1 考虑设计使用年限的地震动参数调整系数

设计使用年限 (年)	基本设防烈度					
	6	7	7	8	8	9
	基本地震加速度(g)					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

续表 4.1

设计使用年限 (年)	基本设防烈度					
	6	7	7	8	8	9
	基本地震加速度(g)					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
75	1.18	1.18	1.18	1.17	1.17	1.16
100	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.28
120	1.43	1.41	1.40	1.39	1.38	1.36

4.13 温度作用

4.13.1 关于温度作用计算,现行港口工程结构设计规范中尚无相应计算规定。设计使用年限 50 年以上时,本指南参考国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)和行业标准《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),结合港口工程结构特点,提出了温度作用计算规定。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。

4.13.4 温度作用是指结构或构件内温度的变化,在结构构件任意截面上的温度分布,一般认为由三个分量叠加组成,即均匀分布的温度分量、沿截面线性变化的温度分量(梯度温差)和非线性变化的温度分量。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,本指南仅对均匀温度作用做出规定,其他情况一般参考有关文献或根据设计经验酌情处理。

4.14 外加位移和变形

4.14.1 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。

4.16 偶然作用

4.16.2 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。

7 耐久性设计

7.1 一般规定

7.1.7 对于氯离子引起的混凝土中的钢筋锈蚀,目前国内外已进行了大量的试验和理论研究,普遍认为分为3个阶段,第一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,第二阶段为钢筋开始锈蚀到混凝土保护层出现纵向裂缝的时间段,第三阶段为混凝土出现纵向裂缝后钢筋加速开裂的阶段。本指南在国内外相关规范规定的基础上,针对不同构件特点,对结构耐久性极限状态进行了规定。

采用钢绞线或钢丝作为预应力筋时,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;采用螺纹钢筋作为预应力筋时,与钢绞线或钢丝相比,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,对于采用螺纹钢筋作为预应力筋时,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;对于桩,因其为结构基础,位置特殊,一旦发生破坏,后果严重且很难修复,因此,规定以钢筋脱钝作为耐久性极限状态。

7.2 混凝土结构

7.2.16 本条参考国内有关耐久性设计规范,在设计使用年限为50年相应规定的基础上,提出增加5mm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。另外,考虑水位变动区腐蚀环境比大气区严酷,因此规定保护层最小厚度比大气区增加5mm。

7.2.17 本条参考国内有关耐久性设计规范,在设计使用年限为50年相应规定的基础上,增加5mm作为设计使用年限50年以上混凝土保护层厚度的基本要求。

7.2.18 淡水环境混凝土结构耐久性主要是受碳化和水流、泥沙冲刷侵蚀影响,本条参考行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)和国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019),在设计使用年限为50年相应规定的基础上,增加5mm作为设计使用年限50年以上混凝土保护层厚度的基本要求。

7.2.20 本条参考国内有关耐久性设计规范,在设计使用年限为50年相应规定的基础上,增加5mm作为设计使用年限50年以上混凝土保护层厚度的基本要求。

7.2.24 本条参考国内有关耐久性设计规范,对于普通混凝土,在设计使用年限为50年相应规定的基础上,提出提高1个等级作为设计使用年限50年以上混凝土最低强度等级的基本要求。

7.2.25 本条参考国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)和行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)、《公路工程混凝土结构耐久性设计标准》(JTG/T 3310—2019)的有关规定,在设计使用年限为 50 年相应规定的基础上,减小了部分环境条件下的水胶比,作为设计使用年限 50 年以上混凝土水胶比最大允许值的基本要求。

7.2.27 本条根据行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015),适当减小后作为设计使用年限 50 年以上时的基本要求。

7.2.28 我国沿海海水环境和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。本条参考国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)的有关规定制定。

7.2.29 行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)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了规定,抗冻等级即采用标准养护 28d 龄期的试块在吸水饱和后,承受反复冻融循环,以相对动弹性模量下降至 75%,或质量损失率达 5% 时相应的冻融循环次数。

对于设计使用年限 50 年以上的混凝土结构,其他行业一般以抗冻耐久性指数为控制指标,抗冻耐久性指数为混凝土试件经 300 次快速冻融循环后混凝土的动弹性模量 E_1 与其初始值 E_0 的比值, $DF = 100\% \times E_1/E_0$; 在达到 300 次循环之前 E_1 已降至初始值的 60% 或试件重量损失已达到 5% 的试件,以此时的循环次数 N 计算其 DF 值, $DF = 0.6 \times N/300 \times 100\%$ 。

参考国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)和行业标准《公路工程混凝土结构耐久性设计标准》(JTG/T 3310—2019),并根据我国水运行业有关工程实践经验,提出对混凝土抗冻耐久性指数的规定。对于设计使用年限大于 100 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。

7.2.30 结合我国各行业规范规定和工程调研结果,从与现行水运行业规范衔接的角度,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。表中数值是参考国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476—2019)和行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015),并结合国内相关工程实践经验制定。

7.2.31 设计使用年限为 50 年的海水环境和淡水碳化环境混凝土结构,一般是通过对混凝土强度等级、水胶比等进行控制以满足耐久性要求。对于 50 年以上的海水环境和淡水碳化环境混凝土结构,除满足上述相关规定外,提出了通过计算对设计使用年限进行校核的规定。

本指南制定过程中,对钢筋混凝土结构锈蚀后的承载力和变形进行了分析,结果表明,构件出现纵向顺筋锈蚀裂缝时,锈蚀程度尚不大,对钢筋混凝土构件承载力的影响很小,可以忽略不计,所以不考虑设计使用年限内构件承载力的衰减,即各种承载能力极限状态验算方法按现行行业标准的有关规定执行。计算同时表明,钢筋锈蚀导致刚度有一

定退化,因此规定对钢筋混凝土受弯构件应进行刚度退化后的挠度验算。

7.2.35 氯离子传输机制非常复杂,包括多个物理过程,耐久性分析中通常以扩散作为氯离子的主要侵入方式。经典的理论分析方法将氯离子扩散看成是一个线性扩散过程,混凝土某一深度氯离子浓度随时间的变化规律可用 Fick 第二定律描述。试验表明,随着混凝土中水泥水化过程的不断进行,混凝土内部微观结构不断变化,混凝土的氯离子扩散系数随时间逐渐减小,约在 20~30 年时趋于稳定。本条计算混凝土中氯离子扩散到钢筋表面且达到临界浓度的时间时考虑了氯离子扩散系数的变化,并建议氯离子扩散趋于稳定的时间取为 20 年。这样混凝土中氯离子浓度的计算分为两个阶段,即不稳定扩散阶段和稳定扩散阶段,不稳定阶段采用时变的氯离子扩散系数,稳定阶段采用非时变的氯离子扩散系数,两个阶段的计算公式是不同的。因为 50 年以上的设计使用年限涵盖了氯离子不稳定扩散阶段的时间(20 年),计算钢筋表面氯离子达到临界浓度的时间时不需再判断氯离子扩散处于哪个阶段,所以直接按式(7.2.35-1)计算即可。

混凝土初始氯离子浓度计算值是根据行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)中关于海水环境混凝土拌合物中按占胶凝材料质量百分比的氯离子含量最高限值规定提出。

7.2.35.1 本款采用了行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)的混凝土临界氯离子浓度建议值。

7.2.35.2 影响混凝土表面氯离子浓度的因素较多,对氯离子扩散机制的认识、试验和测量方法等多方面存在差别,国外各手册、指南或软件中采用的混凝土表面氯离子浓度计算公式或规定值不同。本条采用了行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)中的混凝土表面氯离子浓度计算公式。

7.2.35.3 在海水环境混凝土结构耐久性设计中,混凝土保护层厚度反映了混凝土表面氯离子扩散进入混凝土、到达钢筋表面行走的“路程”。由于施工误差等原因,混凝土保护层厚度具有一定的随机性,为使计算的混凝土结构使用年限有规定的保证率,对使用年限进行计算时考虑安全裕度 Δx 对混凝土保护层厚度进行折减。本条采用了行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)中混凝土安全裕度 Δx 的建议值。

7.2.35.4 确定氯离子扩散系数的方法有三种:自然扩散法、加速扩散法和经验公式法。通过自然扩散法或加速扩散法试验确定氯离子扩散系数再进行混凝土结构使用年限设计是不方便的。经验公式法是利用实验室试验数据或根据实际工程调查资料建立的经验公式预测混凝土氯离子扩散系数的方法。美国 Life-365《使用寿命预测模型》、日本土木工程师协会《混凝土结构标准-2007“养护”》给出了计算混凝土氯离子扩散系数的公式:

美国 Life-365《使用寿命预测模型》:

$$D_{28} = 1.0 \times 10^{-12.06 + 2.4w/c} \quad (7-1)$$

日本土木工程师协会《混凝土结构标准-2007“养护”》:

$$\lg D = -3.9(w/c)^2 + 7.2(w/c) - 2.5 \text{ (普通硅酸盐水泥)} \quad (7-2)$$

$$\lg D = -3.0(w/c)^2 + 5.4(w/c) - 2.2 \text{ (高炉矿渣硅酸盐水泥)} \quad (7-3)$$

式中, w/c 为混凝土水灰比。

试验研究表明,不同矿物掺合料对混凝土耐久性的影响是不同的,相同水胶比不同的矿物掺合料比例下混凝土的氯离子扩散系数也是不同的,为体现不同矿物掺合料在混凝土结构使用年限计算中各自的作用,根据对所收集试验资料的分析,提出了包括水胶比、粉煤灰掺量、粒化高炉矿渣掺量等材料参数的氯离子扩散系数计算公式。在确定 w/b 、 FA/b 、 SG/b 后, c/w 、 FA/w 、 SG/w 按下列公式计算:

$$\frac{c}{w} = \frac{1 - FA/b - SG/b}{w/b}, \quad \frac{FA}{w} = \frac{FA/b}{w/b}, \quad \frac{SG}{w} = \frac{SG/b}{w/b} \quad (7-4)$$

7.2.35.5 混凝土环境系数主要反映的是环境温度的影响。本指南引用行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)给出的国内华南地区、华东地区和北方地区的混凝土环境系数,也给出了根据环境温度计算混凝土环境系数的公式。

国内有关文献对 RCM 法与自然扩散法试验测得的氯离子扩散系数进行了对比研究,表明 RCM 法测得的氯离子扩散系数约为自然扩散法测得的氯离子扩散系数的 2~4 倍,因此本指南取转换系数 $k_{c,d} = 0.5$ 。

针对海港工程中常见的梁、板和桩,本条以钢筋应力比体现荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响,参考国内外研究成果,基于理论分析和工程经验,给出了相对应力 σ_q / f_{yk} 的建议值。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,如本款中的“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很小,作用于结构的时间很短,在服役期的大部分时间内结构都是处于低应力状态,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。预应力混凝土受弯构件按相对于消压状态的钢筋应力考虑。对于桩,根据两种典型受力状态,“1”类指偏心受拉的情况,“2”类指偏心受压情况,相对应力 σ_q / f_{yk} 的确定方法与受弯构件相似。

7.2.35.6 混凝土氯离子扩散系数随时间的增加而不断降低,扩散系数龄期因子反映了氯离子扩散系数随时间降低的速度,该因子受多种因素影响。随着混凝土龄期的延长,混凝土中水泥水化产生的氢氧化钙与矿物掺合料发生二次火山灰反应,水化产物填充了混凝土内部的一部分孔径较大的孔隙,并阻断了部分孔的连通,从而使混凝土变得更加密实,密实的程度与矿物掺合料的掺量有关。因此,混凝土氯离子扩散系数龄期因子考虑矿物掺合料各自的掺量非常重要。为此,本条引入美国 Life-365《使用寿命预测模型》的氯离子扩散系数龄期因子模型。

7.2.36 本条考虑钢筋的锈蚀电流密度是一个随时间减小的变量,根据有关文献研究成果,引入了下面被广泛应用的锈蚀电流密度与时间的关系:

$$i_c(t) = i_{c0} \cdot 0.85t^{-0.3} \quad (7-5)$$

式中, t 为钢筋开始锈蚀后的某一时刻; i_{c0} 为钢筋初锈时的电流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)。

由法拉第定律,经推导得出本条混凝土保护层锈胀开裂阶段所经历的时间计算公式。

7.2.36.2 混凝土中水泥、矿物掺合料对钢筋锈蚀电流的影响是不同的,这源于钢筋锈蚀过程中对混凝土电阻的影响,而混凝土的电阻与氯离子传输密切相关,氯离子传输与水泥、矿物掺合料各自的用量有关。本指南编制过程中利用有关文献的试验数据给出考虑水泥、矿物掺合料影响的钢筋锈蚀电流密度计算公式。

7.2.37.1 参考国家标准《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)中的混凝土碳化系数计算公式,该公式主要根据大量数据,考虑了环境 CO₂ 浓度、构件边角区影响、浇注和养护条件影响、环境湿度、结构受力情况等因素,回归拟合得出。

7.2.37.2 研究表明,冻融和酸雨会在一定程度上加快碳化发展速率,参考国家标准《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)提出的影响系数取值范围,结合行业标准《酸雨和酸雨区等级》(QX/T 372—2017)的酸雨区域划分和港口工程冻融环境划分,提出了碳化速度的修正系数取值。

7.2.37.3 国内外提出的混凝土碳化公式很多,各公式的表达形式差异很大。考虑国内目前缺少混凝土碳化速率的标准试验方法和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,本指南参考国家标准《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)提出的碳化模型,公式中各参数取值是基于大量试验数据拟合得出,由于缺少明确的物理内涵,计算时采用规定量纲下的数值,并未考虑各参数量纲的运算。

构件所处局部环境对钢筋脱钝和锈蚀速率有很大影响,局部环境系数综合考虑局部环境温度、湿度、干湿交替等对钢筋脱钝的影响,参考国家标准《既有混凝土结构耐久性评定标准》(GB/T 51355—2019)的取值原则,针对港口工程特点提出取值范围。

7.2.38 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,本指南参考了行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》(JTS 153—2015)和欧洲 DuraCrete《Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures》(2000年)的锈胀开裂模型。

7.2.39 在国内有关研究成果的基础上,通过对公式中的系数进行归一化调整,给出了锈蚀钢筋混凝土受弯构件刚度折减系数公式。以均匀锈蚀为基础,给出了钢筋锈蚀率计算公式:

$$\eta_s = \frac{A_{s,corr}}{A_s} = \frac{\pi r^2 - \pi (r - p_r)^2}{\pi r^2} = \frac{2rp_r - p_r^2}{r^2} = \frac{2p_r}{r} - \left(\frac{p_r}{r}\right)^2 \approx 4 \frac{p_r}{d} = \frac{0.056i_{\infty} \cdot t_c^{0.71}}{d} \quad (7-6)$$

式中, η_s 为锈蚀纵向钢筋的锈蚀率; A_s 、 $A_{s,corr}$ 分别为钢筋初始面积和锈蚀后的面积 (mm²); p_r 为钢筋锈蚀深度 (mm); r 、 d 分别为钢筋初始半径和直径 (mm)。

7.2.43 根据国内外现有研究,不锈钢钢筋和外加电流对混凝土结构耐久性的影响机制较清晰,研究成果相对丰富,根据上述措施对钢筋锈蚀临界氯离子浓度的影响定量评估混凝土结构耐久性寿命的延长时间,经过论证分析后计入混凝土结构的设计使用年限。表面涂层、硅烷浸渍、钢筋阻锈剂、抗侵蚀抑制剂、抗侵蚀防腐剂等附加防腐措施对混凝土结构耐久性寿命延长效果的定量分析研究尚缺少成熟成果,实现使用年限的定量设计难度较大,一般作为提高混凝土结构耐久性安全裕度的措施。

7.2.44 相比普通碳钢,不锈钢提高了钢筋锈蚀的临界氯离子浓度,从而延长了钢筋发生锈蚀所经历的时间,提高了结构使用年限。由于铬、镍等元素添加量的差异,不同牌号不锈钢的临界氯离子浓度存在较大差异,见表 7.1,因此建议开展不锈钢钢筋的临界氯离子浓度试验,并根据数据开展耐久性定量设计,同时考虑不锈钢钢筋与普通碳钢混用的情况,规定分别计算不锈钢钢筋与普通碳钢的耐久性寿命。缺乏实测数据时,按表 7.1 所示数值,按不锈钢钢筋与普通钢筋的临界氯离子摩尔浓度比值推算出不锈钢钢筋的临界氯离子浓度占胶凝材料质量百分比,进而计算使用年限。

表 7.1 不同牌号钢筋的锈蚀临界氯离子浓度

钢筋牌号	304	316、2304	2205	HRB400
临界氯离子浓度(mol/L)	1.5~2.0	3.5~4.0	6.0~7.0	0.02~0.03

7.2.45 外加电流阴极保护是对钢筋提供保护电流,降低钢筋腐蚀电位,从而避免钢筋锈蚀。理论上,只要钢筋保护电流密度能够达到设计要求,钢筋就不会锈蚀。但是实际操作层面,新建港口工程混凝土结构从氯离子开始侵入到钢筋发生锈蚀所经历的时间很长,外加电流阴极保护系统本身的寿命反而成为制约该种措施提升结构使用年限的瓶颈,考虑长期使用服役中的损耗,将外加电流阴极保护的保护工作年限的 50%~70% 作为结构使用年限的延长时间。

7.3 钢 结 构

7.3.8 本条考虑了阴极保护参与钢结构使用年限的计算,阴极保护措施包括牺牲阳极和外加电流阴极保护。