



海港混凝土结构耐久性设计 国内外对比及工程应用

吕亭豫，李荣庆，王鹏飞

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：钢筋混凝土结构耐久性影响结构的安全性和使用性，国内外相关设计规范都对混凝土结构耐久性做出了明确规定。为分析各国规范在混凝土耐久性设计方面的异同，选取中国、英国和美国标准，对环境暴露等级、混凝土材料和构造等耐久性设计内容进行对比分析。结合工程实例给出了按各国规范的耐久性设计内容。分析表明：各国规范都将环境划分为若干类别，根据不同的环境类别采取不同的耐久性设计，主要包括混凝土材料、混凝土保护层厚度、限裂措施等方面。

关键词：耐久性；暴露等级；使用年限

中图分类号：TU 375；U 656

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)10-0161-07

Comparison of durability design of concrete between domestic and foreign specifications and its application

LYU Ting-yu, LI Rong-qing, WANG Peng-fei

(CCCC Water Transportation Consultants Co. Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The durability of reinforced concrete structures affects the safety and usability of the structure and hence design codes at home and abroad have made clear regulations on the durability of concrete structures. In order to analyze the similarities and differences in the concrete durability design of various countries, Chinese standards, British standards and American standards are studied in this paper to compare and analyze durability design content such as environmental exposure levels, concrete materials and structures. Combined with executed projects, the durability design of various standards is given. The analysis shows that the environment is classified into several categories based on various standards, and different durability designs are adopted based on different environmental categories, including concrete materials, concrete protective layer thickness, crack limiting measures, etc.

Keywords: durability; exposure class; service life

混凝土的耐久性是工程界普遍关注的问题，混凝土结构破坏的原因之一是氯离子引起的钢筋锈蚀^[1]。为分析各国规范在混凝土耐久性设计方面的异同，本文选取国内外常用设计规范，并结合海外工程实例，根据各国规范给出了混凝土耐久性设计内容，并按规范最低要求，采用相同的

耐久性极限状态对设计使用年限进行了分析。

1 各国耐久性设计总体介绍

JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》^[2]适用于我国设计使用年限 50 a 或以上的水运工程混凝土结构和钢结构的耐久性设计，规定了

水运工程结构按 50 a 设计的最低要求, 给出了设计使用年限的校核方法。英国 BS 6349-1-4《海工建筑物: 总则-材料》^[3]中混凝土结构耐久性设计以欧洲规范针对大土木工程的规定为基础, 针对海工建筑物分别对 30、50、100 a 设计使用年限给出相应耐久性设计要求。美国 ACI318-19《混凝土结构建筑规范要求》^[4], 适用于大土木工程, 针对海洋环境也做了相应规定; 美国规范 UFGS-03 31 29: 2019《海洋混凝土使用年限设计》^[5]和 UFGS-03 31 30: 2019《海洋混凝土》^[6]是针对海洋混凝土的常用规范, UFGS-03 31 29: 2019 适用于需要进行使用年限分析的项目, 对于不需进行使用年限分析的项目, 采用 UFGS-03 31 30: 2019, 其规定以 ACI 318 为最低要求, 根据使用年限模拟结果, 也可采用更严格的要求。

2 暴露等级划分

2.1 中国规范

JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》将宏观气候条件分为南方和北方, 其中南方指最冷月月平均气温高于 0 ℃ 的地区。根据水域掩护条件和设计水位(或天文潮位)将海水环境混凝土划分为大气区、浪溅区、水位变动区和水下区。

2.2 英国标准

英国标准 BS 6349-1-4 中将影响氯离子侵蚀的宏观气候条件总结为严寒、温和、高温潮湿和高温干燥 4 类; 将海水氯化物引起的腐蚀按照微观环境划分为 4 个等级, 不同等级的描述和具体划分见表 1。

表 1 暴露等级划分

暴露等级	描述	具体划分	
		海侧	陆侧
XS1	暴露于含盐空气中, 但并不与海水直接接触	直接接触潮湿处以上部位, 包括上部结构和临岸建筑	无
XS3	水下区	直接接触潮湿处至 MHWS 以下 1/4 潮差处	无
XS2/3	经常潮湿区(如中潮区、低潮区、回填区域)	MHWS 以下 1/4 潮差处至 MLWS	地下水位至码头顶高程
XS2	不经常潮湿区(如高潮区、浪溅区和水下构件“干”的内表面)	MLWS 以下区域	地下水位以下

注: MHWS 为大潮平均高水位 mean high water spring; MLWS 为大潮平均低水位 mean low water spring。

2.3 美国标准

美国 ACI318-19 将混凝土所处环境分为冻融环境(F)、硫酸盐环境(S)、与水接触(W)、钢筋腐蚀环境(C)4类, 海洋环境中氯离子的侵蚀可归

为钢筋腐蚀环境 C2 类。UFGS-03 31 29: 2019 将暴露区域分为水下区、水位变动区、浪溅区和大气区, 见表 2。

表 2 美国规范 UFGS-03 31 29: 2019 暴露区域划分

暴露区域	具体规定
大气区	浪溅区以上部位
浪溅区	水位变动区以上, 对于有掩护的区域, 为水位变动区以上 2 m 的部位; 对于无掩护区域, 为水位变动区以上 6 m 部位
水位变动区	在 MHHW 和 MLLW 之间的区域。在潮差较小地区, 为 MSL 和 MHW 之间的区域
水下区	MLLW 以下的区域。在潮差较小地区, 为 MSL 以下区域

注: MHHW 为平均高水位 mean higher high water; MLLW 为平均低水位 mean lower low water; MSL 为平均海平面 mean sea level; MHW 为平均高潮位 mean high water。

3 混凝土材料

混凝土材料是使混凝土结构具有良好耐久性的前提条件, 主要包括最低混凝土强度等级、最

大水灰(胶)比、最小胶凝材料用量等, 材料选择和控制是提高混凝土耐久性的基本要求。以下以设计使用年限为 50 a 的钢筋混凝土为例, 对比分

析混凝土材料方面的耐久性要求。

3.1 中国标准

JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标

准》根据混凝土所在部位, 针对高性能混凝土分别做出了耐久性要求, 为便于工程案例比较, 摘取高性能混凝土的主要内容, 见表 3。

表 3 海水环境下按耐久性要求的高性能混凝土材料要求及构造要求

暴露区域	最低强度等级	水胶比最大允许值	最低胶凝材料用量/(kg·m ⁻³)		保护层厚度/mm		裂缝宽度/mm
			北方	南方	北方	南方	
大气区	C40	0.40	380	380	50	50	0.2
浪溅区	C45	0.35	400	400	60	65	0.2
水位变动区	C40	0.40	400	380	50	50	0.2
水下区	C40	0.40	380	380	40	40	0.3

3.2 英国标准

英国标准 BS 6349-1-4: 2013《海工建筑物》针对设计年限为 30、50、100 a 的建筑物, 在骨料最大粒径不超过 20 mm 情况下, 给出了混凝土成分、最小抗压强度等级、最大水灰比、水泥或胶凝材料最小含量及混凝土保护层厚度等要求。限于篇幅, 以下仅给出骨料最大粒径不超过 20 mm、

XS2/3 和 XS3 等级下设计使用年限为 50 a、常用混凝土保护层厚度对应的混凝土耐久性要求, 见表 4。耐久性要求中, 将混凝土保护层厚度、水胶比、混凝土强度等级、混凝土保护层厚度之间建立了相互关系, 并与混凝土胶凝材料类别和掺量建立了联系。

表 4 混凝土材料特性限值

暴露等级	名义混凝土保护层厚度/mm	抗压强度等级	最大水灰比	水泥或胶凝材料		允许的水泥和胶凝材料名称及限值
				最小含量(kg·m ⁻³)		
	50+Δc	C32/40	0.45	360		
	55+Δc	C28/35	0.50	340		
	60+Δc	C25/30	0.55	340		IIIA (ggbs 46% ~ 65%)
	65+Δc	C20/25	0.55	340		IIIB
	70+Δc	C20/25	0.55	340		IIB-V+SR (fly ash 25% ~ 35%)
	75+Δc	C20/25	0.55	340		
	80+Δc	C20/25	0.55	340		
	50+Δc	C35/45	0.40	360		
	55+Δc	C32/40	0.45	360		
	60+Δc	C28/35	0.50	360		
XS2/3	65+Δc	C25/30	0.55	340		IIIA (ggbs 36% ~ 45%)
	70+Δc	C25/30	0.55	340		IIB-V fly ash 21% ~ 24%
	75+Δc	C20/25	0.55	340		
	80+Δc	C20/25	0.55	340		
	50+Δc	-	-	-		
	55+Δc	-	-	-		
	60+Δc	-	-	-		
	65+Δc	-	-	-		CEM I
	70+Δc	C40/50	0.35	360		CEM II/A-L(LL), II/A, II/B-S
	75+Δc	C35/45	0.40	360		
	80+Δc	C35/45	0.40	360		

续表4

暴露等级	名义混凝土保护层厚度/mm	抗压强度等级	最大水灰比	水泥或胶凝材料最小含量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	允许的水泥和胶凝材料名称及限值
XS3	50+ Δc	C35/45	0.45	360	
	55+ Δc	C32/40	0.50	360	
	60+ Δc	C28/35	0.55	340	IIIA (ggbs 46%~65%)
	65+ Δc	C25/30	0.55	340	IIIB ggbs >66%
	70+ Δc	C20/25	0.55	340	IIIB-V+SR (fly ash 25%~35%)
	75+ Δc	C20/25	0.55	340	
	80+ Δc	C20/25	0.55	340	
	50+ Δc	C40/50	0.35	380	
	55+ Δc	C35/45	0.40	360	
	60+ Δc	C32/40	0.45	360	
	65+ Δc	C28/35	0.50	360	IIIA (ggbs 36%~45%)
	70+ Δc	C25/30	0.55	340	IIIB-V fly ash 21%~24%
	75+ Δc	C25/30	0.55	340	
	80+ Δc	C20/25	0.55	340	
注: Δc 为容许偏差; ggbs 为粒状高炉矿渣; fly ash 为粉煤灰。					

3.3 美国标准

ACI 318-19 中对海洋环境 C2 类要求最大水胶比为 0.4, 最小强度为 5 000 psi(34.48 MPa)。

美国 UFGS-03 31 30: 2019 规定的混凝土配合比要求见表 5, 浪溅区、水位变动区和水下区的规定与 ACI 318-19 保持一致。

表 5 美国规范中最大水胶比的要求

区域	暴露条件	最大水胶比
水下区、水位变动区、浪溅区	直接暴露于盐水受到严重磨损	0.40
大气区	直接暴露于海洋大气	0.40
	受避免直接暴露于海洋大气的保护	0.45
泥下区	永久埋入土中	0.40

4 混凝土保护层厚度

混凝土保护层对钢筋的防腐蚀极为重要。各国从耐久性的角度出发, 对混凝土保护层厚度做

出规定。中国规范规定见表 6。英国标准《海工建筑物》中规定混凝土保护层最小厚度见表 4。名义保护层厚度应为最小保护层厚度加上容许偏差。容许偏差根据预制及施工条件有所差异, 变化范围的绝对值为 5(或更小)~15 mm。美标 ACI 318-19 对于氯离子环境下的梁板构件混凝土保护层厚度 1.5~2.5 in(38.1~63.5 mm), 对深基础构件的混凝土保护层厚度规定见表 7。

表 6 海水环境受力钢筋的混凝土保护层最小厚度

地区	最小厚度/mm			
	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
北方	50	60	50	40
南方	50	65	50	40

注: 箍筋直径大于 6 mm 时混凝土保护层厚度应按表中规定增加 5 mm; 位于水位变动区、浪溅区的现浇混凝土构件, 按表中规定增加 10~15 mm, 位于浪溅区的细薄构件的混凝土保护层厚度可取 50 mm。

表 7 美国 ACI 318 规定的深基础构件的混凝土保护层厚度

暴露情况	构件	钢筋	保护层厚度/in(mm)
地下浇注并与土永久接触的混凝土, 未采用钢管等外保护措施时	现浇	所有	3.0(76.2)
暴露于海水	预制预应力	所有	2.5(63.5)
	预制非预应力	所有	2.0(50.8)

在实际应用中应注意, 中国规范保护层厚度为主筋表面与混凝土表面的最小距离; 英、美标准为任意钢筋最外层表面到混凝土表面的最小距离。同时, 英国规范明确规定实际采取的混凝土保护层厚度为最小保护层厚度加施工容许偏差; 美国规范给出的混凝土保护层厚度值已考虑施工容许偏差, 进行使用年限分析时, 应采用减去施工允许偏差后的混凝土保护层厚度; 中国规范未考虑施工容许偏差。

5 裂缝宽度

中国规范规定的最大裂缝宽度限值见表 8。英国国家附录 NA to BS 1992-1-1: 2004+A1: 2014 给出荷载组合为准永久组合的钢筋混凝土构件和无黏结预应力构件裂缝宽度限值为: 暴露等级为 XS1、XS2、XS3 时, 氯盐环境下最大裂缝宽度限值为 0.3 mm。ACI 318-19 中, 通过控制靠近受拉面的钢筋间距来控制裂缝。中国和英国规范计算裂缝宽度方式不同: 中、英规范均采用准永久组合, 但中国规范可变作用准永久系数为 0.6, 英国标准根据不同荷载类型给出了不同系数。

表 9 工程潮位

潮位	英文名	简写	高程/m	结构高程/m
最高天文潮	highest astronomical tide	HAT	2.20	
大潮平均高水位	mean high water spring	MHWS	1.90	帽梁 3.5~0.0
平均海平面	mean water level	MSL	1.10	
大潮平均低水位	mean low water spring	MLWS	0.40	
最低天文潮	lowest astronomical tide	LAT	-0.10	地连墙 0.0~-29.0

注: MHWS 作为设计高水位, MLWS 作为设计低水位。

6.2 暴露等级划分

根据各国规范对环境类别的规定, 本工程相应环境类别划分见图 3。

表 8 中国规范中规定的最大裂缝宽度限值

构件部位	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
裂缝宽度/mm	0.20	0.20	0.20	0.30

6 工程实例

6.1 项目概况

某工程码头结构采用单锚地下连续墙结构, 设计使用年限为 50 a。工程所处环境月温度见图 1, 相对湿度变化见图 2, 潮位信息见表 9。

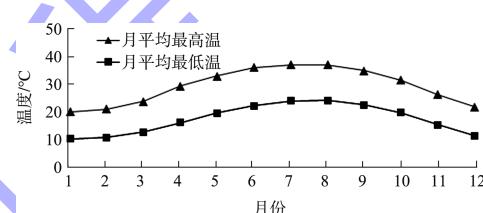


图 1 月温度变化

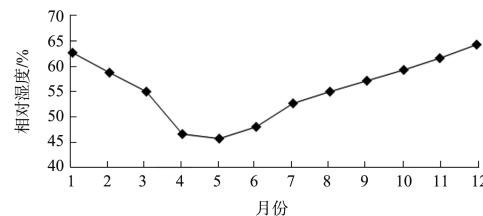


图 2 月相对湿度变化

主要针对工程帽梁和地下连续墙结构进行分析。根据各国规范对暴露区域的划分, 各构件按照最不利的暴露等级见表 10。

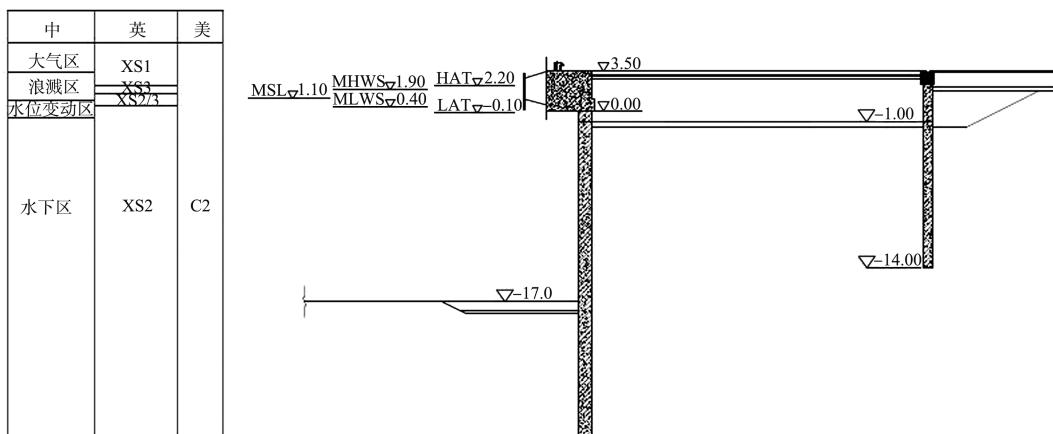


图 3 结构暴露区域划分 (单位: m)

表 10 主要设计构件暴露区域

构件	中国规范	英国规范	美国规范
帽梁	浪溅区	XS3	
地连墙	水位变动区	XS2/3	C2

6.3 耐久性设计最低要求

对分析各国耐久性区别,采取的耐久性措施为各国规范中的最低要求,耐久性设计结果见表 11。

表 11 耐久性参数

构件	规范	区域划分	混凝土等级	水胶比	最低胶凝材料用量/(kg·m⁻³)	规范中的保护层厚度/mm	箍筋直径/mm	计算采用保护层厚度/mm
帽梁	中国	浪溅区	C45	0.35	400	80.0	16	80.0
	英国	XS3	C25/30	0.55	340	70.0	16	86.0
	美国	C2	5 000 psi	0.40	400	76.2	16	79.2
地连墙	中国	水位变动区	C40	0.40	380	65.0	16	65.0
	英国	XS2/3	C25/30	0.55	340	70.0	16	86.0
	美国	C2	5 000 psi	0.40	400	76.2	16	79.2

6.4 耐久性计算分析

6.4.1 耐久性极限状态

结构耐久性极限状态定义尚未达成统一认识,除中国规范外,英国和美国规范都没有给出计算公式。文献[7]对已有耐久性极限状态进行了分析,本工程采用混凝土保护层开裂作为耐久性极限状态,即计算使用年限包括钢筋脱钝、钢筋锈蚀至混凝土保护层开裂的时间之和。

6.4.2 计算公式及参数

钢筋脱钝时间以 Fick 第二定律为基础,距混凝土表面 x 处的氯离子浓度 $C(x, t)$ 可按下式计算:

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{tD}} \right) \right] \quad (1)$$

式中: C_s 为表面氯离子浓度; $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数; D 为氯离子扩散系数; t 为时间。

假定钢筋为均匀锈蚀,钢筋开始锈蚀至保护层开裂的时间 t_c 按下式计算:

$$t_c = \frac{\delta_{cr}}{\lambda_1} \quad (2)$$

式中: δ_{cr} 为保护层开裂时钢筋临界锈蚀深度 (mm); λ_1 为保护层开裂前钢筋平均锈蚀速度 (mm/a)。主要计算参数取值见表 12。

表 12 主要计算参数取值

构件	混凝土临界氯离子浓度/%			混凝土表面氯离子浓度/%			混凝土氯离子扩散系数的衰减系数	混凝土保护层开裂前腐蚀电流密度/($\mu A \cdot cm^{-2}$)
	中国规范	英国规范	美国规范	中国规范	英国规范	美国规范		
帽梁	0.4	0.35	0.4	5.4	4.5	5.4	0.5	0.50
地下连续墙	0.5	0.50	0.5	5.4	4.5	5.4	0.5	0.25

6.4.3 使用年限计算结果与分析

根据以上公式和参数, 按各国规范计算得到的使用年限见表 13。

表 13 使用年限计算结果

构件	所处环境	使用年限/a		
		中国规范	英国规范	美国规范
帽梁	浪溅区	58.9	30.7	46.8
地连墙	水位变动区	52.8	48.5	67.6

根据表 13 结果可以看出:

1)按中国规范计算时, 位于浪溅区的帽梁年限大于水位变动区的地连墙, 原因是虽然浪溅区环境比水位变动区恶劣, 但中国规范针对浪溅区采取了更加严格的耐久性措施。

2)按英国规范计算时, 帽梁年限比地连墙年限低, 原因是 XS2/3 与更加严酷的 XS3 环境下规范规定的耐久性措施相差并不明显; 按美国规范计算的地连墙年限较帽梁年限高也是同样原因。

3)相同环境条件下, 对于浪溅区, 中国规范规定最为严格, 其次分别是美国规范和英国规范; 对于水位变动区, 美国规范最为严格, 其次分别是中国规范和英国规范。

4)在处于相同环境条件下, 各国规定的结构耐久性措施的相对严格程度因耐久性设计具有明显的地区特征, 根据各国实践确定各种暴露等级, 依据结构耐久性破坏特点提出相应的耐久性规定。各国规范在制定过程中都以各自国家的工程经验为基础, 在具体应用时, 应结合工程所处环境条件和特点综合确定耐久性措施。

7 结论

1)各国规范都将环境划分为若干类别, 海水环境划分主要依据为设计水位或天文潮位, 中国规范还考虑了温度和掩护条件。

2)各国都将对混凝土材料的规定作为提高耐久性的基本要求, 包括混凝土最低强度等级、最大水灰(胶)比等。与中、美规范不同, 英国规范

中材料参数相互制约。

3)各国规范保护层定义不同。中国标准保护层范围可含箍筋、拉筋等非主筋, 英美标准保护层范围内不应有任何钢筋; 同时, 英美标准保护层定义中引入了施工容许偏差的概念。

4)中国和英国规范规定了裂缝宽度限值, 但作用准永久组合系数有所差异; 美国规范通过钢筋间距控制裂缝宽度。

5)对工程实例的使用年限计算分析表明, 相同环境下, 采用各国规范耐久性最低要求计算的使用年限存在一定区别。因耐久性设计规范具有地区特征, 在应用时应结合工程所处环境条件和特点综合考虑确定耐久性措施。

参考文献:

- [1] 杨国平, 贡金鑫, 吴锋. 港口混凝土结构性能退化与耐久性设计[M].北京: 中国科学技术出版社, 2015: 1-10.
- [2] 中交四航工程研究院有限公司, 中交水运规划设计院有限公司. 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, 2015.
- [3] The British Standards Institution. Maritime works-Part 1-4: General-code of practice for materials: BS6439-1-4: 2013 [S]. London: BSI Standards Limited, 2013.
- [4] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete: ACI 318-19[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.
- [5] Department of Defense, U.S.A. Unified Facilities Guide Specifications: Marine Concrete with Service Life Modelling: UFGS-03 31 29: 2019[S]. Washington: Department of Defense, U.S.A., 2019.
- [6] Department of Defense, U.S.A. Unified Facilities Guide Specifications: Marine concrete: UFGS-03 31 30: 2019[S]. Washington: Department of Defense, U.S.A., 2019.
- [7] 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)