



基于中美欧规范的海水环境下 混凝土耐久性设计对比

朱亚州, 曹凯平

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 混凝土耐久性直接影响结构的安全和使用。为分析国外主流规范与中国规范在混凝土耐久性设计方面的异同, 从设计使用年限、混凝土腐蚀部位划分、耐久性措施 3 个方面, 对中美欧规范的海水环境下混凝土耐久性规定进行对比分析。结果表明, 中美欧规范对码头类海工永久性结构的设计使用年限都可采用 50 a, 并对混凝土腐蚀部位都有竖向划分为 4 个不同区域的规定, 而在不同腐蚀分区采用的耐久性措施方面有差异, 主要表现在水泥种类、混凝土强度、混凝土水胶比和裂缝宽度等方面。

关键词: 中美欧规范; 混凝土; 耐久性

中图分类号: U 654

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0039-06

Comparison of concrete durability design in seawater environment based on codes from China, the U.S., and Europe

ZHU Ya-zhou, CAO Kai-ping

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Concrete durability directly affects the safety and use of structures. Therefore, we comparatively analyze the provisions on concrete durability in seawater environment in codes from China, the U.S., and Europe with regard to the design service life, division of corroded parts of concrete, and durability measures. In this way, we can explore the similarities and differences between foreign mainstream codes and Chinese codes in concrete durability design. The results reveal that the design service life of permanent marine structures such as wharves can be 50 years in all the codes. In addition, the corroded parts of concrete are vertically divided into four different zones in these codes, but there are differences in the durability measures adopted in different corrosion zones, which are mainly manifested in the aspects of cement types, concrete strength, water-binder ratios of concrete, and crack width.

Keywords: codes from China, the U.S., and Europe; concrete; durability

随着“一带一路”倡议不断推进, 国内企业纷纷布局海外。因受欧美规范的影响较大且对中国规范的不熟悉, 海外项目往往要求码头设计采用欧美规范。因此, 加强中国规范与欧美规范的比较, 从而发现它们的异同, 有利于中国规范的推广与应用, 这也是推广中国标准走出去实现交通强国战略的需求。耐久性设计, 尤其混凝土耐

久性是码头设计必不可少的一部分, 需要设计人员详细了解欧美规范中的相关内容, 目前国内已有不少对各国混凝土耐久性要求的研究, 如余波等^[1]比较多个国家的混凝土结构耐久性规范在环境作用等级与耐久性设计参数的异同点, 认为国内外规范对混凝土结构耐久性规定主要基于工程经验和定性分析, 缺少耐久性的定量分析与设计;

收稿日期: 2021-11-08

作者简介: 朱亚州(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道工程设计。

董圆梦^[2]、吕亭豫等^[3]对中美欧规范在混凝土材料、保护层厚度、裂缝宽度等方面进行对比,指出各国规范的一些差异。本文从设计使用年限、混凝土腐蚀部位划分、耐久性措施 3 个方面对中美欧规范的相关规定进行对比分析,并系统对比中美欧规范关于混凝土腐蚀部位划分、水泥种类、混凝土强度、混凝土最大水胶比、混凝土最小保护层和最大裂缝宽度方面的异同点,为港口工程设计提供参考。

1 设计使用年限

耐久性设计与设计使用年限直接相关,设计使用年限的长短直接决定所采取的耐久性措施,因此有必要了解各规范对设计使用年限的规定。

1) 中国的《码头结构设计规范》^[4]规定,永久性码头结构的设计使用年限应采用 50 a。

2) 欧洲规范 Eurocode^[5]规定,房屋建筑和其他普通结构的使用年限为 50 a; BS 6349-1-1:2013^[6]规定,对于海洋结构(如码头)的设计使用年限一般不低于 50 a。

3) 美国 ACI 规范没有明确规定结构的设计使用年限,但其荷载取值与耐久性措施都与设计使用年限相关^[7]。

可以看出,中欧规范对码头设计使用年限的规定基本一致,美国规范虽然明确规定海水环境下结构的设计使用年限,但根据其所要求的各种耐久性措施,关于海水环境下结构使用年限的要求与中国规范大致相当。

2 海水环境混凝土腐蚀部位划分

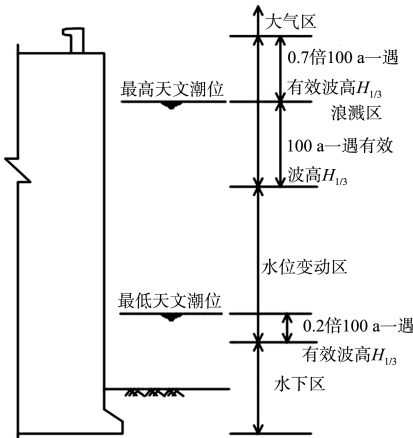
海水环境下混凝土不同部位的腐蚀严重程度不同,对应采取的耐久性措施也不一样,中美欧规范均对混凝土腐蚀部位进行了划分。

1) 中国的《水运工程结构耐久性设计标准》^[8]和《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》^[9]将这些工程的混凝土环境类别划分为海水环境,腐蚀特征为氯盐作用下引起混凝土中的钢筋锈蚀。混凝土腐蚀部位划分则按设计水位或天文潮位分为大气区、浪溅区、水位变动区和水下区,各分区

之间依据设计水位或天文潮位加减一定的数值进行界定,有相对明显的分界。在具体耐久性设计过程中还根据建筑物所处地区的最冷月平均气温是否高于 0°分为南方和北方地区。腐蚀部位划分见图 1a),为便于与欧美规范比较,图中腐蚀部位按天文潮位划分。

2) 欧洲规范 Eurocode 2^[10]将海水环境混凝土腐蚀部位划分为 3 个区域,即:XS1 大气区, XS2 水下区, XS3 浪溅区。BS 6349-1-4:2013^[11]将混凝土氯盐腐蚀部位划分为 4 个区域:XS1 大气区、XS2 水下区、XS2/3 水位变动区、XS3 浪溅区。按气候环境,即结构所处地区不同,又分为冰冷地区、温带地区、湿热地区、干热地区 4 个区域。BS 6349-1:2000^[12]还将 4 个区域的混凝土部位的腐蚀程度进行分级,对于 XS2 水下区、X2/3 水位变动区域来说,气候环境的不同腐蚀严重程度分级相差不大,但对于 XS3 浪溅区,气候环境的不同导致腐蚀严重程度相差较大,干热地区腐蚀最为严重(水分蒸发快),湿热地区次之,冰冷和温带区域腐蚀程度最低。腐蚀部位具体划分见图 1b)。

3) 美国规范 ACI 318^[13]规定,海水环境混凝土的腐蚀属于硫酸盐腐蚀类别的 S1 等级,属于氯离子腐蚀类别中的 C2 等级。ACI 357^[14]也将海洋结构按腐蚀部位划分为 4 个区域,即大气区、浪溅区、水位变动区和水下区。腐蚀部位具体划分见图 1c)。



a) 中国规范

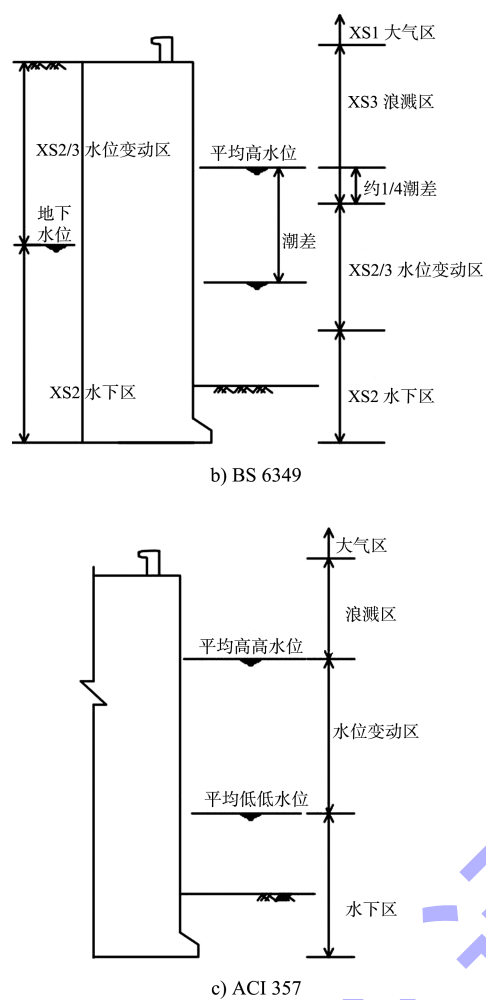


图 1 中美欧规范海洋环境混凝土腐蚀部位划分

总体上，中美欧规范对混凝土腐蚀部位的划分大体一致，均划分为 4 个区域，但又稍有不同，如欧洲规范还将码头后方回填区域根据地下水位高程划分为水位变动区和水下区，中国规范则没有区分后方回填区和海侧混凝土区域。相比而言，此部分区域中国规范的防腐蚀划分更为严格。美欧规范对各分区的界限划分不同，欧洲规范的浪溅区范围比美国规范更广，而美国规范的水位变动区范围比欧洲规范更广。中欧规范都是根据建筑所处的位置按大环境分区，美国规范则没有提及这一点。

3 耐久性措施

3.1 水泥种类

水泥是混凝土的核心材料，水泥品种众多，海水环境对水泥种类选择有特殊要求，从以往国

外码头项目经验来看，合同对水泥品种的技术要求与水泥本身对海水的适应性有一定的差距，而国外咨询工程师对合同的审查往往比较严格，因此有必要详细了解欧美规范对海水环境下水泥种类的规定，以便在设计上掌握主动权。

《水运工程结构耐久性设计标准》宜选用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥，其中 C_3A 含量控制在 6%~12%。也可采用复合型水泥，如矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥等。

BS 6349-1-4:2013 规定如采用波特兰 I 型水泥 (CEM I)， C_3A 含量不低于 5%，上限 10%。也可采用复合型水泥，如矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥等。

美国规范 ACI 318 推荐海水环境下采用波特兰 II 型水泥或复合型水泥 (矿渣水泥、火山灰水泥、粉煤灰水泥等)。另也明确海水环境下混凝土水灰比不超过 0.4， C_3A 含量少于 10% 的波特兰水泥也可以使用。ACI 357 则表明 C_3A 含量高有利于抗氯离子腐蚀， C_3A 含量低有利于抗硫酸盐腐蚀，海洋结构推荐采用 C_3A 含量在 5%~8% 的水泥，相比于氯离子腐蚀，硫酸盐腐蚀并不是海洋结构腐蚀的主要原因，因此不推荐采用 C_3A 含量低的 Type V 型水泥。Type I~III 型水泥外加矿渣、粉煤灰或硅灰掺合料足够抵抗海水中的硫酸盐腐蚀，另掺入粉煤灰、硅灰的水泥还有利于减轻碱-集料反应发生的风险。

可以看出，中美欧规范均强调使用普通水泥时应对 C_3A 的含量进行控制，由于 C_3A 可以与渗入混凝土中的氯离子结合，有利于延长钢筋周围水泥石孔隙氯离子浓度达到临时浓度的时间，降低氯离子的渗透性，因此适当提高 C_3A 含量有利于混凝土防腐蚀。中国规范要求的 C_3A 最高含量可达 12%，欧美规范则要求控制在 10% 以内，美国规范还明确海水环境下不能采用 C_3A 含量低的 Type V 型水泥。另水泥中加入掺合料能有效降低水泥水化反应的最高温度和内外表面温差，防止产生温度裂缝，同时由于加入掺合料的水泥致密性高，大幅降低了氯离子的渗透能力，因此中美

欧规范均推荐海水环境采用加入掺合料甚至大量掺合料的水泥(如我国的高性能混凝土),但是加入掺合料的水泥的抗冻性、耐磨性、防碳化腐蚀方面均比不添加掺合料的水泥要差,所以在一些环境时须控制使用。

3.2 混凝土强度等级

混凝土强度等级高,混凝土较密实,抵抗氯离子等侵蚀及抗钢筋腐蚀产物膨胀引起混凝土开裂的能力越强,因此中美欧规范都规定了耐久性要求的混凝土最低强度等级,见表 1。

表 1 中美欧规范最低混凝土强度等级对比

规范	混凝土类型	最低混凝土强度等级			
		大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
《水运工程结构耐久性设计标准》	普通钢筋混凝土	C30	C40	C35	C30
	海工高性能混凝土	C40	C45	C40	C40
Eurocode 2	—	C37	C45	—	C45
BS 6349-1:2000	—	C30~C45	C30~C50	C30~C37	C30~C37
BS 6349-1-4:2013	—	与水泥品种、保护层厚度相关,水泥、保护层厚度不同时最低强度等级要求相差较大,为 C25~C50			
ACI 318	—	不低于 35 MPa(圆柱体强度),大致相当于我国的 C40			

可以看出, Eurocode 2 和 ACI 318 最低混凝土强度等级略高于《水运工程结构耐久性设计标准》的普通钢筋混凝土,与《水运工程结构耐久性设计标准》的海工高性能混凝土要求较为接近,而 Eurocode 2 中混凝土强度等级是一个建议值,不是强制性要求。BS 6349-1-4:2013 强调采用系统性的设计方法,最低混凝土强度等级要求与所选用的水泥品种、保护层厚度相关,高炉矿渣、粉煤灰

等掺合料多的水泥,其混凝土强度等级要求低,混凝土保护层越厚,其强度等级要求越低。

3.3 混凝土水胶比

混凝土水胶比是影响混凝土密实性的主要因素,直接影响抗氯离子渗透性、抗冻性和防止钢筋腐蚀的性能,中美欧规范混凝土最大水胶比对比见表 2。

表 2 中美欧规范混凝土最大水胶比对比

规范	混凝土类型	最大水胶比			
		大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
《水运工程结构耐久性设计标准》	南方地区,普通钢筋混凝土	0.50	0.40	0.50	0.45~0.55
	海工高性能混凝土	0.40	0.35	0.40	0.40
BS 6349-1:2000	—	0.45~0.55	0.40~0.50	0.50	0.55
BS 6349-1-4:2013	—	与水泥品种、保护层厚度相关,取值范围 0.35~0.55			
ACI 318、ACI 357	—	0.40			

可以看出, BS 6349-1-4:2013 强调系统性设计,但取值范围与中国规范大致相当, ACI 318、ACI 357 最大水灰比允许值各分区统一按 0.40 考虑,与《水运工程结构耐久性设计标准》的海工高性能混凝土要求大致相当,但中国规范在浪溅区要求更为严格。

3.4 混凝土保护层

保持混凝土有足够的保护层厚度可推迟氯离子到达钢筋表面的时间,中美欧规范关于最小混凝土保护层厚度要求对比见表 3。其中: 1) 中国规范要

求箍筋直径大于 6 mm 时,保持层应增加 5 mm,另水位变动区、浪溅区的现浇混凝土构件,保护层应增加 10~15 mm; 2) Eurocode 2 的保护层还应考虑因施工等影响的偏差量,推荐值为 10 mm,预制构件可取 0~5 mm; 3) 中国规范细薄构件混凝土保护层厚度可取 50 mm,欧美规范对面板等薄壁构件保护层厚度也有降低考虑的规定; 4) ACI 201 指出严重的海洋环境腐蚀环境下最小保护层应采用 75 mm; 5) 中国规范和 ACI 357 保护层均指的是主筋的保护层,欧洲规范则指的是钢筋的净保护层。

表 3 中美欧规范最小混凝土保护层厚度对比

规范	最小保护层厚度/mm			
	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
《水运工程结构耐久性设计标准》(南方地区)	50	65	50	40
Eurocode 2	35	45	—	40
BS 6349-1:2000	40	40~60	50	40
BS 6349-1-4:2013	与水泥品种、混凝土强度、水胶比、最低胶凝材料用量有关			
ACI 357、ACI 201 ^[15]	50	65(75)	65	50

可以看出，中美欧规范对最小混凝土保护层厚度的要求相差不大，总体上均要求浪溅区保护层厚度大于其他区域，现浇构件保护层厚度大于预制构件保护层，而 BS 6349-1-4:2013 强调系统性耐久性设计，最小保护层厚度要求相差较大。

3.5 混凝土裂缝控制

裂缝控制对混凝土防腐蚀的效果还存在争议，一种观点认为：裂缝的存在加速了氯离子、水分

和氧气到达钢筋的时间，从而加速腐蚀；另一种观点则认为：从长远来看，开裂和未开裂的混凝土最终腐蚀程度相差并不大，应更关注混凝土的保护层和混凝土的质量。尽管如此，各规范还是倾向于控制混凝土的最大裂缝宽度以尽量减少对耐久性的危害。中美欧规范混凝土最大裂缝宽度允许值见表 4。

表 4 中美欧规范最大裂缝宽度对比

规范	最大裂缝宽度/mm			
	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
《水运工程结构耐久性设计标准》	0.20	0.20	0.20	0.30
Eurocode 2		0.30		
ACI 224 ^[16]		0.15		

可以看出，海水环境美标混凝土裂缝控制最为严格，各分区统一按 0.15mm 控制，而欧洲规范各分区统一按 0.30 mm 控制，中国规范总体比欧洲规范更为严格。

3.6 附加防腐蚀措施

中美欧规范对混凝土附加防腐蚀措施大体一致，主要有涂层保护、钢筋阻锈剂、采用耐腐蚀钢筋、阴极保护等。相比而言，中国的《水运工程结构耐久性设计标准》和《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》对混凝土各分区所适用的腐蚀措施表述更为详细。

4 结语

1)关于码头类水工结构的设计使用年限和混凝土腐蚀部位划分，中美欧规范的规定基本一致。相比而言，中国规范的规定更为详细，设计使用上更为方便。

2)中美欧规范均强调使用普通水泥时应对 C₃

A 的含量进行控制，中国规范要求 C₃A 最高含量可达 12%，欧美规范则要求控制在 10% 以内，美国规范还明确海水环境不能采用 C₃A 含量低的 Type V 型水泥。

3)欧美规范在海水环境下关于混凝土最低强度等级的规定略高于《水运工程结构耐久性设计标准》的普通混凝土要求，与《水运工程结构耐久性设计标准》的海工高性能混凝土要求较为接近。

4)在混凝土最大水胶比方面，中欧规范基本一致，而美国规范要求与《水运工程结构耐久性设计标准》的海工高性能混凝土大体一致，相对而言更为严格。混凝土最小保护层厚度方面，中美欧规范要求相差不大，但混凝土裂缝控制，美国规范最为严格，各分区统一按 0.15 mm 控制。

5)混凝土耐久性是一个十分复杂的问题，本文仅对比了其中的一些方面，对冻融环境、荷载条件、混凝土其他原材料、最低胶凝材料用量、钢筋间距、最小配筋率要求等方面没有涉及，国

外混凝土耐久性设计时应注意欧美规范在这些方面的相关规定，同时也应注意欧美规范对耐久性要求的一些限定条件。

参考文献：

[1] 余波, 喻泽成, 范志宏, 等. 海洋混凝土结构环境作用等级与耐久性设计参数的中外规范对比[J]. 海洋工程, 2021, 39(3): 156-166.

[2] 董圆梦. 国内外混凝土结构耐久性技术规范比较[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.

[3] 吕亭豫, 李荣庆, 王鹏飞. 海港混凝土结构耐久性设计国内外对比及工程应用[J]. 水运工程, 2021(10): 161-167.

[4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTJ 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[5] British Standard Institution. Eurocode-basis of structural design: BS EN 1990: 2002 [S]. London: BSI, 2002.

[6] British Standard Institution. Maritime works-part 1-1: general-code of practice for planning and design for operations: BS 6349-1-1: 2013[S]. London: BSI, 2013.

[7] 贡金鑫, 魏巍巍, 胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

[8] 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: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[9] 广州四航工程技术研究院. 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范: JTJ 275—2000[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[10] British Standard Institution. Eurocode 2: design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings: BS EN 1992-1-1: 2004[S]. London: BSI, 2004.

[11] British Standard Institution. Maritime works-part 1-4: general-code of practice for materials: BS 6349-1-4: 2013[S]. London: BSI, 2013.

[12] British Standard Institution. Maritime structures-part 1: code of practice for general criteria: BS 6349-1: 2000[S]. London: BSI, 2000.

[13] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-14[S]. Farmington Hills: ACI, 2014.

[14] American Concrete Institute. Guide for design and construction of waterfront and coastal concrete marine structures: ACI 357.3R-14[S]. Farmington Hills: ACI, 2014.

[15] American Concrete Institute. Guide to durable concrete: ACI 201.2R-16[S]. Farmington Hills: ACI, 2016.

[16] American Concrete Institute. Control of cracking in concrete structures: ACI 224R-01[S]. Farmington Hills: ACI, 2001.

(本文编辑 王璁)

(上接第 38 页)

[8] CHEN Y, ZHANG Y, GAO M, et al. Numerical simulation of oblique wave in water basin[C]//ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2015: V002T08A013.

[9] 李玉成, 董国海, 孙昭晨, 等. 斜向规则波与直墙相互作用的实验研究[J]. 中国海洋平台, 2001, 16(4): 1-6.

[10] 俞聿修, 胡金鹏, 李本霞, 等. 斜向波作用于直立堤上的单位堤长波浪力[J]. 港工技术, 2003(2): 6-8.

[11] 顾倩, 张宇川. 斜向波浪作用下双层水平板式防波堤消浪性能试验研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(2): 91-107.

[12] LIN P, LIU P L F. Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models[J]. Journal of waterway, port, coastal,

and ocean engineering, 1999, 125(4): 207-215.

[13] 丁阳, 马瑞, 李宁. 三维波流耦合水槽模拟模型[J]. 工程力学, 2015, 32(10): 68-74, 88.

[14] 杨锦凌, 张成刚, 韩炳辰, 等. 直立码头前沿波高模型及数值模拟[J]. 水运工程, 2021(1): 56-59, 65.

[15] 王浩霖, 张华昌, 董胜. 直立堤上任意方向入射波的波压力研究[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 246-256.

[16] 朱萍, 黄晶华, 赵丽君. 水槽造波机的参数确定及结构设计[J]. 现代电力, 2011, 28(4): 44-48.

[17] 张婷. 波浪的三维数值模拟及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2009.

[18] 南京水利科学研究院. 波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

(本文编辑 武亚庆)