

文章编号:1005-9865(2021)03-0156-11

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

余 波^{1, 2, 3}, 喻泽成¹, 范志宏⁴, 杨绿峰^{1, 2, 3}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004; 4. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘 要: 围绕海洋混凝土结构的环境作用等级划分和耐久性设计参数限值, 对国内外现行的混凝土结构耐久性设计规范进行了系统对比分析。首先分析了国内外 14 个国家和地区的 32 部混凝土结构耐久性设计规范的技术特点, 然后对比了不同规范对于海洋氯盐环境条件和环境作用等级划分的依据和差异性, 进而从最低混凝土强度等级、最大水胶比、最小胶凝材料用量、最小保护层厚度、抗氯离子渗透性指标限值、最大初始氯离子含量和最大裂缝宽度等方面, 系统对比分析了不同规范对于海洋混凝土结构耐久性设计参数限值的差异性, 为海洋混凝土结构的耐久性设计提供了参考。

关键词: 海洋环境; 混凝土结构; 环境作用等级; 耐久性设计参数; 规范对比

中图分类号: TU528.1 文献标志码: A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2021.03.017

Comparison of environmental action classes and durability design parameters of marine concrete structures between Chinese and Foreign Codes

YU Bo^{1, 2, 3}, YU Zecheng¹, FAN Zhihong⁴, YANG Lyufeng^{1, 2, 3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Nanning 530004, China; 4. CCCC Fourth Harbor Engineering Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: A comprehensive comparison between Chinese and foreign durability design codes for marine concrete structures was conducted by comparing the classification criteria of environmental action classes and the allowable values of durability design parameters of marine concrete structures. Technical characteristics of 32 durability design codes from 14 different countries and regions were investigated first. Then the classification criteria of marine environmental conditions and environmental action classes for different durability design codes were compared. Moreover, the allowable values of durability design parameters (including the minimum concrete strength class, the maximum water/binder ratio, the minimum binder content, the minimum concrete cover, the chloride ion penetrability requirements, the maximum initial chloride content, and the maximum crack width) for different durability design codes were investigated systematically. Analysis results provide reference for durability design of marine concrete structures.

Keywords: marine environment; concrete structure; environmental action classes; durability design parameters; comparison of codes

收稿日期: 2020-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668008, 51738004); 广西杰出青年科学基金项目(2019GXNSFFA245004); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA281344)

作者简介: 余 波(1982-), 男, 四川泸州人, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn

通信作者: 杨绿峰(1966-), 男, 河南鲁山人, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: lfyang@gxu.edu.cn

受腐蚀性海洋氯盐环境作用的侵蚀,海港工程、跨海大桥等海洋混凝土结构时常提前发生钢筋锈蚀、混凝土开裂、承载力退化等耐久性劣化问题。如何保证海洋混凝土结构满足预定的设计使用年限和耐久性要求,成为土木工程领域普遍关注的工程技术难题。

欧洲、日本和美国等发达国家和地区较早开展混凝土结构耐久性研究,并先后发布了一系列混凝土结构耐久性设计标准、规范和指南。早在1989年,欧洲混凝土结构委员会(CEB)就发布《耐久混凝土结构设计指南》^[1],随后欧洲标准学会(CEN)制定了EN 1992-1-1:2004标准^[2],系统阐述了混凝土结构耐久性的基本原则和技术要求。此后,欧洲南部(葡萄牙)、中部(荷兰、英国和德国)和北部(丹麦和挪威)等多个国家结合各地实际情况发布了修订标准^[3-17];1990年日本土木工程学会(JSCE)发布了《混凝土结构耐久性设计建议》^[18],并在2007年发布的《日本混凝土指南》^[19]中明确提出了耐久性设计内容;1992年美国混凝土学会(ACI)发布《混凝土耐久性指南》^[20]用于指导耐久性设计,此后将耐久性设计融入ACI 318-19标准^[21]。随着耐久性研究的深入,许多国家都将耐久性设计作为混凝土结构设计的重要组成部分,包括2000年印度发布的IS 456:2000标准^[22]、2014年南非标准部门发布的SANS 10100-2:2014标准^[23]、2018年澳大利亚标准协会发布的AS 3600:2018标准^[24]、2019年加拿大标准协会(CSA)发布的CSA A23.3-19标准^[25]等。我国混凝土结构的耐久性研究相对较晚。在充分吸收国内外研究经验的基础上,2000年我国交通部颁布了《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》^[26],2004年土木工程学会牵头发布了《混凝土结构耐久性设计与施工指南》^[27],对混凝土结构耐久性设计与施工的基本原则和方法作了技术规定。随后,2008年住建部颁布了国家推荐标准《混凝土结构耐久性设计规范》^[28],并在2019年发布了修订版本^[29]。期间,国内还发布了多部行业标准,包括铁道部2010年颁布的《铁路混凝土结构耐久性设计规范》^[30]、交通运输部2012年颁布的《海港工程高性能混凝土质量控制标准》^[31]、2015年颁布的《水运工程结构耐久性设计标准》^[32]和2019年颁布的《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》^[33]等。

通过分析发现,目前国内外现行的耐久性设计标准、规范和指南主要基于工程经验和定性分析,根据环境腐蚀机理特征,对混凝土环境条件进行分类分级描述,并对混凝土的保护层厚度、水灰比、胶凝材料用量和强度等级等耐久性设计参数做出技术规定,预期从材料技术指标、构造规定、施工要求等方面来保证混凝土结构满足预定的耐久性要求。由于没有建立耐久性设计参数与腐蚀环境作用、设计使用年限、保护层厚度、氯离子扩散系数、临界氯离子浓度等重要参数之间的量化关系,导致对于相同的工程对象,根据不同的规范、标准或指南所划分的环境条件和环境作用等级有所不同。同时,即便是在相同的环境条件和环境作用等级条件下,根据不同的规范、标准或指南所确定的最低混凝土强度等级、最大水胶比、最小胶凝材料用量、最小保护层厚度等耐久性设计参数也存在显著差异。因此,有必要对目前国内外现行的混凝土结构耐久性设计标准、规范和指南进行系统全面的对比分析。

鉴于此,收集了国内外14个国家和地区具有代表性的32部混凝土结构耐久性设计规范,系统对比分析国内外不同规范对于海洋氯盐环境条件和环境作用等级划分的依据和差异性,进而围绕最低混凝土强度等级、最大水胶比、最小胶凝材料用量、最小保护层厚度、抗氯离子渗透性指标限值、最大初始氯离子含量和最大裂缝宽度等方面,系统对比分析了不同规范针对海洋大气区、浪溅区、潮汐区和水下区环境条件下混凝土结构耐久性设计参数限值的差异性,为海洋混凝土结构的耐久性设计提供了参考。

1 环境条件与环境作用等级的划分

国外的混凝土结构耐久性设计规范主要包括欧洲规范^[2,34]、加拿大规范^[25,35]、日本规范^[19]、美国规范^[21,36]、澳大利亚规范^[24]、印度规范^[22]和南非规范^[23]等,见表1。其中,欧洲规范^[2,34]主要基于欧洲标准化协会(CEN)制定的欧洲通用规范EN 1992-1-1:2004^[2]和EN 206-1:2000^[34],葡萄牙、荷兰、英国、德国、丹麦和挪威等欧洲国家均在此基础上结合各地的实际情况进行了修订完善^[3-17]。欧洲(EN)规范^[2,34]根据不同暴露区域氯盐的腐蚀机制将海洋氯盐环境划分为XS1(大气区)、XS2(水下区)和XS3(潮汐浪溅区)三个等级;加拿大(CSA)规范^[25,35]综合考虑暴露条件、结构构件类型和腐蚀严重程度,将水下区划分为C-3级,将潮汐浪溅区和大气盐雾区划分为C-1级或C-XL级;日本(JSCE)规范^[19]根据环境腐蚀严重程度,将水下区和离海岸线距离0.1~1 km的大气轻度盐雾区划分为腐蚀环境,将潮汐区、浪溅区和离海岸线距离小于

0.1 km的大气重度盐雾区划分为严重腐蚀环境,并认为离海岸线大于1 km的区域通常不受海洋大气盐雾影响;美国(ACI)规范^[21]没有对海洋环境条件进行细分,将海洋氯盐环境和潮湿环境统一划分为C2级;美国(AASH)规范^[36]将潮汐浪溅区和水下区划分为海水环境,将大气区划分为海岸环境;澳大利亚(AS)规范^[24]根据混凝土结构沿竖向(高度)和水平方向上的腐蚀程度,将海洋氯盐环境作用按照严重等级划分为B1(轻度盐雾区)、B2级(水下区)、C1级(重度盐雾区)和C2级(潮汐区和浪溅区),其中,将离海岸线外1~50 km范围内的海洋环境划分为轻度盐雾区,将离海岸线1 km以内的海洋环境划分为重度盐雾区;印度(IS)规范^[22]将海洋水下区和大气区划分为恶劣等级,将浪溅区划分为非常恶劣等级,将潮汐区划分为极端恶劣等级;南非(SANS)规范^[23]将离海岸线小于30 km的区域划分为非常恶劣等级,将直接与海水接触的区域划分为极端恶劣等级。由此可见,EN、CSA、JSCE、AS、IS等规范对海洋氯盐环境条件和环境作用等级的划分相对比较系统全面,而ACI、AASH、SANS等规范的划分相对比较粗略;对于不同的规范,浪溅区和潮汐区的环境作用等级相对较高,其次是重度盐雾区和轻度盐雾区,水下区的环境作用等级最低;国外规范主要根据暴露条件和海岸线距离等因素划分海洋氯盐环境条件和环境作用等级,但是对于水下区、潮汐区、浪溅区和大气区的划分缺乏系统标准。

国内的混凝土结构耐久性设计规范主要包括海港工程^[26,31]、水运工程^[32]、铁路工程^[30]、公路工程^[33]等领域规范及土木工程学会标准^[27]和国家标准^[29]等,见表1。其中,海港工程(JTJ、JTS2)规范^[26,31]和水运工程(JTS1)规范^[32]考虑混凝土结构沿竖向(高度)方向上的腐蚀程度差异,将海洋氯盐环境条件划分为水下区、潮汐区、浪溅区和大气区,但是没有考虑混凝土结构沿水平方向(如离海岸距离)的腐蚀程度差异;铁路工程(TB)规范^[30]根据侵蚀部位、离海岸线距离、湿度以及水中和土中氯离子浓度等因素,将氯盐环境划分为L1、L2和L3三级;公路工程(JTG)规范^[33]根据气候条件、离涨潮线距离和暴露条件等因素,将氯盐环境划分为水下区和盐雾影响区(C级)、轻度盐雾区(D级)、重度盐雾区和非炎热地区的潮汐浪溅区(E级)以及炎热地区的潮汐浪溅区(F级),其中将涨潮线外0.3~1.2 km范围内的陆上环境划分为盐雾影响区,将涨潮线外0.1~0.3 km范围内的陆上环境划分为轻度盐雾区,将离涨潮线0.1 km以内的陆上环境划分为重度盐雾区;土木工程学会(CCES)标准^[27]将氯盐环境作用划分为水下区和轻度盐雾区(D级)、重度盐雾区和非炎热地区的潮汐浪溅区(E级)以及炎热地区的潮汐浪溅区(F级);国家(GB)标准^[29]将海洋氯盐环境条件和环境作用等级划分为水下区(C级)、轻度盐雾区(D级)、重度盐雾区和非炎热地区的潮汐浪溅区(E级)以及炎热地区的潮汐浪溅区(F级)。JTJ、CCES和GB三个标准均以平均水位上方15 m和离涨潮岸线0.1 km为界划分轻度盐雾区和重度盐雾区,将潮汐区和浪溅区合并为潮汐浪溅区,并将非炎热地区和炎热地区的潮汐浪溅区分别划分为E级和F级。由此可见,与国外规范相比,国内规范的环境作用等级划分相对更为系统全面,而且考虑了混凝土结构沿竖向和水平方向上腐蚀程度的差异性以及温度、湿度等对耐久性影响较大的因素影响,但是在离海岸线距离、所处海水环境位置、温湿度等方面的划分依据和形式存在差异;考虑到浪溅区的干湿循环次数多、氯离子供给充足、含氧量丰富等因素,国内规范^[26-27,29-33]对浪溅区所划分的环境作用等级高于潮汐区,而国外规范^[2-17,19,21-25,34-36]通常将潮汐区和浪溅区划分为同一环境作用等级;中外规范虽然划分了环境作用等级,但是主要采用中度、严重、非常严重和极端严重等定性描述,由于缺乏不同等级环境作用的量化指标(如表面氯离子浓度),从而无法为海洋混凝土结构的耐久性分析与设计提供量化边界条件^[32,37-39]。

表1 不同规范的环境条件和环境作用等级划分标准

Tab. 1 Classification criteria of environmental conditions and environmental action classes for various codes

序号	规范编号	简称	国别	文献	大气区	浪溅区	潮汐区	水下区
1	JTJ 275-2000	JTJ	中国	[26]	设计高水位加1.5 m以上	大气区下界至设计高水位减1.0 m之间	浪溅区下界至设计低水位减1.0 m之间	水位变动区以下
2	JTS 257-2-2012	JTS2	中国	[31]	同上	同上	同上	同上
3	JTS 153-2015	JTS1	中国	[32]	同上	同上	同上	同上

(续表)

序号	规范编号	简称	国别	文献	大气区	浪溅区	潮汐区	水下区
4	TB 10005-2010	TB	中国	[30]	L1级(轻度盐雾区);L2级(重度盐雾区)	L2级(非炎热地区);L3级(炎热地区)	L2级(非炎热地区);L3级(炎热地区)	L1级
5	JTG/T 3310-2019	JTG	中国	[33]	C级(盐雾影响区);D级(轻度盐雾区);E级(重度盐雾区)	E级(非炎热地区);F级(炎热地区)	E级(非炎热地区);F级(炎热地区)	D级
6	CCES 01-2004	CCES	中国	[27]	D级(轻度盐雾区);E级(重度盐雾区)	同上	同上	同上
7	GB/T 50476-2019	GB	中国	[29]	同上	同上	同上	C级
8	EN 206-1: 2000; EN 1992-1-1: 2004	EN	欧洲	[2,34]	XS1	XS3	XS3	XS2
9	NP EN 206-1: 2007; NP EN 1992-1-1/ NA: 2010	NP	葡萄牙	[11-12]	同上	同上	同上	同上
10	NEN 6700: 2005; NEN 8005: 2008; NEN-EN 1992- 1-1/NA: 2011	NEN	荷兰	[8-10]	同上	同上	同上	同上
11	BS 8500-1: 2006; BS 8500-2: 2006; BS NA EN 1992- 1-1: 2005	BS	英国	[13-15]	同上	同上	同上	同上
12	DIN EN 1992-1-1/NA: 2013;DIN 1045-1: 2001; DIN 1045-2: 2008	DIN	德国	[3-5]	同上	同上	同上	同上
13	DS 2426: 2011; DS/EN 1992-1-1 DK NA: 2013	DK	丹麦	[6-7]	同上	同上	同上	同上
14	NS-EN 206-1: 2000+NA 2007; NS-EN 1992- 1-1/NA: 2008	NS	挪威	[16-17]	同上	同上	同上	同上
15	CSA A23. 3-19; CSA A23. 1: 19/ CSA A23.2: 19	CSA	加拿大	[25,35]	C-1、C-XL	C-1、C-XL	C-1、C-XL	C-3
16	JSCE Guidelines for Concrete No. 15	JSCE	日本	[19]	侵蚀环境(离海岸线0.1~1 km); 特重腐蚀环境 (离海岸线0~ 0.1 km)	特重腐蚀环境	特重腐蚀环境	侵蚀环境
17	ACI 318-19	ACI	美国	[21]	C2	C2	C2	C2
18	AASHTO LRFD-8	AASH	美国	[36]	海岸环境	海水环境	海水环境	海水环境
19	AS 3600: 2018	AS	澳大利亚	[24]	B1(轻度盐雾区); C1(重度盐雾区)	C2	C2	B2
20	IS 456: 2000	IS	印度	[22]	恶劣	非常恶劣	极端	恶劣
21	SANS 10100-2: 2014	SANS	南非	[23]	非常恶劣	极端	极端	极端

注:JTJ、JTS1 和 JTS2 规范以有掩护条件为例。

2 耐久性设计参数的限值

当前,国内外混凝土结构耐久性设计规范主要基于工程经验和定性分析,预期通过限制混凝土的强度等级、水胶比、胶凝材料用量、保护层厚度、氯离子扩散系数或电通量、氯离子含量以及裂缝宽度等参数的限值来保证混凝土结构的耐久性。因此,有必要围绕国内外规范的耐久性设计参数限值开展系统性对比分析。需要说明的是,铁路工程(TB)规范^[30]采用的设计使用年限为 60 a,而其他规范采用的设计使用年限统一为 50 a;CCES^[27]、JTG^[33]、GB^[29]、JSCE^[19]和 CSA^[25,35]等规范以墩柱等条形构件为例,其他规范没有明确区分面形构件和条形构件。

2.1 最低混凝土强度等级

混凝土强度等级与混凝土的孔隙结构和密实性等性能指标密切相关,而且混凝土强度比较容易测定,所以国内外耐久性设计规范普遍对最低混凝土强度等级进行了限定,见表 2。其中,CSA、ACI 和 AS 规范采用的是标准圆柱体试件($\Phi 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$)的抗压强度等级,而其他规范采用的是标准立方体试件($150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$)的抗压强度等级。由表 2 可知,在相同的环境条件下,国内外不同规范给定的最低混凝土强度等级通常相差 3~4 个等级;对于不同的环境条件,各国规范给定的最低混凝土强度等级也存在显著差异。其中,潮汐区和浪溅区的最低混凝土强度等级相对较高,而水下区和大气区的最低混凝土强度等级相对较低,二者通常相差 2~3 个等级。对于大气区,当离涨潮线距离小于 0.1 km 时,TB、JTG、CCES 和 GB 规范的最低混凝土强度等级提高 1 个等级。对于潮汐区和浪溅区,当位于炎热(南方)地区,JTG、CCES、GB 和 JTJ 规范的最低混凝土强度等级提高 1 个等级;对于大气区,JTJ、JTS1、BS 和 IS 等规范的最低混凝土强度等级相对较低(C30),而 JTS2、CCES、GB 和 SANS 等规范的最低混凝土强度等级相对较高(C40~C45)。对于潮汐区和浪溅区,JTJ、JTS1、TB、BS、CSA 和 IS 等规范的最低混凝土强度等级相对较低(C30~C35),而 JTS2、JTG、CCES、GB、EN、NP 和 DIN 等规范的最低混凝土强度等级相对较高(C45~C50);此外,我国海港工程和水运工程(JTJ、JTS2 和 JTS1)规范对于浪溅区的最低混凝土强度等级比潮汐区的高 1~2 个等级,其他规范对于潮汐区和浪溅区的最低混凝土强度等级一致;对于水下区,JTJ、JTS1、TB、BS、CSA 和 IS 等规范的最低混凝土强度等级相对较低(C25~C30),而 JTS2、CCES、GB、EN、NP、DIN、AS 和 SANS 等规范的最低混凝土强度等级相对较高(C40~C45)。对于 CSA 规范,大气区、潮汐区和浪溅区的最低混凝土强度等级为 C35,水下区的最低混凝土强度等级为 C30;对于 ACI 规范,所有环境条件下的最低混凝土强度等级均为 C35;对于 AS 规范,轻度盐雾区的最低混凝土强度等级为 C32,水下区的最低混凝土强度等级为 C40,而重度盐雾区、潮汐区和浪溅区的最低混凝土强度等级为 C50。

表 2 不同环境条件下各规范的最低混凝土强度等级对比

Tab. 2 Comparison of minimum concrete strength classes for various codes under different environmental conditions

环境条件	JTJ	JTS2	JTS1	TB	JTG	CCES	GB	EN	NP	BS	DIN	DK	CSA	ACI	AS	IS	SANS
大气区	C30	C40	C30	C30 ¹⁾ C35 ²⁾	C35 ¹⁾ C40 ²⁾	C40 ¹⁾ C45 ²⁾	C40 ¹⁾ C45 ²⁾	C37	C37	C30	C37	C35	C35	C35	C32 ¹⁾ C50 ²⁾	C30	C40
浪溅区	C35 ⁵⁾ C40 ⁶⁾	C45	C40	C35	C40 ³⁾ C45 ⁴⁾	C45 ³⁾ C50 ⁴⁾	C45 ³⁾ C50 ⁴⁾	C45	C45	C30	C45	C40	C35	C35	C50	C35	C40
潮汐区	C30	C40	C35	C35	C40 ³⁾ C45 ⁴⁾	C45 ³⁾ C50 ⁴⁾	C45 ³⁾ C50 ⁴⁾	C45	C45	C30	C45	C40	C35	C35	C50	C35	C40
水下区	C25	C40	C30	C30	C35	C40	C40	C45	C45	C25	C45	C35	C30	C35	C40	C30	C40

注:1) 表示轻度盐雾区;2) 表示重度盐雾区;3) 表示非炎热地区;4) 表示炎热地区;5) 表示北方地区;6) 表示南方地区。其中,炎热地区与非炎热地区以年平均温度是否高于 20℃来划分,南方地区与北方地区以历年月平均最低气温是否高于 0℃来划分。

2.2 最大水胶比

混凝土的水胶比与混凝土的密实性、抗渗性和力学性能等指标密切相关。不同环境条件下各规范给定的最大水胶比如图 1 所示。由图 1 可知,在相同的环境条件下,国内外不同规范给定的最大水胶比存在显著差异,通常相差 0.15~0.20;对于不同的环境条件,各国规范给定的混凝土最大水胶比也存在显著差异。其

中,潮汐区和浪溅区的最大水胶比相对较低,大气区和水下区的最大水胶比相对较高,二者通常相差0.10;对于大气区,当离涨潮线距离大于0.1 km时,TB和JTG规范的最大水胶比提高0.05,CCES规范的最大水胶比提高0.02,当位于北方地区时,JTJ和JTS1规范的最大水胶比提高0.05;对于潮汐区和浪溅区,当位于炎热地区,JTG、CCES和GB规范的最大水胶比降低0.04,当位于北方地区,JTJ和JTS1规范的最大水胶比提高0.05~0.10。对于大气区,JTS2、GB、BS、CSA和ACI等规范的最大水胶比相对较低(0.35~0.40),而JTJ、JTS1、TB、JTG、EN、NP、NEN和DIN等规范的最大水胶比相对较高(0.50~0.55);对于潮汐区和浪溅区,JTS2、CCES、GB、BS、CSA、ACI和IS等规范的最大水胶比相对较低(0.35~0.40),而JTJ和TB等规范的最大水胶比相对较高(0.50~0.55);值得注意的是,我国海港工程和水运工程(JTJ、JTS2和JTS1)规范对于浪溅区的最大水胶比要比潮汐区的低0.05~0.15,而印度IS规范对于浪溅区的最大水胶比比潮汐区的低0.05,其余规范对于潮汐区和浪溅区最大水胶比一致;对于水下区,JTS2、GB、BS和ACI等规范的最大水胶比相对较低(0.40),而JTJ、JTS1和TB等规范的最大水胶比相对较高(0.55~0.60)。

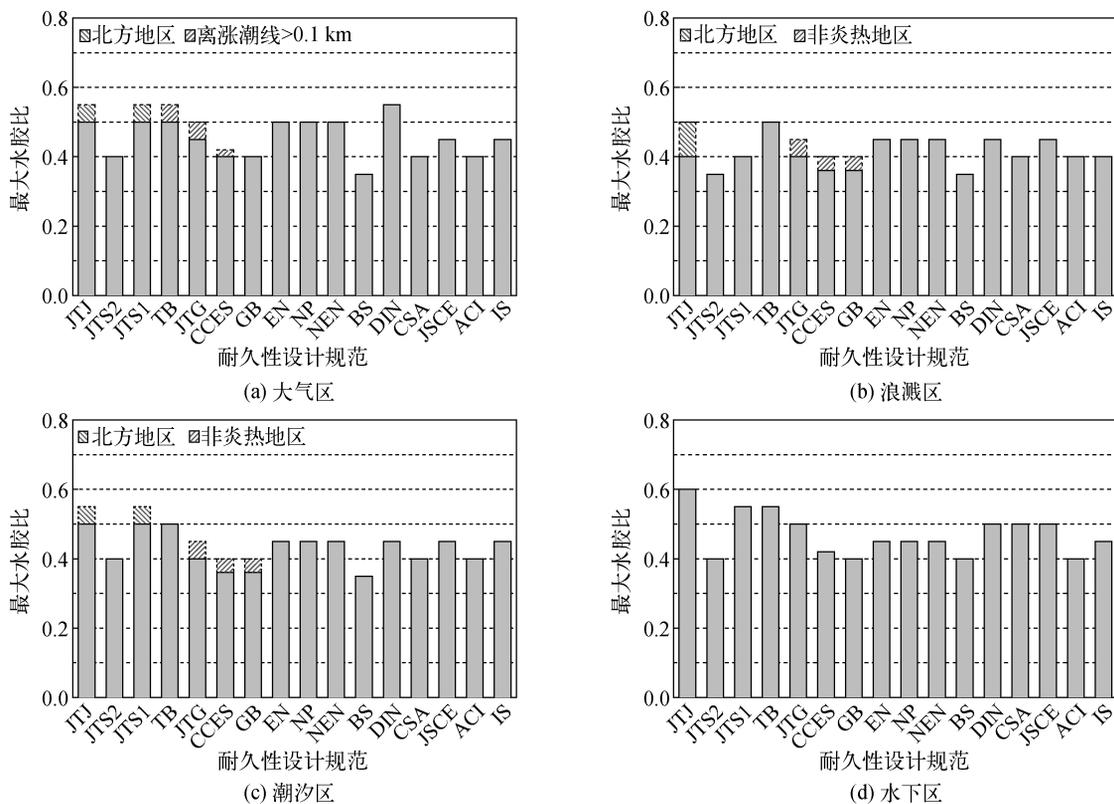


图1 不同环境条件下各规范的最大水胶比对比

Fig. 1 Comparison of maximum water-to-binder ratios of various codes under different environmental conditions

2.3 最小胶凝材料用量

胶凝材料用量对混凝土的和易性、密实性、抗渗性等指标影响较大。不同环境条件下各规范给定的最小胶凝材料用量如图2所示。由图2可知,对于不同的环境条件下,各国规范给定的最小胶凝材料用量总体上差异不大(300~400 kg/m³),但在考虑环境因素方面各规范存在略微差异。对于大气区,当离涨潮线距离小于0.1 km时,TB和JTG规范的最小胶凝材料用量增加了20 kg/m³,当位于南方地区时,JTS1和JTJ规范的最小胶凝材料用量分别增加了40 kg/m³和60 kg/m³。对于潮汐区和浪溅区,当位于炎热地区时,JTG规范的最小胶凝材料用量增加了20 kg/m³,当位于南方地区时,JTJ和JTS1规范的最小胶凝材料用量增加了40~60 kg/m³;对于大气区,除我国海港工程和水运工程(JTJ、JTS2和JTS1)等规范外,其余国内外规范的最小胶凝材料用量都在280~330 kg/m³之间;对于潮汐区和浪溅区,规范规定最小胶凝材料用量均不小于300 kg/m³,其中JTJ、JTS2和JTS1等规范的最小胶凝材料用量最大可达到400 kg/m³,IS规范的最小胶凝材料用量最大可达到360 kg/m³,其他规范的最小胶凝材料用量在300~340 kg/m³之间。此外,我国海港工程和水运工程(JTJ、JTS2和JTS1)等规范对于浪溅区的最小胶凝材料用量比潮汐区的增加了20~100 kg/m³不

等,而印度 IS 规范对于浪溅区的最小胶凝材料用量比潮汐区的减小了 20 kg/m^3 ,其余规范对于潮汐区和浪溅区的最小胶凝材料用量基本一致;对于水下区,除 JTS2 规范外(380 kg/m^3),其余国内外规范的最小胶凝材料用量均在 $280 \sim 320 \text{ kg/m}^3$ 之间。

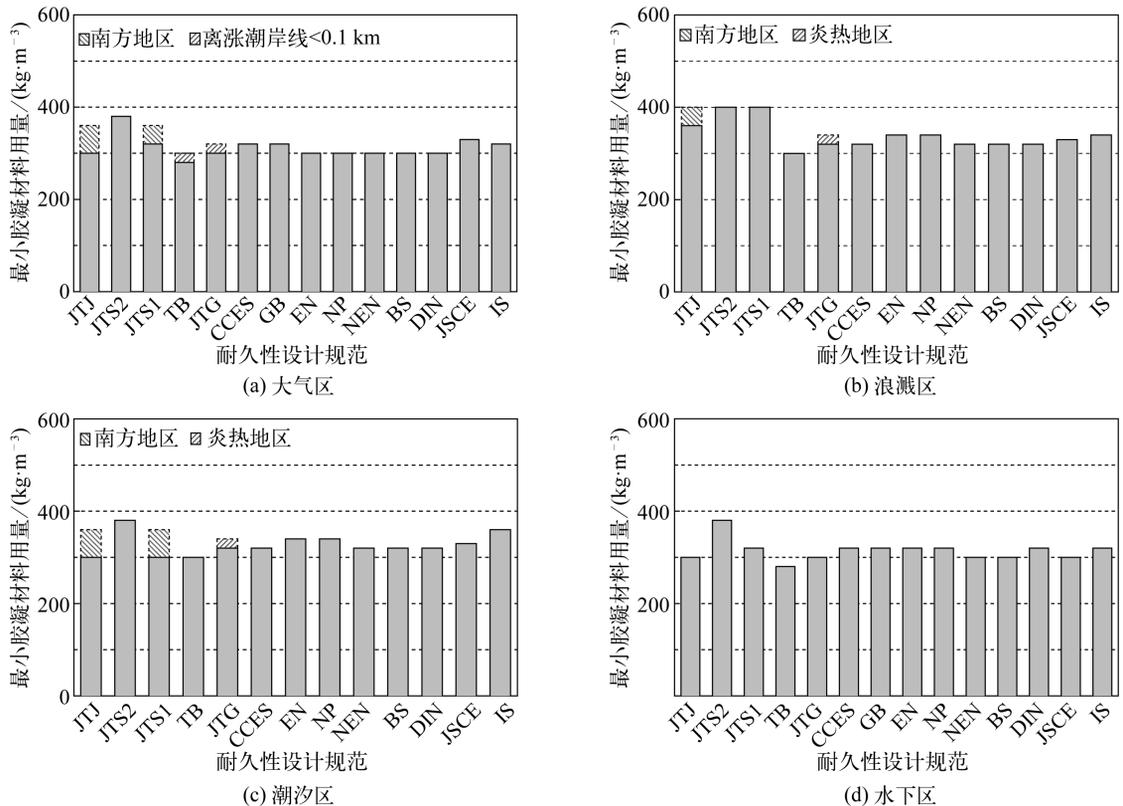


图 2 不同环境条件下各规范的最小胶凝材料用量对比

Fig. 2 Comparison of minimum binder contents for various codes under different environmental conditions

2.4 最小保护层厚度

足够的混凝土保护层厚度不仅能够保证钢筋与混凝土之间的黏结力,而且可以保护混凝土中的钢筋免遭外部腐蚀性物质的侵蚀,对于混凝土结构的耐久性具有重要影响。不同环境条件下中外规范给定的最小保护层厚度如图 3 所示。其中, JTJ、JTS1 和 JTS2 规范的保护层厚度定义为混凝土中主筋表面与混凝土表面的最小距离,而其他规范的保护层厚度定义为混凝土中最外侧钢筋表面与混凝土表面的最小距离。由图 3 可知,在相同的环境条件下,国内外不同规范给定的最小保护层厚度存在显著差异,通常相差 $20 \sim 30 \text{ mm}$;对于不同的环境条件,各国规范给定的最小保护层厚度也存在显著差异。其中,潮汐区和浪溅区的最小保护层厚度相对较大,大气区和水下区的最小保护层厚度相对较小,二者通常相差 10 mm 。对于大气区,当离涨潮线距离小于 0.1 km 时, TB、CCES 和 GB 规范的最小保护层厚度增大了 5 mm ,当离海岸线距离小于 1 km 时, AS 规范的最小保护层厚度增大了 10 mm ;对于潮汐区和浪溅区,当位于炎热(南方)地区, JTS2、JTS1、CCES 和 GB 规范的最小保护层厚度增大了 5 mm , TB 规范的最小保护层厚度增大了 10 mm , JTJ 规范的最小保护层厚度增大了 15 mm 。对于大气区, EN、NP、NEN、BS 和 DK 等规范的最小保护层厚度相对较小 ($30 \sim 35 \text{ mm}$),而 GB、CSA、AASH 和 SANS 等规范的最小保护层厚度相对较大 ($55 \sim 75 \text{ mm}$);对于潮汐区和浪溅区, JTG、EN、NP、NEN、BS、DIN 和 DK 等规范的最小保护层厚度相对较小 ($40 \sim 45 \text{ mm}$),而 JTJ、JTS2、JTS1、TB、GB、NS、CSA、AASH、AS、IS 和 SANS 等规范的最小保护层厚度相对较大 ($60 \sim 75 \text{ mm}$)。此外,我国海港工程和水运工程(JTJ、JTS2 和 JTS1)等规范对于浪溅区的最小保护层厚度比潮汐区的增加了 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 不等,而 IS 规范对于浪溅区的最小保护层厚度比潮汐区减小了 25 mm ,其余规范对于潮汐区和浪溅区的最小保护层厚度保持一致;对于水下区, JTJ、BS 和 DK 等规范的最小保护层厚度相对较小 (30 mm),而 NS、CSA、AASH 和 SANS 等规范的最小保护层厚度相对较大 ($50 \sim 75 \text{ mm}$)。

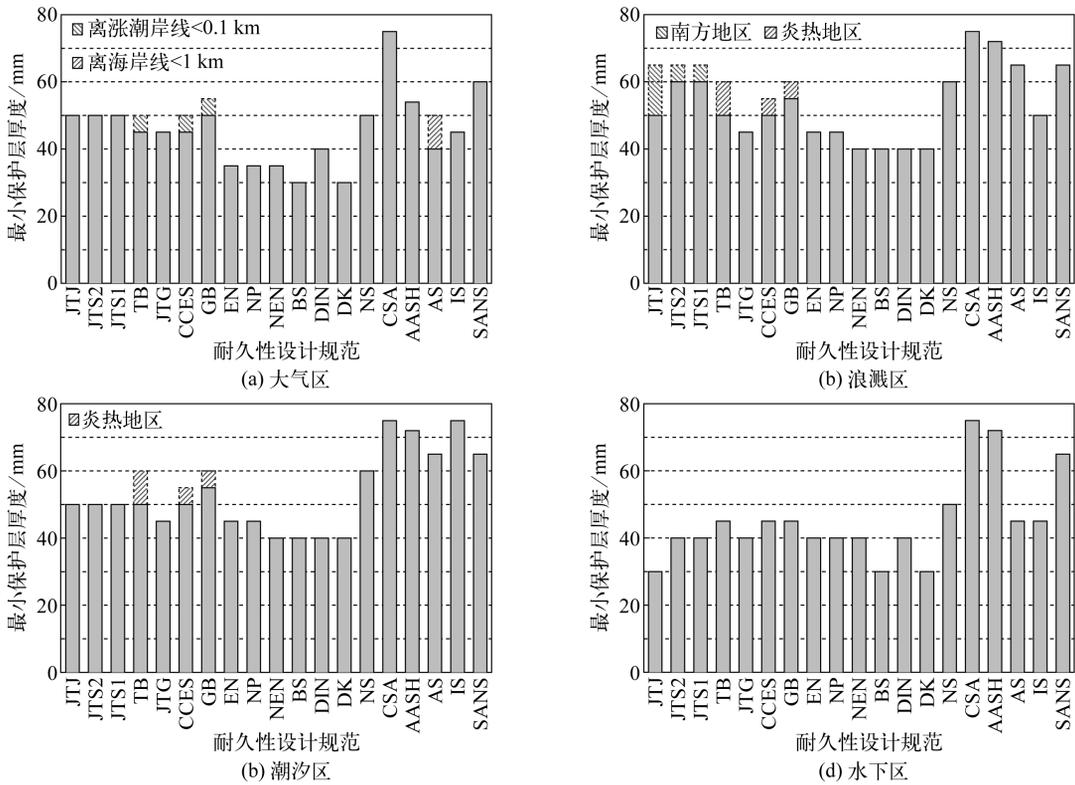


图 3 不同环境条件下各规范的最小保护层厚度对比

Fig. 3 Comparison of minimum concrete covers for various codes under different environmental conditions

2.5 抗氯离子渗透性指标限值

混凝土的电通量和氯离子扩散系数是描述混凝土抗氯离子渗透性的两个重要指标,且通常可以在实验室内快速测定^[32,40-42]。其中,JTJ、JTS2、JTS1、TB、CCES、JTG 和 CSA 等规范给出了不同环境条件下混凝土电通量的上限值(见表 3),而 JTS2、JTS1、JTG、CCES 和 GB 等规范给出了不同环境条件下混凝土氯离子扩散系数的上限值(见表 4)。由表 3 和表 4 可知,在不同的环境条件下,各规范给出的电通量和氯离子扩散系数的上限值差异较大。其中,浪溅区和潮汐区的电通量上限值均在 800~2 000 C 之间,氯离子扩散系数上限值均在 $4 \times 10^{-12} \sim 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间;水下区的电通量上限值在 1 000~2 000 C 之间,氯离子扩散系数上限值在 $4.5 \times 10^{-12} \sim 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间。对于大气区,CSA、JTS2 和 JTS1 等规范没有区分轻度盐雾区和重度盐雾区,电通量上限值在 1 000~2 000 C 之间,氯离子扩散系数上限值在 $4.5 \times 10^{-12} \sim 8.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间;TB、JTG、CCES 和 GB 等规范区分了轻度盐雾区和重度盐雾区,其中,TB、CCES 和 JTG 规范规定,轻度盐雾区的电通量上限值在 1 500~2 000 C 之间,氯离子扩散系数上限值为 $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,而重度盐雾区的电通量上限值为 1 000~1 500 C,氯离子扩散系数上限值在 $6.0 \times 10^{-12} \sim 8.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间;GB 规范未给出电通量上限值,但规定轻度盐雾区和重度盐雾区的氯离子扩散系数上限值分别为 $10.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $6.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。CSA 规范未给出氯离子扩散系数上限值,但规定大气区的电通量上限值为 1 500 C,当需要满足更高设计使用年限要求时,电通量上限值为 1 000 C。

表 3 不同环境条件下各规范的混凝土电通量上限值对比

Tab. 3 Comparison of upper bounds of concrete electric fluxes for various codes under different environmental conditions (C)

环境条件	JTJ	JTS2	JTS1	TB	CCES	JTG	CSA
大气区	-	1 000	2 000	2 000 ¹⁾ ; 1 500 ²⁾	1 500 ¹⁾ ; 1 000 ²⁾	1 500 ¹⁾ ; 1 000 ²⁾	1 500; 1 000 ⁷⁾
浪溅区	2 000 ⁶⁾	1 000	2 000	1 500	1 000 ³⁾	1 000 ³⁾ ; 800 ⁴⁾	1 500; 1 000 ⁷⁾
潮汐区	-	1 000	2 000	1 500	1 000 ³⁾	1 000 ³⁾ ; 800 ⁴⁾	1 500; 1 000 ⁷⁾
水下区	-	1 000	-	2 000	1 500	-	-

注:1) 表示轻度盐雾区;2) 表示重度盐雾区;3) 表示非炎热地区;4) 表示炎热地区;6) 表示南方地区;7) 表示需要满足更高设计使用年限要求的情况。JTS1 和 JTS2 规范对掺有粉煤灰或粒化高炉矿渣粉的混凝土按标准养护条件养护 56 d 龄期后测定电通量,对其他混凝土按标准养护条件养护 28 d 龄期后测定电通量;TB、CCES、JTG 和 CSA 规范按标准养护条件养护 56 d 龄期后测定电通量。

表 4 不同环境条件下各规范的混凝土氯离子扩散系数上限值对比

Tab. 4 Comparison of upper bounds of chloride diffusion coefficient for various codes under different environmental conditions ($10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)

环境条件	JTS2	JTS1	TB	JTG	CCES	GB
大气区	4.5	8.0	10 ¹⁾ ; 8 ²⁾	10 ¹⁾ ; 7 ²⁾	10 ¹⁾ ; 6 ²⁾	10 ¹⁾ ; 6 ²⁾
浪溅区	4.5	4.5	8 ³⁾ ; 4 ⁴⁾	7 ³⁾ ; 5 ⁴⁾	6 ³⁾	6 ³⁾
潮汐区	4.5	6.5	8 ³⁾ ; 4 ⁴⁾	7 ³⁾ ; 5 ⁴⁾	6 ³⁾	6 ³⁾
水下区	4.5	-	10	-	10	-

注:1) 表示轻度盐雾区;2) 表示重度盐雾区;3) 表示非炎热地区;4) 表示炎热地区。JTS1 和 JTS2 规范对掺有粉煤灰或粒化高炉矿渣粉的混凝土按标准养护条件养护 56 d 龄期后测定氯离子扩散系数,对其他混凝土按标准养护条件养护 28 d 龄期后测定氯离子扩散系数;TB 规范按标准养护条件养护 56 d 龄期后测定氯离子扩散系数;JTG、CCES 和 GB 规范按标准养护条件养护 28 d 龄期后测定氯离子扩散系数。

2.6 最大初始氯离子含量

混凝土中的氯离子会促使钢筋表面的钝化膜破坏而发生锈蚀,由氯离子引起的钢筋锈蚀是导致海洋混凝土结构耐久性劣化的主要原因。除了从外部暴露环境向混凝土内部传输进入外,氯离子还会通过原材料(如砂石、水泥、矿物掺合料)、搅拌用水以及外加剂等途径混入混凝土内部。因此,各国规范对素混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土中的最大初始氯离子含量分别进行了限定,但在计算方式和具体限值方面存在较大差别。以钢筋混凝土为例,欧洲(EN)规范根据不同环境类别规定混凝土中的最大初始氯离子含量分别为 0.4%和 0.2%(占胶凝材料质量的百分比);德国(DIN)规范根据实际环境条件规定最大初始氯离子含量为 0.4%(占胶凝材料质量的百分比);美国(ACI)规范和加拿大(CSA)规范都规定新拌混凝土的最大初始氯离子含量为 0.15%(占胶凝材料质量的百分比);日本(JSCE)规范规定侵蚀环境和严重侵蚀环境的最大初始氯离子含量为 0.3%(占混凝土质量的百分比);国际预应力混凝土协会(FIP)规范^[43]规定热带气候、温带气候和极冷地区的最大初始氯离子含量分别为 0.1%、0.4%和 0.6%(占水泥质量的百分比);中国国家(GB)标准给定的最大初始氯离子含量为 0.08%(占胶凝材料质量的百分比);JTJ、JTS2、JTS1、TB、JTG、CCES 等规范给定的最大初始氯离子含量为 0.1%(占胶凝材料质量的百分比)。总体而言,国内规范规定的最大初始氯离子含量比国外规范给定的限值低。

2.7 最大裂缝宽度

由于混凝土的抗拉强度较低,在实际工程中往往带裂缝工作。混凝土裂缝为外部腐蚀环境中的氯离子、水分和氧气等物质向混凝土内部的传输提供了便捷通道,会明显加剧混凝土结构的耐久性劣化。因此,各国规范对混凝土的最大裂缝宽度进行了限定,见表 5。由表 5 可知,在不同的环境条件下,各规范给定的最大裂缝宽度差异较大。其中,浪溅区和潮汐区的混凝土最大裂缝宽度均在 0.10~0.30 mm 之间;水下区的混凝土最大裂缝宽度在 0.15~0.30 mm 之间;对于大气区,JTJ、JTS2、JTS1、TB、EN、DIN 和 DK 等规范没有区分轻度盐雾区和重度盐雾区,规定的混凝土最大裂缝宽度在 0.20~0.30 mm 之间;JTG、CCES 和 GB 等规范区分了轻度盐雾区和重度盐雾区,规定轻度盐雾区的混凝土最大裂缝宽度在 0.15~0.20 mm 之间,而重度盐雾区的混凝土最大裂缝宽度在 0.10~0.15 mm 之间;日本(JSCE)规范考虑保护层厚度的影响,规定浪溅区、潮汐区和大气区(离海岸线 $d < 0.1 \text{ km}$)的混凝土最大裂缝宽度为保护层厚度的 0.35%(即 0.35c%),而水下区和大气区(离海岸线 $d > 0.1 \text{ km}$)的混凝土最大裂缝宽度为保护层厚度的 0.40%(即 0.40c%)。

表 5 不同环境条件下各规范的混凝土最大裂缝宽度对比

Tab. 5 Comparison of maximum crack widths of concrete for various codes under different environmental conditions (mm)

环境条件	JTJ	JTS2	JTS1	TB	JTG	CCES	GB	EN	DIN	DK	JSCE
大气区	0.20	0.20	0.20	0.20	0.15 ¹⁾ ; 0.10 ²⁾	0.20 ¹⁾ ; 0.15 ²⁾	0.20 ¹⁾ ; 0.15 ²⁾	0.30	0.30	0.30	0.40c% ¹⁾ ; 0.35c% ²⁾
浪溅区	0.20	0.20	0.20	0.20 ³⁾ ; 0.15 ⁴⁾	0.10	0.15 ³⁾ ; 0.10 ⁴⁾	0.15	0.30	0.30	0.20	0.35c%
潮汐区	0.25	0.25	0.20	0.20 ³⁾ ; 0.15 ⁴⁾	0.10	0.15 ³⁾ ; 0.10 ⁴⁾	0.15	0.30	0.30	0.20	0.35c%
水下区	0.30	0.30	0.30	0.20	0.15	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.40c%

注:c 为混凝土保护层厚度,mm;1) 表示轻度盐雾区;2) 表示重度盐雾区;3) 表示非炎热地区;4) 表示炎热地区。

3 结 论

针对国内外耐久性设计规范在海洋混凝土结构环境条件与环境作用等级划分以及耐久性设计参数限值等方面进行了系统对比分析,得出以下结论:

1) 国外规范主要根据暴露条件和海岸线距离等因素划分海洋氯盐环境条件和环境作用等级,但是对水下区、潮汐区、浪溅区和大气区缺乏系统的划分标准;与国外规范相比,国内规范的环境作用等级划分更为系统全面,且考虑了混凝土结构沿竖向和水平方向上腐蚀程度的差异性以及温度、湿度等条件的影响,但是在离海岸线距离、所处海水环境位置、温湿度等方面的划分依据和形式存在差异;此外,国内外规范虽然划分了环境作用等级,但是主要采用中度、严重、非常严重和极端严重等定性描述,缺乏不同等级环境作用的量化指标,从而无法为海洋混凝土结构的耐久性分析与设计提供量化边界条件。

2) 国内外现有的混凝土结构耐久性设计规范主要基于工程经验和定性分析,预期通过限制混凝土的强度等级、水胶比、胶凝材料用量、保护层厚度、氯离子扩散系数或电通量、氯离子含量以及裂缝宽度等参数的限值来保证混凝土结构的耐久性,不仅缺少海洋氯盐环境作用的量化指标,而且缺乏合理的耐久性定量分析模型与设计技术,导致无法通过定量计算确定耐久性设计参数的取值。对于相同的环境条件,不同规范所给定的耐久性设计参数限值差异较大。其中,最低混凝土强度等级相差2~4个等级;最大水胶比相差0.15~0.20;最小胶凝材料用量相差20~100 kg/m³;最小保护层厚度相差20~30 mm;混凝土电通量相差1 000~1 200 C;氯离子扩散系数上限值相差 $3.5 \times 10^{-12} \sim 5.5 \times 10^{-12}$ m²/s;最大初始氯离子含量相差0.02%~0.32% (占胶凝材料质量百分比);最大裂缝宽度相差0.05~0.20 mm。

3) 为了实现海洋混凝土结构的耐久性定量分析与设计,有必要进一步围绕海洋氯盐环境作用量化、海洋混凝土结构耐久性定量分析模型、海洋混凝土结构耐久性定量设计技术等方面开展深入研究。

参考文献:

- [1] CEB. No.182, Durable concrete structures—CEB design guide, second edition [S]. European Committee for Concrete, 1989.
- [2] EN 1992-1-1: 2004, Eurocode2: Design of concrete structure-part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [3] DIN 1045-1: 2001, Plain, reinforced and prestressed concrete structures part 1: Design and construction [S]. Berlin: German Institute for Standardisation, 2001.
- [4] DIN 1045-2: 2008, National annexe to EN 206-1 [S]. Berlin: German Institute for Standardisation, 2008.
- [5] DIN EN 1992-1-1/NA: 2013, National annexe to EN 1992-1-1 [S]. Berlin: German Institute for Standardisation, 2013.
- [6] DS/EN 1992-1-1 DK NA: 2013, National annexe to EN 1992-1-1 [S]. Copenhagen: Dansk Standardiseringsrad (DS), 2013.
- [7] DS 2426: 2011, Concrete - materials - rules for application of EN 206-1 in Demark [S]. Copenhagen, Demark: Dansk Standardiseringsrad (DS), 2011.
- [8] NEN 6700: 2005, Technical principles for building structures [S]. Delft: The Netherlands Standardization Institute, 2005.
- [9] NEN 8005: 2008, Dutch supplement to NEN-EN 206-1: Concrete - part 1: Specification, performance, production and conformity [S]. Delft: The Netherlands Standardization Institute, 2008.
- [10] NEN-EN 1992-1-1/NA: 2011, National annexe to EN 1992-1-1 [S]. The Netherlands: The Netherlands Standardization Institute, 2011.
- [11] NP EN 206-1: 2007, Betão-parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade[S]. Lisboa, 2007.
- [12] NP EN 1992-1-1/NA: 2010, National annexe to EN 1992-1-1[S]. Lisboa, 2010.
- [13] BS 8500-1: 2006, Concrete-complementary British standard to BS EN 206-1 - part 1: method of specifying and guidance for the specifier [S]. London: British Standards Institution, 2006.
- [14] BS 8500-2: 2006, Concrete-complementary British standard to BS EN 206-1-part 2: Specification for constituent materials and concrete [S]. London: British Standards Institution, 2006.
- [15] BS EN 1992-1-1: 2004+A1: 2004, National annexe to EN 1992-1-1 [S]. London: British Standards Institution, 2014.
- [16] NS-EN 206-1:2000+NA 2007, National annexe to EN 206-1[S]. Norway, 2007.
- [17] NS-EN 1992-1-1/NA: 2008, National annexe to EN 1992-1-1[S]. Norway, 2008.
- [18] JSCE, Proposed recommendation on durability design for concrete structure[S]. Concrete Library of JSCE, 1990.
- [19] JSCE Guidelines for Concrete No.15, Standard specifications for concrete structures-2007, design [S]. Tokyo: Japan Society of

Civil Engineers, 2007.

- [20] ACI 201 2R-92, Guide to durable concrete [S]. Detroit: American Concrete Institute, 1992.
- [21] ACI 318-19, Building code requirements for structural concrete [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.
- [22] IS 456: 2000, Plain and reinforced concrete, code of practice (4th revision) [S]. New Delhi: Bureau of Indian Standards, 2000.
- [23] SANS 10100-2: 2014, The structural use of concrete. Part 2: Materials and execution of work [S]. Pretoria: South Africa SABS Standards Division, 2014.
- [24] AS 3600: 2018, Concrete structures [S]. Sydney: SAI Global, 2018.
- [25] CSA A23.3-19, Design of concrete structures [S]. Toronto: CSA Group, 2019.
- [26] JTJ 275-2000, 海港工程混凝土结构防腐技术规范[S]. 2000.(JTJ275-2000, Corrosion prevention technical specifications for concrete structures of marine harbor engineering [S]. 2000.(in Chinese))
- [27] CCES 01-2004 (2005 修订版), 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S]. 2005.(CCES 01-2004 (Revised 2005), Guide to durability design and construction of concrete structures [S]. 2005. (in Chinese))
- [28] GB/T 50476-2008, 混凝土结构耐久性设计规范[S]. 2008.(GB/T 50476-2008, Code for durability design of concrete structures [S]. 2008. (in Chinese))
- [29] GB/T 50476-2019, 混凝土结构耐久性设计标准[S]. 2019.(GB/T 50476-2019, Standard for design of concrete structures durability [S]. 2019. (in Chinese))
- [30] TB 10005-2010, 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S]. 2010.(TB 10005-2010, Code for durability design on concrete structures of railway [S]. 2010. (in Chinese))
- [31] JTS 257-2-2012, 海港工程高性能混凝土质量控制标准[S]. 2012.(JTS 257-2-2012, Quality control standard of high-performance concrete for sea port engineering [S]. 2012. (in Chinese))
- [32] JTS153-2015, 水运工程结构耐久性设计标准[S]. 2015.(JTS153-2015, Standard for durability design of port and waterway engineering structure [S]. 2015. (in Chinese))
- [33] JTG/T 3310-2019, 公路工程混凝土结构耐久性设计规范[S]. 2019.(JTG/T 3310-2019, Code for durability design of concrete structures in highway engineering [S]. 2019. (in Chinese))
- [34] EN 206-1: 2000, Concrete-part 1: Specification, performance, production and conformity[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2000.
- [35] CSA A23.1:19/CSA A23.2:19, Concrete materials and methods of concrete construction/ test methods and standard practices for concrete[S]. Toronto: CSA Group, 2019.
- [36] AASHTO LRFD-8, AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- [37] DB45/T 1828-2018, 海港工程混凝土材料与结构耐久性定量设计规范[S]. 2018.(DB45/T 1828-2018, Code for quantitative durability design of concrete materials and structures for harbour engineering [S]. 2018. (in Chinese))
- [38] Duracrete R17, Final technical report-general guidelines for durability design and redesign[S]. Lyngby: 2000.
- [39] Fib Bulletin 34, Model code for service life design[S]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete(fib), 2006.
- [40] NT build 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments[S]. Denmark: NORDTEST, 1992.
- [41] ASTM C1202-12, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration [S]. Pennsylvania: ASTM Committee C09, 2012.
- [42] AASHTO T277-15, Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration [S]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.
- [43] FIP Report, Recommendations for the design, and construction of concrete sea structures(4th Edition) [S]. London: Thomas Telford Ltd., 1985.