

T/CWDPA

中国西部开发促进会团体标准

T/CWDPA XXXX—2026

海洋工程混凝土结构耐久性设计与维护技术规范

Technical specifications for durability design and maintenance of marine engineering
concrete structures

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 基本规定 2

5 材料 4

6 配合比设计 9

7 维护与修复 13

参考文献 16

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由台州学院提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：台州学院、浙江大学、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、浙江方远新材料股份有限公司、台州东部建材科技有限公司、方远建设集团股份有限公司。

本文件主要起草人：何海杰、何闯、王家成、李公强、申士杰、宋俊楠、杜鹏、胡杰、王韶伊、陈羲、钟林谚、高立旦、洪振阳、葛威、叶建丰、李云国、陶海冰。

海洋工程混凝土结构耐久性设计与维护技术规范

1 范围

本文件规定了海洋工程混凝土材料与结构耐久性的基本规定、材料、配合比设计、维护与修复。
本文件适用于海洋环境作用下各类海洋工程混凝土材料与结构耐久性设计、施工及维护。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 175 通用硅酸盐水泥
GBZ/T 240.2 化学品毒理学评价程序和试验方法 第2部分：急性经口毒性试验
GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
GB/T 8076 混凝土外加剂
GB/T 14684 建设用砂
GB/T 14685 建设用卵石、碎石
GB 15193.3 食品安全国家标准 急性经口毒性试验
GB/T 18046 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
GB/T 23439 混凝土膨胀剂
GB/T 26748 水泥助磨剂
GB/T 27690 砂浆和混凝土用硅灰
GB/T 31289 海工硅酸盐水泥
GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准
GB/T 50081 混凝土物理力学性能试验方法标准
GB/T 50082 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
GB 50212 建筑防腐蚀工程施工规范
GB/T 50448 水泥基灌浆材料应用技术规范
GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计标准
GB 50496 大体积混凝土施工标准
GB/T 50733 预防混凝土碱骨料反应技术规范
GB 55008 混凝土结构通用规范
JC/T 207 建筑防水沥青嵌缝油膏
JC 475 混凝土防冻剂
JC/T 907 混凝土界面处理剂
JC/T 2553 混凝土抗侵蚀抑制剂
JGJ/T 10 混凝土泵送施工技术规范

JGJ 55 普通混凝土配合比设计规程
JGJ 63 混凝土用水标准
JG/T 264 混凝土裂缝修复灌浆树脂
JGJ/T 322 混凝土中氯离子含量检测技术规程
JG/T 336 混凝土结构修复用聚合物水泥砂浆
JG/T 568 高性能混凝土用骨料
JTS 153 水运工程结构耐久性设计标准
JTS 202 水运工程混凝土施工规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

海洋工程 offshore engineering

应用海洋基础科学和有关技术学科开发利用海洋所形成的一门新兴的综合技术科学,也指开发利用海洋的各种建筑物或其他工程设施和技术措施。

3.2

设计工作年限 design working life

设计规定的结构或构件不需进行大修即可按预定目的使用的年限,也称为设计使用年限。

3.3

人工岛 artificial island

在海中由人工填筑形成的陆域。

3.4

环境作用 environmental action

环境因素对结构或材料性能的影响。

3.5

氯离子扩散系数 chloride diffusion coefficient

描述氯离子在混凝土中迁移速率的参数。

3.6

微生物修复剂 microbial healing agent

基于微生物矿化,用于提升水泥基材料裂缝自修复功能的外加剂。

3.7

纳米改性抗侵蚀防腐剂 nanomaterial-modified anti-erosion and corrosion inhibitors

在混凝土搅拌时加入,具有较高的活性,并经纳米级材料改性,用于抵氯盐、抗硫酸盐、碳酸盐等复合盐类侵蚀的,提高混凝土耐久性(特别是提高混凝土抵抗复合盐类侵蚀的能力)的外加剂。

4 基本规定

4.1 海洋工程混凝土结构应从材料、设计、施工、验收、维护等各环节采取措施保证结构的耐久性。

4.2 海洋工程混凝土结构设计时,应根据工程的使用功能、建造和使用维护成本以及环境影响等因素规定设计工作年限,并应符合表 1 的规定。

表1 设计工作年限

结构类型		设计使用年限/年
海港工程	永久性港口建筑物	≥50
	临时性港口建筑物	5~10
海岸防护工程	永久性结构	≥50
	破坏后损失不严重的斜坡式护岸等非重要建筑物	≥25
	临时性结构	5~10
人工岛工程	特别重要结构，破坏后损失或影响程度巨大	≥100
	重要结构，破坏后损失或影响程度较大	≥50
	比较重要结构，破坏后损失或影响程度一般	≥25

- 4.3 海洋工程混凝土结构的耐久性设计，应根据结构所处的环境类别与环境作用等级以及结构的设计工作年限，确定混凝土材料耐久性的主要技术要求。
- 4.4 海洋工程混凝土结构的几何外形应简洁、平顺，不宜采用突变构造，受雨淋的表面或积水的表面宜做成斜面；易受漂流物撞击或水流冲击异常剧烈的部位，宜采取耐冲击和耐磨损措施。
- 4.5 海洋环境作用下的海洋工程混凝土结构，应根据设计工作年限、海洋环境作用等级、几何外形和暴露条件、环境温度、承载力设计要求、混凝土应力水平、混凝土原材料等开展耐久性设计。
- 4.6 海洋工程混凝土结构应根据结构类型、安全等级及环境条件建立结构使用和维护管理制度。
- 4.7 当海洋工程混凝土结构受到多种环境共同作用时，设计时应分别满足每种环境单独作用下的耐久性要求。
- 4.8 海洋工程混凝土结构的暴露环境类别应按表 2 确定。

表2 暴露环境类别

环境名称		环境类别	腐蚀机理
一般环境		I	正常大气作用引起钢筋锈蚀
冻融环境		II	反复冻融导致混凝土损伤
氯化物环境	海洋氯化物环境	III	氯盐引起钢筋锈蚀
	其他氯化物环境	IV	
化学腐蚀环境		V	硫酸盐等化学物质对混凝土的腐蚀

- 4.9 海洋工程混凝土结构的一般环境、冻融环境和化学腐蚀环境，可根据腐蚀严重程度按 GB/T 50476 确定环境作用等级。
- 4.10 海洋工程混凝土结构的海洋氯化物环境作用等级应根据环境条件按表 4 确定。水下区、大气区、水位变动区、浪溅区等环境条件的确定应符合 JTS 153 的有关规定。

表3 海洋氯化物环境作用等级

环境作用等级	环境条件
III-C	水下区、土中区
III-D	大气区、涨潮岸线300m内的陆上室外环境
III-E	水位变动区
III-F	浪溅区

4.11 对于海洋氯化物环境作用下设计工作年限为 50 年的海洋工程混凝土结构，混凝土的抗氯离子渗透性最高限值应符合表 4 的规定。

表4 混凝土抗氯离子渗透性最高限值

单位为 $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$

环境作用等级	III-C	III-D	III-E	III-F
28 d 龄期混凝土氯离子扩散系数	14	12	10	8

- 4.12 海洋工程混凝土氯离子扩散系数的老化因子的取值范围宜为 0.4~0.6。
- 4.13 施工缝、伸缩缝等连接缝的设置，宜避开局部环境作用不利的部位；当不能避开不利部位时，应采取防护措施。
- 4.14 混凝土构件施工期间使用的吊环、紧固件、连接件等，应在构件安装就位后割除并做表面保护。
- 4.15 埋入混凝土中并长期暴露的金属件应采用耐腐蚀材料和采取防腐蚀措施，并宜与混凝土中钢筋绝缘。
- 4.16 海洋工程混凝土结构的除冰盐、浓缩海水等其他氯化物环境作用等级应根据具体环境条件按表 5 确定。

表5 其他氯化物环境作用等级

环境作用等级	环境条件
IV-C	a) 受除冰盐盐雾轻度作用； b) 四周浸没于含有氯化物的水中； c) 接触较低浓度氯离子水体，且有干湿交替； d) 核电厂海水冷却塔一般防护区
IV-D	a) 受除冰盐水溶液轻度溅射作用； b) 接触较高浓度氯离子水体且有干湿交替； c) 核电厂海水冷却塔标准防护区
IV-E	a) 直接接触除冰盐溶液； b) 受除冰盐水溶液重度溅射或重度盐雾作用； c) 接触高浓度氯离子水体，有干湿交替； d) 核电厂海水冷却塔重点防护区
IV-F	核电厂海水冷却塔加强防护区

- 4.17 混凝土结构在下列情况下应进行耐久性修复与防护：
- a) 已出现耐久性损伤时；
 - b) 经评定不满足耐久性要求时；
 - c) 达到设计使用年限拟继续使用，经评定需要修复时；
 - d) 对混凝土耐久性有特殊要求或需要加强耐久性措施时；
 - e) 进行维修改造、用途改变及使用环境发生重要改变，对耐久性不利时。

5 材料

5.1 一般规定

5.1.1 海洋工程混凝土结构应根据结构所处的环境类别、环境作用等级和结构设计工作年限选择混凝土性能指标和防腐蚀材料。

5.1.2 海洋工程混凝土结构应控制原材料中的有害成分含量对混凝土强度、耐久性及体积稳定性等产生不利影响。

5.1.3 对于设计工作年限为 50 年及以上的海洋工程混凝土结构,其所处环境作用等级为 E 级及以上的重要构件宜采用高性能混凝土和必要的附加防腐蚀措施。

5.1.4 当海洋工程混凝土结构采用新型混凝土材料或防腐蚀材料时,应经专门技术论证后选用。

5.1.5 对于因形状复杂或钢筋密集导致浇捣困难的海洋工程混凝土结构,以及对施工噪声有特殊要求的海洋工程混凝土结构,宜采用自密实混凝土。

5.1.6 对于有超高力学性能、耐久性能、韧性和抗冲击等要求的海洋工程混凝土结构,可采取超高性能混凝土,且应采用不受海水腐蚀的纤维。

5.2 混凝土材料

5.2.1 海洋工程混凝土用水泥应符合下列规定:

- a) 宜选用符合 GB 175 或 GB/T 31289 规定的水泥;
- b) 有抗冻要求的混凝土宜采用普通硅酸盐水泥或硅酸盐水泥,不宜采用火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥;
- c) 大体积混凝土采用的水泥,其 3 d 水化热不宜大于 250 kJ/kg,7 d 水化热不宜大于 280 kJ/kg;当选用 52.5 强度等级的水泥时,其 7 d 水化热不宜大于 300 kJ/kg。

5.2.2 海洋工程混凝土用细骨料应符合下列规定:

- a) 选用符合 GB 55008 和 GB/T 14684 规定的细骨料;高性能混凝土用细骨料符合 JG/T 568 的规定;
- b) 当采用的细骨料具有碱活性及潜在碱活性时,采取抑制碱骨料反应的措施,并验证抑制措施的有效性。

5.2.3 海洋工程混凝土用粗骨料应符合下列规定:

- a) 选用符合 GB 55008 和 GB/T 14685 规定的粗骨料;高性能混凝土用粗骨料符合 JG/T 568 的规定;
- b) 粗骨料最大公称粒径不超过构件截面最小尺寸的 1/4 和钢筋最小净距的 3/4,不宜大于混凝土保护层厚度的 2/3;
- c) 有抗冻要求的混凝土宜选用连续级配的粗骨料,并进行坚固性试验;
- d) 当采用的粗骨料具有碱活性及潜在碱活性时,应采取抑制碱骨料反应的措施,并验证抑制措施的有效性。

5.2.4 混凝土拌和用水应符合 JGJ 63 的有关规定。

5.2.5 海洋工程混凝土用粉煤灰应符合下列规定:

- a) 符合 GB/T 1596 的有关规定;
- b) 对于钢筋混凝土和 C30 及以上的素混凝土,采用 I 级或 II 级粉煤灰;
- c) 对于高性能混凝土和预应力混凝土,采用 I 级粉煤灰或烧失量不大于 5%、需水量比不大于 100% 的 II 级粉煤灰;
- d) 对于有抗冻要求的混凝土,可采用 I 级或 II 级粉煤灰。

5.2.6 海洋工程混凝土用粒化高炉矿渣粉应符合下列规定:

- a) 符合 GB/T 18046 的有关规定；
- b) 宜采用 S95 级及以上级别的粒化高炉矿渣粉；
- c) 大体积混凝土用粒化高炉矿渣粉的比表面积不宜大于 $450 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。

5.2.7 海洋工程混凝土用硅灰应符合 GB/T 27690 的规定，且硅灰的 SiO_2 含量应不小于 90%，氯离子含量应不大于 0.02%。

5.2.8 海洋工程混凝土用外加剂应符合下列规定：

- a) 根据 GB/T 8076、GB 50119、GB/T 23439 和 JC 475 的有关规定选用；
- b) 外加剂中的氯离子含量占胶凝材料质量百分比不宜大于 0.02%，高性能混凝土宜采用与胶凝材料匹配性好、减水率不小于 25% 的高效减水剂。

5.3 防腐蚀材料

5.3.1 海洋工程混凝土用表面涂层的设计保护年限不宜低于 10 年，并应符合下列规定。

- a) 混凝土表面涂层保护范围应根据 JTS 153 的规定划分表干区和表湿区；
- b) 涂料性能符合下列规定：
 - 1) 具有良好的耐碱性和耐腐蚀性，底层涂料具有良好的渗透能力，面层涂料具有良好的耐老化性能；
 - 2) 表湿区涂料具有湿固化、耐磨损和耐冲击性能。
- c) 混凝土表面涂层体系符合下列规定：
 - 1) 涂层体系可由底层、中间层和面层或底层和面层涂料组成，配套涂料之间具有良好的相容性；
 - 2) 涂层体系根据设计保护年限和结构所处环境条件确定；
 - 3) 混凝土表面涂层体系性能符合表 6 的规定。

表6 混凝土表面涂层体系性能指标

项目		指标
涂层耐老化性（按小时计）/h	设计保护年限 10 年	$\geq 1\,000$
	设计保护年限 20 年	$\geq 2\,000$
涂层耐冲击性/（ $\text{kg} \cdot \text{cm}$ ）		≥ 50
涂层抗氯离子渗透性/[$\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$]		$\leq 5.0 \times 10^{-3}$
涂层粘结强度/MPa		≥ 1.5
涂层耐碱性		合格
涂层外观质量		合格

5.3.2 海洋工程混凝土用硅烷浸渍保护的设计保护年限宜为 15 年～20 年，并符合下列规定：

- a) 混凝土硅烷浸渍宜采用异辛基三乙氧基膏状硅烷或异丁基三乙氧基液体硅烷，硅烷性能指标应符合表 7 的规定，其检测方法应符合 JTS 153 的规定；

表7 硅烷性能指标

项目	异辛基三乙氧基膏状硅烷	异丁基三乙氧基液体硅烷
硅烷含量/%	≥80	≥98
硅氧烷含量/%	≤0.3	≤0.3
氯离子含量/%	≤0.01	≤0.01

b) 混凝土硅烷浸渍保护性能指标应符合表 8 的规定，其检测方法应符合 JTS 153 的规定。

表8 混凝土硅烷浸渍保护性能指标

项目	普通混凝土	高性能混凝土
吸水率/ (mm/min ^{1/2})	≤0.01	≤0.01
渗透深度/mm	≥3	≥2
氯化物吸收量降低效果/%	≥90	≥90

5.3.3 混凝土抗侵蚀宜采用混凝土抗侵蚀抑制剂或混凝土抗侵蚀增强剂，并应符合下列规定：

- a) 混凝土抗侵蚀抑制剂符合 JC/T 2553 的有关规定，其游离铵根离子含量不大于 100 mg/L，掺混凝土抗侵蚀抑制剂的混凝土 30 min 吸水率不大于 1.2%，氯离子渗透系数比不大于 100%，盐水浸烘环境中钢筋腐蚀面积百分率的减少不小于 50%；
- b) 混凝土抗侵蚀增强剂的主要技术性能符合表 9 的规定。

表9 混凝土抗侵蚀增强剂主要技术性能指标

项目		指标
氧化镁含量/%		≤5
氯离子含量/%		≤0.05
碱含量		有要求时由供需双方协商确定
比表面积/ (kg/m ²)		≥300
凝结时间/min	初凝	≥45
	终凝	<600
抗压强度比/%	7 d	≥90
	28 d	≥100
膨胀率/%	7 d	≥0.05
	28 d	≤0.6
氯离子渗透系数比	28 d	≤85

5.3.4 纳米改性抗侵蚀防腐剂的某些组分在粉磨时加入的助磨剂应符合 GB/T 26748 的规定，助磨剂加入量应不大于原材料质量的 0.03%。

5.3.5 纳米改性抗侵蚀防腐剂的技术指标应符合表 10 的规定。

表10 纳米改性抗侵蚀防腐剂技术指标

项 目			指 标
化学成分	氯离子/%		≤0.1
	三氧化硫/%		≤3.0
	碱含量/%		≤5.0
物理性能	含水率/%		≤1.0
	需水量比/%		≤105
	抗压强度比/%	7 d	≥90
		28 d	≥105
	凝结时间/min	初凝	≥45
		终凝	≤600
	细度/%	0.045 筛余	≤10
抗侵蚀性	抗蚀系数/K		≥0.90
	氯离子扩散系数比（28 d）		≤0.85
抗硫酸盐等级			KS150 以上
氯离子迁移系数/（m ² /s）			≤1.0×10 ⁻¹²
放射性	I _{Ra} ； I _r		<0.5
重金属离子释放量/（mg/kg）			≤1.5
注：纳米改性抗侵蚀防腐剂的碱含量按 Na ₂ O+0.658K ₂ O 计算值表示。			

5.3.6 纳米改性抗侵蚀防腐剂的掺量应为胶凝材料总量的 4%。

5.4 其他材料

5.4.1 预应力混凝土孔道灌浆材料应采用强度等级为 42.5 级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥配制，其中矿物掺合料宜采用 I 级粉煤灰、粒化高炉矿渣粉或硅灰，膨胀剂宜采用钙矾石系或复合膨胀剂，外加剂中不应含有氯盐、亚硝酸盐或其他对预应力筋有腐蚀作用的成分。灌浆材料中氯离子含量应不超过胶凝材料质量的 0.06%，其抗渗性能应不低于预应力混凝土的耐久性要求。

5.4.2 人工岛、岛礁工程混凝土用珊瑚骨料应符合下列规定：

- 珊瑚骨料可适用于强度等级不大于 C40 的素混凝土；
- 珊瑚粗骨料和珊瑚细骨料的颗粒级配宜符合 GB/T 14685 和 GB/T 14684 的规定；
- 珊瑚粗骨料和珊瑚细骨料的性能指标符合表 11 和表 12 的规定；

表11 珊瑚粗骨料性能指标

项目	指标
表观密度/ (kg/m^3)	≥ 1600
松散堆积密度/ (kg/m^3)	≥ 850
筒压强度/MPa	≥ 1.5
吸水率/%	≤ 15
含泥量（按质量计）/%	≤ 1.0
泥块含量（按质量计）/%	≤ 0.5
硫化物及硫酸盐含量（折算为 SO_3 ，按质量计）/%	≤ 1.0
有机物含量（比色法）	合格

表12 珊瑚细骨料性能指标

项目		指标
表观密度/ (kg/m ³)		≥1 600
松散堆积密度/ (kg/m ³)		≥850
吸水率/%		≤10
微粉含量/%	亚甲蓝 (MB) 值≤1.4	≤10
	亚甲蓝 (MB) 值>1.4	≤5
泥块含量 (按质量计) /%		≤0.5
硫化物及硫酸盐含量 (折算为 SO ₃ , 按质量计) /%		≤1.0
有机物含量 (比色法)		合格

d) 珊瑚骨料应进行碱活性检验, 并应符合 GB/T 14684 和 GB/T 14685 的有关规定, 骨料具有潜在碱活性时应控制混凝土总碱含量小于 3.0 kg/m, 并采取其他抑制碱骨料反应的措施。

5.4.3 微生物修复剂中微生物菌粉不应采用经基因工程改造的菌种。

5.4.4 微生物应安全, 毒性检验结论应为实际无毒, 急性毒性剂量 (LD₅₀) 应大于 5 000 mg/kg 体重。微生物修复剂毒性测试方法按 GBZ/T 240.2 的有关规定执行, 急性毒性剂量试验按 GB 15193.3 的有关规定执行。

6 配合比设计

6.1 海洋工程混凝土配合比设计应满足混凝土的拌合物性能、力学性能、长期性能和耐久性能的设计要求, 试验方法应符合 GB/T 50080、GB/T 50081 和 GB/T 50082 的规定。

6.2 海洋工程混凝土拌合物中氯离子含量的最高限值应符合表 13 的规定, 其测试方法应符合 JGJ/T 322 中混凝土拌合物中氯离子含量的快速测定方法的规定。

表13 混凝土拌合物中氯离子含量的最高限值

类型	最高限值
预应力混凝土	0.06%
钢筋混凝土	0.10%
素混凝土	1.30%

6.3 混凝土中最大碱含量不宜超过 3.0 kg/m³。对于有预防混凝土碱骨料反应设计要求的混凝土结构, 应符合 GB/T 50733 的有关规定。

6.4 海洋工程混凝土单位体积的胶凝材料用量应符合表 14 的规定, 并进行试拌调整。在拌合物性能和硬化性能指标均满足的情况下, 宜取经济合理的胶凝材料用量。

表14 单位体积混凝土的胶凝材料用量

混凝土强度等级	最大水胶比	最小胶凝材料用量/ (kg/m ³)	最大胶凝材料用量/ (kg/m ³)
C25	0.60	260	400
C30	0.55	280	400
C35	0.50	300	400
C40	0.45	320	450
C45	0.40	340	450
C50	0.36	360	480
≥C50	0.36	380	500

6.5 当采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥时，海洋工程混凝土中矿物掺合料的最大掺量宜符合表 15 的规定；对于 C 类粉煤灰掺量大于 30% 的混凝土，应以实际使用的水泥和粉煤灰掺量进行安定性检验；当选用的矿物掺合料掺量超过表 15 规定的限值时，应事先通过专门的分析研究和试验论证。

表15 混凝土中矿物掺合料的最大掺量

矿物掺合料种类	P • I和P • II型硅酸盐水泥/%	P • O型普通硅酸盐水泥/%
粉煤灰	25~40	20~35
粒化高炉矿渣粉	50~80	25~40
复合掺合料	≤70	≤70

6.6 对于强度等级不大于 C50 且采用普通硅酸盐水泥或硅酸盐水泥的复掺粉煤灰和粒化高炉矿渣粉的海岸工程混凝土，可按下列步骤确定混凝土配合比参数：

- 根据承载能力设计要求确定混凝土的设计强度等级，按本文件 6.7、6.8 的规定确定混凝土强度配制值；
- 按本文件 6.9、6.10 的规定确定混凝土的氯离子扩散系数配制值；
- 根据 a) 确定的混凝土的设计强度等级确定水泥强度等级，结合当地的原材料情况确定水泥类型、粗骨料类别和粒径范围以及外加剂，并应符合本文件规定；
- 按本文件 6.11 或 6.12 确定每立方米混凝土的用水量、水泥用量、粗骨料用量、细骨料用量和矿物掺合料用量，并应符合本文件 6.4 的规定。

6.7 当混凝土的设计强度等级小于 C60 时，海洋工程混凝土的强度配制值按公式（1）确定；当混凝土的设计强度等级不小于 C60 时，混凝土强度配制值按公式（2）确定。

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} + 1.645\sigma_f \dots\dots\dots (1)$$

$$f_{cu,0} \geq 1.15f_{cu,k} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$f_{cu,0}$ ——混凝土强度配制值，单位为兆帕（MPa）；
 $f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值，单位为兆帕（MPa），取混凝土的设计强度等级值；
 σ_f ——混凝土强度标准差，单位为兆帕（MPa）。

6.8 海洋工程混凝土的强度标准差应符合下列规定：

- 当施工单位有近期混凝土强度统计资料时，可按公式（3）计算：

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N f_{cu,i}^2 - N \cdot m_{fu}^2}{N-1}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 $f_{cu,i}$ ——第 i 组的试件强度，单位为兆帕（MPa）；
 N ——试件组数，不宜小于 30；
 m_{fu} ——组试件的强度平均值，单位为兆帕（MPa）。

- b) 对于强度等级小于等于 C30 的混凝土，当混凝土强度标准差计算值大于等于 3.0 MPa 时，按公式（3）的计算结果取值；当混凝土强度标准差计算值小于 3.0 MPa 时，应取 3.0 MPa；对于强度等级为 C35~C55 的混凝土，当混凝土强度标准差计算值大于等于 4.0 MPa 时，应按公式（3）的计算结果取值；当混凝土强度标准差计算值小于 4.0 MPa 时，应取 4.0 MPa；
- c) 当缺少近 1 个月~3 个月的同一品种、同一强度等级的混凝土强度统计资料时，混凝土强度的标准差可按表 16 的规定取值。

表16 混凝土强度的标准差

混凝土强度的标准差	混凝土强度/MPa		
	≤C20	C25~C45	C50、C55
of	4.0	5.0	6.0

6.9 当氯离子扩散系数的标准差确定时, 海岸工程混凝土的氯离子扩散系数配制值应按公式(4)确定:

$$D_{RCM,P} = D_{RCM,28} - 1.645\sigma_D \dots\dots\dots (4)$$

式中：
 $D_{RCM,P}$ ——氯离子扩散系数配制值，单位为 $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 或 mm^2/a ；
 $D_{RCM,28}$ ——基于快速电迁移法测试的 28 d 龄期混凝土的氯离子扩散系数，单位为 $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 或 mm^2/a ；
 σ_D ——氯离子扩散系数的标准差。

6.10 当氯离子扩散系数的变异系数无法确定时, 海岸工程混凝土的氯离子扩散系数配制值可按公式(5)确定:

$$D_{RCM,p} = \frac{D_{RCM,28}}{1+1.645\delta_D} = \begin{cases} 0.802D_{RCM,28} & \delta_D = 0.15 \\ 0.752D_{RCM,28} & \delta_D = 0.20 \dots\dots\dots (5) \\ 0.670D_{RCM,28} & \delta_D = 0.30 \end{cases}$$

式中：
 δ_D ——氯离子扩散系数的变异系数。

6.11 当采用浆骨比法时, 每立方米混凝土的用水量、水泥用量、矿物掺合料用量、粗骨料用量和细骨料用量可分别按公式（6）~（10）计算:

$$m_{w0} = \frac{(1-0.01\alpha)R_{W/B}}{(1+\frac{1}{R_{P/A}})(\frac{R_{P/A}}{\rho_w} + \frac{1-\beta_f}{\rho_e} + \frac{\beta_f}{\rho_f})} \dots\dots\dots (6)$$

$$m_{c0} = \frac{m_{w0}}{R_{W/B}(\frac{1}{1-\beta_f})} \dots\dots\dots (7)$$

$$m_{f0} = \frac{m_{c0}}{\frac{1}{\beta_f}-1} \dots\dots\dots (8)$$

$$m_{g0} = \left\{ \frac{\frac{1}{R_{P/A}} \left[\frac{R_{W/B}}{\rho_w(1-\beta_f)} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{\beta_f}{(1-\beta_f)\rho_f} \right]}{\frac{1}{\rho_g} + \frac{\beta_s}{(1-\beta_s)\rho_s}} \right\} \cdot m_{c0} \dots\dots\dots (9)$$

$$m_{s0} = \frac{\beta_s}{1-\beta_s} \cdot m_{g0} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$R_{W/B}$ ——水胶比;

$R_{P/A}$ ——混凝土浆体和骨料的体积比,取值范围宜为 33: 67~35: 65;

α ——混凝土的含气量百分数,在不使用引气剂或引气型外加剂时, α 可取 100%;

m_{w0} ——计算配合比每立方米混凝土的用水量,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

m_{c0} ——计算配合比每立方米混凝土的水泥用量,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

m_{f0} ——计算配合比每立方米混凝土的矿物掺合料用量,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

m_{g0} ——计算配合比每立方米混凝土的粗骨料用量,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

m_{s0} ——计算配合比每立方米混凝土的细骨料用量,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

ρ_w ——水的密度,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

ρ_c ——水泥密度,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

ρ_f ——矿物掺合料密度,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

ρ_g ——粗骨料的表观密度,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

ρ_s ——细骨料的表观密度,单位为千克每立方米 (kg/m^3);

β_f ——矿物掺合料掺量,单位为百分号 (%);

β_s ——砂率,单位为百分号 (%).

6.12 当采用质量法或体积法时,可按 JGJ 55 的规定确定每立方米混凝土的用水量、水泥用量、粗骨料用量、细骨料用量和矿物掺合料用量。

6.13 海洋工程泵送混凝土采用的原材料和配合比设计除应符合本文件第 5 章和 6.1~6.12 的规定外,还应符合 JGJ/T 10 的相关规定。

6.14 海洋工程大体积混凝土采用的原材料和配合比设计除应符合本文件第 5 章和 6.1~6.12 的规定外,还应符合 GB 50496 的相关规定。

6.15 有抗冻要求的海洋工程混凝土采用的原材料和配合比设计除应符合本文件第 5 章和 6.1~6.12 的规定外,还应符合 GB/T 50476 的相关规定。

6.16 海洋工程水下混凝土与水下不分散混凝土的配合比设计应符合 JTS 202 的相关规定。

6.17 微生物自修复混凝土采用的原材料和配合比设计除应符合本文件第 5 章和 6.1~6.12 的规定外,还应参照 T/CECS 973 的相关规定选用。

6.18 海洋工程混凝土配合比应根据原材料性能及对混凝土的技术要求进行计算,并经试验试配调整后确定。

6.19 在计算配合比的基础上应进行试拌,计算水胶比宜保持不变,并应通过调整配合比其他参数使混凝土拌合物性能满足设计和施工要求,然后修正计算配合比,提出试拌配合比。

6.20 在试拌配合比的基础上应进行混凝土强度和氯离子扩散系数试验,并应符合下列规定:

- a) 采用三个不同的配合比,其中一个为本文件确定的试拌配合比,另外两个配合比的水胶比宜较试拌配合比分别增加和减少 0.05;对于强度等级为 C60 及以上的高强混凝土,另外两个

配合比的水胶比宜较试拌配合比分别增加和减少 0.02，用水量与试拌配合比相同，砂率可分别增加和减少 1%；

- b) 进行混凝土强度和氯离子扩散系数试验时，拌合物性能满足设计和施工要求，每个配合比至少制作一组试件，并标准养护到 28 d 或设计规定龄期时进行试验。

6.21 配合比调整应符合下列规定：

- a) 根据本文件 6.19 混凝土强度和氯离子扩散系数试验结果，确定同时满足强度和耐久性要求的水胶比、粉煤灰和粒化高炉矿渣粉掺量；
- b) 在试拌配合比的基础上，用水量和外加剂用量根据确定的水胶比作调整；
- c) 胶凝材料用量以用水量除以确定的水胶比计算得出；
- d) 粗骨料和细骨料用量根据用水量和胶凝材料用量进行调整。

7 维护与修复

7.1 一般规定

7.1.1 海洋工程混凝土结构应建立动态维护管理台账和永久性维护技术档案。

7.1.2 海洋工程混凝土结构耐久性维护应包括日常检查、定期评估和适时维修。处于环境作用等级为 E 级及以上的混凝土结构，应在耐久性设计中提出结构使用过程中定期检测要求和维护方案。

7.1.3 混凝土结构耐久性维护制度应以施工结束或施工验收状态为起点，根据使用周期中结构和构件的劣化规律与使用要求，确定合理的维护技术和维护频次。

7.1.4 海洋工程混凝土结构耐久性维护措施应具有连续性和及时性，并应体现预防为主的原则。

7.1.5 冻融损伤修复前应对混凝土进行调查和检测，确定结构冻融损伤程度，并按冻融损伤的程度分为下列两种类型进行修复：

- a) 结构混凝土表面未出现剥落，但出现开裂；
- b) 结构混凝土表面出现剥落或酥松。

7.1.6 裂缝修补前应对裂缝进行详细的调查和检测。因温度变化、结构变形等引起的裂缝，应对结构温度及变形进行控制后，再进行裂缝修补。

7.1.7 混凝土表面修复前，应对缺陷和损伤情况进行调查，并根据缺陷损伤的程度和原因制定修复方案。

7.2 维护

7.2.1 海洋工程混凝土结构耐久性维护应符合下列规定：

- a) 对检查和检测中发现的破损构件及时进行修补；
- b) 对于已经出现劣化且经评估预测其耐久性不满足设计工作年限要求的结构，采取耐久性维护措施。

7.2.2 海洋工程混凝土结构附加防腐蚀措施维护应符合下列规定：

- a) 混凝土表面涂层损坏时及时维修，维修涂料与原涂料相同或相容；
- b) 混凝土结构硅烷浸渍质量中吸水率、渗透深度、氯化物吸收量降低效果任意一项不满足要求时，采取相应措施及时处理；
- c) 外加电流阴极保护防腐蚀系统的装置和运行状态出现异常，或保护电位超出规定范围时，及时查明原因，并采取相应措施；

- d) 对于附加防腐蚀措施损伤严重且经评估通过采取维护措施也难以满足设计工作年限的，进行全面修复或更换措施。

7.2.3 海洋工程混凝土结构出现下列情况时，应采取处理措施：

- a) 混凝土结构或构件的裂缝宽度或挠度超过限值；
- b) 混凝土结构或构件钢筋出现锈胀；
- c) 预应力混凝土构件锚固端的封端混凝土出现裂缝、剥落、渗漏、穿孔、预应力锚具暴露；
- d) 结构混凝土中氯离子含量超标；
- e) 结构发现碱骨料反应迹象；
- f) 偶然事故造成混凝土结构局部较大损坏。

7.3 冻融损伤修复与防护

7.3.1 冻融损伤修复前，应清除受冻损伤混凝土，分别采取裂缝修补、表面修复措施，并宜进行表面防护。

7.3.2 冻融损伤修复后，应在每年的冻融期前、后进行检查，观测和记录混凝土表面新增裂缝数量、宽度、深度及新增损伤部位和损伤特征。

7.3.3 冻融损伤修复材料的选用应符合下列规定：

- a) 当结构混凝土表面未出现剥落但出现开裂时，宜用灌浆材料、修补砂浆和表面防护材料进行修复；
- b) 当结构混凝土表面出现剥落或酥松时，宜采用高性能混凝土、修补砂浆、灌浆材料、表面防护材料及界面处理材料进行修复。

7.3.4 水泥基修复材料应掺用引气剂，修复混凝土的含气量宜符合 GB/T 50476 的有关规定，修复砂浆中含气量宜为 6%~8%。

7.3.5 修复材料的强度应高于基体材料强度。

7.3.6 修复材料的抗冻等级应高于原混凝土抗冻等级，且应满足 GB/T 50476 中相应环境作用等级下的抗冻等级要求；对于易发生冻融损伤的修补部位，宜提高修补材料的抗冻等级。

7.4 裂缝修补与防护

7.4.1 I 类环境作用等级下的混凝土裂缝修补方法可分为表面封闭法、填充密封法、压力灌浆法，宜按表 17 选择。

表17 单位体积混凝土的胶凝材料用量

裂缝类型		裂缝性状	
		活动裂缝	静止裂缝
表面裂缝		表面封闭法、填充密封法	表面封闭法
贯穿裂缝		填充密封法、压力灌浆法	压力灌浆法
其他裂缝	宽度 ≤ 0.3 mm	表面封闭法、填充密封法	表面封闭法
	宽度 > 0.3 mm	填充密封法、压力灌浆法	填充密封法、压力灌浆法

7.4.2 II、III、V 类环境，除应按本文件 7.4.1 选择修补方法外，还应按 GB/T 50476 的有关规定采取特殊防护处理。

7.4.3 混凝土结构裂缝修补材料可分为表面封闭材料、填充密封材料、压力灌浆材料。裂缝修补材料

应能与混凝土基体紧密结合且耐久性良好。

7.4.4 混凝土结构裂缝表面封闭材料可采用环氧胶泥、成膜涂料、渗透性防水剂等材料，并应符合下列规定：

- a) 环氧胶泥宜用于稳定、干燥裂缝的表面封闭；
- b) 成膜涂料宜用于混凝土结构的大面积表面裂缝和微细活动裂缝的封闭；
- c) 渗透性防水剂宜用于微细渗水裂缝迎水面的表面处理。

7.4.5 混凝土结构裂缝填充密封材料可采用环氧胶泥、聚合物水泥砂浆以及沥青油膏等材料，并应符合下列规定：

- a) 环氧胶泥符合 GB 50212 的有关规定；
- b) 聚合物水泥砂浆符合 JG/T 336 的有关规定；
- c) 沥青油膏符合 JC/T 207 的有关规定；
- d) 对于活动性裂缝，采用柔性材料修补，柔性材料可采用有触变性的有机硅酮、聚硫橡胶、改性丙烯酸酯、聚氨酯等嵌缝密封胶。

7.4.6 混凝土结构裂缝压力灌浆材料应符合下列规定：

- a) 当采用环氧树脂、甲基丙烯酸树脂、聚氨酯类等材料时，材料性能符合 JG/T 264 的有关规定；
- b) 当采用水泥基灌浆材料时，材料性能符合 GB/T 50448 的有关规定；
- c) 当采用有补强加固要求的浆液时，浆液固化后的材料抗拉强度高于基体材料的抗拉强度。

7.5 混凝土表面修复与防护

7.5.1 混凝土表面防护应符合下列规定：

- a) 混凝土表面防护在完成结构缺陷与损伤的修复之后进行；
- b) 表面防护可采用憎水浸渍、防护涂层、表面覆盖、保护层替换等方法进行，并满足抗渗性、抗侵蚀性、钢筋防锈性及外观等性能的要求。

7.5.2 混凝土表面修复材料可采用界面处理材料和修补材料，界面处理材料应符合 JC/T 907 的有关规定：

- a) 在环境介质侵蚀作用下，防护材料不发生鼓胀、溶解、脆化和开裂现象；
- b) 防护材料满足结构耐久性防护的要求，根据不同的环境条件和耐久性损伤类型宜分别具有抗碳化、抗渗透、抗氯离子侵蚀、保护钢筋等性能；
- c) 防护材料与混凝土表面粘结牢固。

参 考 文 献

- [1] T/CECS 973—2021 微生物自修复混凝土应用技术规程
-