



T/CECS XXX—2023

---

中国工程建设标准化协会标准

海底交通隧道耐久性设计标准

Standard for Durability Design of Undersea Traffic Tunnels

(征求意见稿)

(在提交反馈意见时，请将知道的相关专利和支持性文件一并附上)

Xxxx 出版社

中国工程建设标准化协会标准

海底交通隧道耐久性设计标准

Standard for Durability Design of Undersea Traffic Tunnels

(征求意见稿)

**T/CECS XXX—2023**

主编单位：中铁第四勘察设计院集团有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：xx 年 xx 月 xx 日

Xxxx 出版社

2023 年·北京

# 中国工程建设标准化协会公告

第 XXX 号

关于公布《海底交通隧道耐久性设计标准》的公告

根据中国工程建设标准化协会“关于印发《2022 年第一批协会标准制订、修订计划》的通知”（建标协字〔2022〕13 号）的要求，由中铁第四勘察设计院集团有限公司等单位编制的《海底交通隧道耐久性设计标准》，经本协会铁道分会组织审查，现批准发布，编号为 T/CECS\*\*-2024，自 2024 年\*月\*日起施行。

中国工程建设标准化协会

XXX 年 XX 月 XX 日

# 前 言

本标准是为统一海底交通隧道耐久性设计的相关技术标准和要求，用于指导采用盾构法、钻爆法、沉管法和明挖法施工的海底交通隧道设计。保障不同交通功能、不同工法修建的海底交通隧道工程的主体结构、防排水系统及内部结构和构件在设计工作年限内能达到预期性能。

本规程共分 9 章，主要技术内容包括：1.总则；2.术语；3.基本规定；4.环境；5.材料；6.盾构法隧道；7.钻爆法隧道；8.沉管法隧道；9.明挖法隧道；10.隧道内部结构及附属构件；11.检测与维修。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会铁道分会归口管理，由中铁第四勘察设计院集团有限公司负责具体技术内容的解释。本标准在使用过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（湖北省武汉市武昌区和平大道 745 号，邮编：430063），并抄送中国工程建设标准化协会铁道分会（北京市海淀区三里河路 9 号，邮政编码：100038），以供修订时参考。

**主编单位：** 中铁第四勘察设计院集团有限公司

**参编单位：** 中交公路规划设计院有限公司

东南大学

江苏苏博特股份有限公司

西南交通大学

燕山大学

大连理工大学

青岛国信建设投资有限公司

山东大学

石家庄铁道大学

中山大学

**主要起草人：**

**主要审查人（按章节顺序排序）：**

# 目录

1 总 则.....	1
2 术语.....	2
3 基本规定.....	4
4 环境.....	6
4.1 一般规定 .....	6
4.2 环境类别和作用等级 .....	6
4.3 一般环境 .....	7
4.4 冻融环境 .....	8
4.5 海洋氯化物环境 .....	9
4.6 除冰盐等其他氯化物环境 .....	11
4.7 化学腐蚀环境 .....	12
5 材料.....	13
5.1 一般规定 .....	13
5.2 混凝土原材料 .....	13
5.3 混凝土 .....	17
5.4 喷射混凝土 .....	21
5.5 钢材 .....	22
5.6 防排水材料 .....	24
6 盾构法隧道.....	26
6.1 一般规定 .....	26
6.2 衬砌结构 .....	26
6.3 管片连接构件 .....	26
6.4 防排水系统 .....	27
6.5 构造与防腐蚀附加措施 .....	28
6.6 施工质量附加要求 .....	30
7 钻爆法隧道.....	32
7.1 一般规定 .....	32
7.2 喷锚衬砌 .....	32
7.3 复合式衬砌 .....	32
7.4 防排水系统 .....	33

7.5 构造与防腐蚀附加措施 .....	33
7.6 施工质量附加要求 .....	34
8 沉管法隧道 .....	35
8.1 一般规定 .....	35
8.2 管节结构 .....	35
8.3 沉管接头 .....	36
8.4 防排水系统 .....	37
8.5 构造与防腐蚀附加措施 .....	39
8.6 施工质量附加要求 .....	41
9 明挖法隧道 .....	43
9.1 一般规定 .....	43
9.2 隧道主体结构 .....	43
9.3 基坑围护结构 .....	43
9.4 防排水系统 .....	44
9.5 构造与防腐附加措施 .....	44
9.6 施工质量附加要求 .....	45
10 隧道内部结构及附属构件 .....	47
11 检测与维修 .....	48
附录 A 阻锈剂快速评价方法 .....	49
附录 B 钢筋混凝土保护层厚度计算方法 .....	51
本技术规程用词说明 .....	59
引用标准名录 .....	60
条文说明 .....	62

## Contents

1 General Provisions .....	1
2 Terms .....	2
3 Basic Requirements.....	4
4 Environments .....	6
4.1 General Requirements .....	6
4.2 Classes and Intensities of Environmental Actions .....	6
4.3 Atmospheric Environment.....	7
4.4 Freeze-thaw Environment.....	8
4.5 Marine Chloride Environment.....	9
4.6 De-icing Salts and Other Chloride Environments .....	11
4.7 Chemical Environment .....	12
5 Materials.....	13
5.1 General Requirements .....	13
5.2 Concrete Raw Materials .....	13
5.3 Concrete.....	17
5.4 Spray Concrete .....	21
5.5 Steels.....	22
5.6 Waterproof and Drainage Materials .....	24
6 Shield Tunnels.....	26
6.1 General Requirements .....	26
6.2 Lining Structure .....	26
6.3 Connection Components of Segment .....	26
6.4 Waterproof and Drainage System .....	27
6.5 Constructions and Additional Measures for Corrosion Protection .....	28
6.6 Additional Requirements for Construction Quality .....	30
7 Drill and Blast Tunnels .....	32
7.1 General Requirements .....	32
7.2 Spray Anchor Lining .....	32
7.3 Composite Lining .....	32
7.4 Waterproof and Drainage System .....	33
7.5 Constructions and Additional Measures for Corrosion Protection .....	33
7.6 Additional Requirements for Construction Quality .....	34
8 Immersed Tunnels.....	35
8.1 General Requirements .....	35

8.2 Pipe Section Structure .....	35
8.3 Immersed Pipe Joints.....	36
8.4 Waterproof and Drainage System .....	37
8.5 Constructions and Additional Measures for Corrosion Protection .....	39
8.6 Additional Requirements for Construction Quality .....	41
9 Cut-and-Cover Tunnels.....	43
9.1 General Requirements .....	43
9.2 Main Structure of Tunnels.....	43
9.3 Foundation Pit Enclosure Structure.....	43
9.4 Waterproof and Drainage System .....	44
9.5 Constructions and Additional Measures for Corrosion Protection .....	44
9.6 Additional Requirements for Construction Quality .....	45
10 Internal Structure and Ancillary Components of the Tunnel.....	47
11 Inspection and Maintenance .....	48
Appendix A Rapid Evaluation Method for Rust Inhibitors .....	49
Appendix B Calculation Method for Thickness of Reinforced Concrete protective Layer .....	51
Explanation of wording in This Technical Specification .....	59
List of Quoted Standards.....	60
Explanation of Provisions .....	62

# 1 总 则

**1.0.1** 为规范海底交通隧道耐久性设计，保证隧道达到规定的设计工作年限，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于采用盾构法、钻爆法、沉管法、明挖法修建的铁路、公路、城市道路、城市轨道交通等以交通功能为主的海底隧道工程耐久性设计。

**1.0.3** 本标准未考虑低周反复荷载和持久荷载引起的结构性能劣化，不适用于轻骨料混凝土、纤维混凝土及其他特种混凝土结构以及工业生产的高温高湿环境、微生物腐蚀环境、电磁环境、高压环境、杂散电流等特殊腐蚀环境下混凝土结构的耐久性设计。

**1.0.4** 本标准的耐久性规定，是使隧道达到设计工作年限并具有规定保证率的最低要求，设计中可根据工程的具体特点与实践经验以及具体的施工条件等适当提高。

**1.0.5** 海底交通隧道耐久性设计，除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术 语

### 2.0.1 结构耐久性 structure durability

在预定的环境作用和正常使用、维护条件下，结构或构件在设计工作年限内保持其适用性和安全性的能力。

### 2.0.2 设计工作年限 design working life

设计规定的结构或构件不需大修即可按预定目的使用的年限。

### 2.0.3 环境作用 environmental action

温、湿度及其变化以及二氧化碳、氧、盐、酸等环境因素对结构或材料性能的影响。

### 2.0.4 混凝土结构 concrete structure

混凝土为主制成的结构，包括素混凝土结构、纤维混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。

### 2.0.5 钢筋的混凝土保护层 concrete cover to reinforcement

混凝土表面到钢筋公称直径外边缘之间的最小距离；对后张法预应力筋，为套管或孔道外边缘到混凝土表面的距离。

### 2.0.6 氯离子扩散系数 chloride diffusion coefficient

表示氯离子在混凝土中从高浓度区向低浓度区扩散速率的参数。

### 2.0.7 隧道主体结构 tunnel main structure

能承受和传递隧道外部水土压力作用，由各连接构件组合而成，维持隧道稳定性和安全性的整体。

### 2.0.8 内部结构 internal structure

隧道内部起支撑、分隔等作用且不影响隧道主体结构安全的结构。

### 2.0.9 可更换构件 replaceable structural member

更换时不影响隧道主体结构安全性的结构构件。

### 2.0.10 隧道内附属部件 accessory component in tunnel

隧道内安装在主体结构或内内部结构上的装饰板、防火板、疏散平台、综合支架等部件。

### 2.0.11 防腐蚀附加措施 additional protective measures

在改善混凝土密实性、增加保护层厚度和利用防排水措施常规手段的

基础上，为进一步提高混凝土结构耐久性所采用的补充措施。

#### **2.0.12 保护年限 protection life**

防腐蚀附加措施能够维持对混凝土或钢筋有效保护的年限。

### 3 基本规定

**3.0.1** 海底交通隧道耐久性设计应包括隧道主体结构、隧道内部结构、防排水系统以及附属部件的耐久性设计。

**3.0.2** 隧道主体结构和内部结构的耐久性设计应包括下列内容：

- 1 确定结构的设计工作年限；
- 2 采用有利于减轻环境作用的结构形式和布置；
- 3 规定结构材料的性能与指标；
- 4 对钢筋混凝土结构，尚应包括：
  - 1) 确定结构的环境类别及其作用等级；
  - 2) 确定钢筋的混凝土保护层厚度；
  - 3) 提出混凝土构件裂缝控制与防排水等构造要求；
  - 4) 针对严重环境作用采取合理的防腐蚀附加措施或多重防护措施；
  - 5) 采用保证耐久性的混凝土成型工艺、提出保护层厚度的施工质量验收要求；
  - 6) 提出结构使用阶段的检测、维护要求。
- 5 对钢结构，尚应包括：
  - 1) 保证工作年限内结构安全的总体方案；
  - 2) 确定钢材牌号；
  - 3) 提出防腐蚀技术方案；
  - 4) 提出使用阶段的检测、维护要求，包括检测与维护必需的构造与设施。

**3.0.3** 隧道防排水系统耐久性设计应包括下列内容：

- 1 确定防排水系统设计工作年限；
- 2 确定防排水材料，并规定材料的性能与指标；
- 3 明确防排水系统的构造设计；
- 4 提出施工质量的控制要求；
- 5 提出使用阶段的检测、维护要求。

**3.0.4** 隧道内附属部件耐久性设计应包括下列内容：

- 1 确定各部件的设计工作年限；
- 2 确定各部件材料及与结构之间连接件的性能与指标；
- 3 提出使用阶段的检测、维护要求。

**3.0.5** 海底交通隧道主体结构设计工作年限应不低于 100 年；内部结构中难更换构件设计工作年限宜为 100 年，易更换构件设计工作年限可为 50 年。对有特殊要求的结构，其设计工作年限可在上述规定的基础上，经过技术经济论证后适当调整。

**3.0.6** 海底交通隧道防排水系统的设计工作年限不应低于隧道主体结构设计工作年限，且其工程防水等级应为一级。

**3.0.7** 隧道内附属部件的设计工作年限宜为 25 年。

**3.0.8** 海底交通隧道的耐久性设计应根据其合理工作年限和所处的环境条件进行。对同一隧道的不同部位，如所处的局部环境条件不同，可分别进行耐久性设计。

**3.0.9** 海底隧道在运营期应进行耐久性监测。

**3.0.10** 海底交通隧道达到设计工作年限后，如需继续使用，应进行全面安全鉴定，必要时应采取补强加固措施，重新确定继续使用年限。

## 4 环境

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 根据本标准规定，混凝土结构的耐久性设计应根据结构所处区域和环境特点，确定环境类别，并根据环境调研结果确定结构构件所处的环境作用等级。

**4.1.2** 当结构和构件受到多种环境共同作用时，应分别满足每种环境类别单独作用下的耐久性要求。

### 4.2 环境类别和作用等级

#### I 混凝土结构

**4.2.1** 混凝土结构所处的环境按其钢筋和混凝土材料的不同腐蚀作用机理分类，环境类别应按表 4.2.1 的规定确定。

表 4.2.1 环境类别

环境类别	名称	劣化机理
I	一般环境	混凝土表层碳化（中性化）引起钢筋锈蚀
II	冻融环境	反复冻融引起混凝土的损伤
III	海洋氯化物环境	海水氯化物引起钢筋锈蚀
IV	除冰盐等其他氯化物环境	氯盐侵蚀引起钢筋锈蚀
V	化学腐蚀环境	硫酸盐和酸类等腐蚀介质与水泥基发生化学反应导致混凝土损伤

**4.2.2** 环境对海底隧道工程混凝土结构的作用程度应采用环境作用等级表达，并按表 4.2.2 的规定进行划分。

表 4.2.2 海底隧道工程混凝土结构环境作用等级

名称	环境类别	A 轻微	B 轻度	C 中度	D 严重	E 非常严重	F 极端严重
一般环境	I	I-A	I-B	I-C	-	-	-

冻融环境	II	-	-	II-C	II-D	II-E	-
海洋氯化物环境	III	-	-	III-C	III-D	III-E	III-F
除冰盐等其他氯化物环境	IV			IV-C	IV-D	IV-E	
化学腐蚀环境	V	-	-	V-C	V-D	V-E	V-F

## II 钢结构

**4.2.3** 海底隧道钢结构所处环境按其对钢材的不同腐蚀作用机理分类，环境类别应按表 4.2.3 的规定执行。

表 4.2.3 钢结构环境类别

环境类别	名称	劣化机理	钢结构部位示例
I	一般大气环境	温度、湿润大气引起钢材锈蚀	隧道内部、低湿度环境中的构件
II	海洋大气环境	高湿度、氯浓度大气引起钢材锈蚀	隧道洞门、敞口段及通风处结构
III	海水高氯环境	高压水、氯化物引起的钢材锈蚀	永久接触海水、海水渗漏区结构
IV	化学腐蚀环境	硫酸盐、氯盐及微生物等腐蚀介质引起钢材锈蚀	土壤深埋区结构

## 4.3 一般环境

### I 混凝土结构

**4.3.1** 一般环境下混凝土结构耐久性设计，应考虑正常大气作用下混凝土碳化引起的钢筋锈蚀。

**4.3.2** 一般环境下混凝土结构的环境作用等级划分应按表 4.3.2 的规定执行。

表 4.3.2 一般环境下混凝土结构的环境作用等级

环境作用等级	环境条件
I-A	干燥环境 ( $0 < RH \leq 20\%$ ); 极湿润环境 ( $80\% < RH < 100\%$ ); 永久的静水浸没环境
I-B	较干燥环境 ( $20\% < RH \leq 40\%$ );

	湿润环境 ( $60\% < RH \leq 80\%$ )
I-C	干湿交替环境; 较湿润环境 ( $40\% < RH \leq 60\%$ )

注：表中 RH 为年平均相对湿度；

**4.3.3** 一般环境下混凝土结构部位划分可按表 4.3.3 的规定执行。

表 4.3.3 一般环境下混凝土结构部位示例

环境作用等级	构件示例
I-A	隧道排水泵房（消防水）； 隧道桩基
I-B	洞身衬砌
I-C	洞门、洞口敞开段结构

## II 钢结构

**4.3.4** 一般大气环境下钢结构耐久性设计，应考虑大气中污染物、腐蚀介质作用下引起的钢材的腐蚀，钢结构环境作用等级划分应按表 4.3.4 的规定执行。

表 4.3.4 一般大气环境下钢结构环境作用等级

腐蚀性等级	腐蚀性	典型环境	
		室内	室外
C1	很低	低湿度和无污染的加热空间	干冷地区，污染非常低且潮湿时间非常短的大气环境
C2	低	湿度和相对湿度变化的不加热空间，低频率半冷凝和低污染	温带地区，低污染 ( $SO_2 \leq 5\mu g/m^3$ ) 大气环境； 干冷地区，潮湿时间短的大气环境
C3	中等	中度频率冷凝和中等污染的生产空间	温带地区，中度污染 ( $5\mu g/m^3 < SO_2 \leq 30\mu g/m^3$ ) 或氯化物有些作用的大气环境； 亚热带和热带地区，低污染大气

## 4.4 冻融环境

**4.4.1** 冻融环境下混凝土结构的耐久性设计，应控制混凝土遭受长期冻融循环作用引起的损伤。

**4.4.2** 长期与水体直接接触并会发生冻融循环的混凝土结构构件，应考虑

冻融作用。

**4.4.3** 冻融环境下混凝土结构的环境作用等级划分应按表 4.4.3 的规定执行。

表 4.4.3 冻融环境的作用等级

环境作用等级	环境条件
II-C	微冻地区的无盐环境； 混凝土高度饱水
	严寒和寒冷地区的无盐环境； 混凝土中度饱水
II-D	严寒和寒冷地区的无盐环境； 混凝土高度饱水
	微冻地区的有盐环境； 混凝土高度饱水
	严寒和寒冷地区的有盐环境； 混凝土中度饱水
II-E	严寒和寒冷地区的有盐环境； 混凝土高度饱水

注：1 冻融环境 按最冷月平均气温划分为微冻地区、寒冷地区和严寒地区，其平均气温分别为：-3℃~2.5℃、-8℃~-3℃和-8℃以下；

2 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；

3 无盐或有盐指冻结的水中是否含有盐类，包括海水中的氯盐、除冰盐和有机类融雪剂或其他盐类。

**4.4.4** 冻融环境下混凝土结构部位划分可按表 4.4.4 的规定执行。

表 4.4.4 冻融环境下混凝土结构部位示例

环境作用等级	构件示例
II-C	微冻地区的隧道洞门、洞口敞开段结构
II-D	无盐环境严寒和寒冷地区隧道洞门、洞口敞开段结构
	有盐环境微冻地区隧道洞门、洞口敞开段结构
	海底隧道受冻融影响的临近洞口段洞身结构
II-F	有盐环境严寒和寒冷地区隧道洞门、洞口敞开段结构

## 4.5 海洋氯化物环境

### I 混凝土结构

**4.5.1** 海洋氯化物环境中配筋混凝土结构的耐久性设计，应控制氯离子引起的钢筋锈蚀。

**4.5.2** 海洋和近海地区接触海水氯化物的配筋混凝土结构构件，应按海洋

氯化物环境进行耐久性设计。

**4.5.3 海洋氯化物环境下混凝土结构的环境作用等级划分应按表 4.5.3 的规定执行。**

**表 4.5.3 海洋氯化物环境下混凝土结构环境作用等级**

环境作用等级	环境条件
III-C	永久浸没于海水或埋于土中
	盐雾影响区：涨潮线以外 300m~1.2km 范围内的陆上环境
III-D	轻度盐雾区：距平均水位 15m 高度以上的海上大气环境
	涨潮岸线以外 100~300m 范围内的陆上环境
III-E	重度盐雾区：距平均水位 15m 高度以内的海上大气环境
	离涨潮岸线 100m 以内的陆上环境
	非炎热地区（年平均温度低于 20°C）的潮汐区和浪溅区
III-F	炎热地区（年平均温度高于 20°C）的潮汐区和浪溅区

注：1. 近海或海洋环境中的水下区、潮汐区、浪溅区和大气区的划分，应符合现行行业标准《水运工程结构防腐施工规范》JTS/T 209 的规定；近海或海洋环境的土中区指海底以下或近海的陆区地下，其地下水体中的盐类成分与海水相近。

2. 轻度盐雾区与重度盐雾区界限的划分，宜根据当地的具体环境和既有工程调查确定。

**4.5.4 海洋氯化物环境下混凝土结构部位划分可按表 4.5.4 的规定执行。**

**表 4.5.4 海洋氯化物环境下混凝土结构部位**

环境作用等级	构件示例
III-C	桩基础、明挖隧道围护结构
	盐雾影响区内的隧道洞门、敞口段结构
III-D	轻度盐雾区内的隧道洞门、敞口段结构
	洞口（新风入口）距离涨潮岸线以外 100~300m 的隧道内部结构、陆域隧道衬砌结构
III-E	重度盐雾区内的隧道洞门、敞口段等结构
	洞口（新风入口）距离涨潮岸线 100m 以内的隧道内部结构、陆域隧道衬砌结构
III-F	海水水体中的隧道洞口、敞口段结构
	海中通风井

**4.5.5 一侧接触海水或含有海水土体、另一侧接触空气的海中或海底隧道钢筋混凝土结构构件，其环境作用等级不宜低于 III-E。**

## II 钢结构

**4.5.6 海洋大气钢结构耐久性设计，应考虑大气中飞来盐量（Cl<sup>-</sup>）及干湿交替作用下引起钢的腐蚀，钢结构环境作用等级划分应按表 4.5.6 的规定执行。**

表 4.5.6 海洋大气环境作用等级

环境作用等级	腐蚀性	飞来盐量 mdd/md <sup>2</sup> d
A	一般	≤0.05
B	高	0.05~0.4
C	很高	≥0.4

注：飞来盐的测试方法应符合现行国际标准《用湿蜡法测定大气氯化物沉淀速率的标准试验方法》ASTM G140-02 的规定。

## 4.6 除冰盐等其他氯化物环境

**4.6.1** 除冰盐等其他氯化物环境中配筋混凝土结构的耐久性设计，应控制氯离子引起的钢筋锈蚀。

**4.6.2** 具有下列环境条件的配筋混凝土结构构件，应按除冰盐等其他氯化物环境进行耐久性设计：

- 1 降雪地区接触除冰盐或盐雾的构件；
- 2 频繁接触含氯盐消毒剂的构件。

**4.6.3** 除冰盐等其他氯化物环境下混凝土结构的环境作用等级划分应按表 4.6.3 的规定执行。

表 4.6.3 除冰盐等其他氯化物环境下混凝土结构环境作用等级

环境作用等级	环境条件
IV-C	受除冰盐盐雾作用； 四周浸没于含氯化物的地下水体； 接触较低浓度氯离子水体（Cl-浓度： 100mg/l~500mg/l），且有干湿交替
	接触较低含量氯离子的盐渍土体（Cl-含量： 150mg/kg~750mg/kg）
IV-D	受除冰盐水溶液直接溅射； 接触较高浓度氯离子水体（Cl-浓度： 500mg/l~5000mg/l），且有干湿交替
	接触较高含量氯离子的盐渍土体（Cl-含量： 750mg/kg~7500mg/kg）
IV-E	直接接触除冰盐溶液； 接触高浓度氯离子水体（Cl-浓度> 5000mg/l），且有干湿交替
	接触高含量氯离子的盐渍土体（Cl-含量> 7500mg/kg）

**4.6.4** 除冰盐等其他氯化物环境下混凝土结构部位划分可按表 4.6.4 的规定执行。

表 4.6.4 除冰盐等其他氯化物环境下混凝土结构部位

环境作用等级	构件示例
--------	------

IV-C	距离隧道入口<1000m 且接触盐雾的混凝土构件
IV-D	隧道洞口敞开段混凝土结构
IV-E	隧道洞口横截沟, 敞开段水沟、路面垫层

## 4.7 化学腐蚀环境

**4.7.1** 化学腐蚀环境下混凝土结构的耐久性设计, 应控制混凝土遭受化学腐蚀性物质长期侵蚀引起的损伤

**4.7.2** 化学腐蚀环境下混凝土结构和钢结构的环境作用等级划分应按表 4.7.2 的规定执行。

表 4.7.2 水、土中硫酸盐和酸类物质环境作用等级

环境作用等级	水中硫酸根离子浓度 $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	土中硫酸根离子浓度 (水溶值) $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	水中镁离子浓度 (mg/L)	水中酸碱度 (pH 值)	水中侵蚀性二氧化碳浓度 (mg/L)
V-C	200-1000	300-1500	300-1000	6.5-5.5	15-30
V-D	1000-4000	1500-6000	1000-3000	5.5-4.5	30-60
V-E	4000-10000	6000-15000	$\geq 3000$	$< 4.5$	60-100
V-F	10000-20000	15000-30000	-	-	-

注: 水体中硫酸根离子  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度测定方法应符合现行行业标准《铁路工程水质分析规程》TB 10104 规定。

**4.7.3** 当有多种化学物质共同作用时, 环境作用等级应按下列原则确定:

- 1 对含有较高浓度氯盐的地下水、土且不存在干湿交替作用时, 可不单独考虑硫酸盐的作用;
- 2 当化学物质的腐蚀作用无叠加效应时, 应取其中最高的环境作用等级;
- 3 当其中有两种及以上化学物质的作用等级相同且可能加重化学腐蚀时, 其环境作用等级应再提高一级。

## 5 材 料

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 海底隧道混凝土结构设计时，除给出混凝土力学性能指标的要求外，还应考虑混凝土结构耐久性需求，进行原材料的选取、性能指标的检评，并应对材料的耐久性能指标提出明确要求。

**5.1.2** 混凝土强度等级应同时满足耐久性和承载能力的要求。

### 5.2 混凝土原材料

**5.2.1** 混凝土原材料中的有害成分含量不得对混凝土强度、耐久性及体积稳定性等产生不利影响。

**5.2.2** 海底隧道工程混凝土用水泥主要控制指标应包括凝结时间、安定性、胶砂强度和氯离子含量。水泥中使用的混合材品种和掺量应在出厂文件中明示。水泥应符合下列规定：

1 混凝土宜选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，并应符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》GB 175 的规定。

2 硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥的细度不宜超过  $350\text{m}^2/\text{kg}$ ；水泥中铝酸三钙（C3A）含量不宜超过 8%。

3 长期处于室内干燥 I-A 环境中的混凝土结构构件，当其钢筋（包括最外侧的箍筋、分布钢筋）的混凝土保护层厚度不超过 20mm 且水胶比大于 0.5 时，无防止碳化措施不应采用矿物掺和料或粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥。长期湿润 I-A 环境中的混凝土结构构件，可采用矿物掺和料，且厚度较大的构件宜采用矿物掺和料混凝土。

4 氯化物环境下不宜使用抗硫酸盐硅酸盐水泥。

5 当环境作用为 V-C 和 V-D 级时，水泥熟料中的铝酸三钙（C3A）含量应分别低于 8% 和 5%；当使用矿物掺和料混凝土时，水泥熟料中的 C3A 含量应分别不大于 10% 和 8%；当环境作用为 V-E 级时，水泥熟料中的 C3A 含量应低于 5%，并应同时掺用矿物掺和料。

6 当环境作用达到 V-F 级及以上时，应根据当地的大气环境和地下水

变动条件，进行专门实验研究和论证后确定水泥的种类和掺和料用量。

7 当混凝土结构所处环境为硫酸盐化学侵蚀环境时，水泥宜选用 C3A 含量小于 5% 的普通硅酸盐水泥；温度低于 15℃ 的硫酸盐环境中，不宜采用含有石灰石粉的水泥。

### 5.2.3 海底隧道工程混凝土用粉煤灰应符合下列规定：

1 混凝土结构宜采用 F 类 I 级或 II 级粉煤灰。I 级粉煤灰的 45μm 方孔筛筛余不宜大于 12%，II 级粉煤灰的筛余量不宜大于 20%。

2 粉煤灰游离 CaO 含量不宜大于 1.0%。

3 对 C50 以下混凝土，粉煤灰烧失量不宜大于 8.0%，需水量比不宜大于 105%；对 C50 及以上混凝土，粉煤灰烧失量不宜大于 5.0%，需水量比不宜大于 95%。

4 用于配制处于硫酸盐侵蚀环境中的混凝土或大体积混凝土时，粉煤灰的氧化钙含量应低于 10%。当环境作用超过 V-E 级时，不应使用高钙粉煤灰(CaO 含量大于 8%或游离 CaO 含量大于 1%)。

5 冻融环境下用于引气混凝土的粉煤灰掺和料，其烧失量不应大于 5%，同时粉煤灰掺量不宜超过 30%。

6 粉煤灰其他相关技术指标应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596 的规定。

### 5.2.4 海底隧道工程混凝土用粒化高炉矿渣粉应符合下列规定：

1 宜采用 S95 级及以上级别矿渣粉。

2 高炉矿渣粉的比表面积宜为 350~450m<sup>2</sup>/kg，需水量比不宜大于 100%，烧失量不应大于 3%。

3 高炉矿渣粉 SO<sub>3</sub> 含量不宜大于 4.0%。

3 磨细高炉矿渣 7d 活性指数不宜低于 75%，28d 活性指数不宜低于 95%。

4 其他性能应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046 的规定。

### 5.2.5 海底隧道工程混凝土用硅灰应符合下列规定

1 硅灰应满足比表面积大于 18000m<sup>2</sup>/kg 的要求，同时二氧化硅含量不小于 85%。

2 硅灰烧失量不应高于 6.0%。

3 硅灰宜用于配制高强、高耐久或高耐磨混凝土，一般应与其它矿

物掺和料复合使用，不宜在大体积混凝土中使用。

4 硅灰应符合现行国家标准《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 的规定。

**5.2.6** 当采用其他矿物掺合料时，其性能除应符合现行国家标准《矿物掺合料应用技术规范》GB/T 51003 的规定外，尚应通过试验验证，确定混凝土性能满足设计要求后方可使用。

**5.2.7** 混凝土用细骨料应符合下列规定：

1 宜选用质地坚硬、级配良好、粒径合格、吸水率低、颗粒洁净、有害杂质含量少、无碱活性的粗、细集料。

2 细骨料应选用坚硬耐久的中砂，细度模数宜为 2.5~3.0。

3 细骨料坚固性指标应不大于 8%；细骨料的含泥量和泥块含量分别不应大于 2.0%和 0.5%；细骨料云母含量和轻物质含量均不应大于 0.5%。

4 处于冻融环境和干湿交替环境中的混凝土，细骨料的含泥量应 1.0%；对处于氯化物环境(D 级或以上)中的混凝土，不宜使用母体岩石渗透率高的骨料。

5 机制砂应按石粉的亚甲蓝值指标和石粉的流动比指标控制石粉含量。

6 钢筋混凝土用砂的氯离子含量不应大于 0.03%，预应力混凝土用砂的氯离子含量不应大于 0.01%。

7 承受硫酸盐侵蚀作用的混凝土，应严格控制细骨料中三氧化硫的含量不高于 0.4%。

8 细骨料其他性能及试验方法应符合现行国家标准《建设用砂》GB/T 14684 的规定。

**5.2.8** 混凝土用粗骨料应符合下列规定：

1 粗骨料应选用连续级配的碎石或卵石。粗骨料中含泥量和泥块含量分别不应大于 1.0%和 0.5%，坚固性指标不应大于 8%，针片状颗粒含量不应大于 5%。

2 不得采用碱活性粗骨料。

3 粗集料的最大公称粒径不应超过结构最小边尺寸的 1/4 和钢筋最小净距的 3/4；在两层或多层密布钢筋结构中，不应超过钢筋最小净距的 1/2。

4 粗骨料的氯离子含量不应大于 0.02%；

5 处于冻融环境和干湿交替环境中的混凝土，粗骨料的含泥量应低于

0.7%；经受严重冻融循环作用的混凝土，粗骨料的吸水率不宜大于 1.2%，坚固性试验失重率应小于 5%。

6 对处于氯化物环境(D 级或以上)中的混凝土，不宜使用母体岩石渗透率高的骨料。

7 粗骨料的公称粒径不应超过结构最小边尺寸的 1/4 和钢筋最小净距的 3/4；在两层或多层密布钢筋结构中，不应超过钢筋最小净距的 1/2。针对不同环境作用，配筋混凝土中的粗骨料最大公称粒径应满足表 5.2.8 的规定。

表 5.2.8 配筋混凝土中骨料的公称粒径 (mm)

混凝土保护层最小厚度(mm)	20	25	30	35	40	45	50	≥60
环境作用	I -A	20	25	30	35	40	40	40
	I -B	10	20	20	20	25	25	35
	I -C, II, V	10	15	20	20	25	25	30
	III, IV	10	15	15	20	20	25	25

8 粗骨料其他性能及试验方法应符合现行国家标准《建设用卵石、碎石》GB/T 14685 的规定。

### 5.2.9 混凝土拌合用水应符合下列规定：

1 混凝土用水应清洁，不应采用污水或 pH 值小于 5 的酸性水，水中的氯离子含量应不大于 500mg/L，硫酸盐含量按  $SO_4^{2-}$  计不大于 600mg/L，严禁采用未经处理的海水拌制钢筋混凝土。

2 混凝土用水中不应含有影响水泥正常凝结与硬化的有害杂质、油脂、糖类及游离酸类等。

3 混凝土拌合用水应控制 pH、硫酸根离子含量、氯离子含量、不溶物含量、可溶物含量，应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

### 5.2.10 混凝土外加剂应符合下列规定。

1 应根据使用目的和混凝土性能、原材料性能、施工条件、配合比等因素，选择适宜外加剂，并通过试验及技术经济比较确定用量。

2 当不同品种外加剂复合使用时，应事先通过试验验证其相容性及对混凝土性能的影响。

3 混凝土应根据要求选用减水剂、引气剂、防冻剂、泵送剂、缓凝剂、膨胀剂等。外加剂的品质应符合现行国家标准《混凝土外加剂》GB 8076 和行业标准《混凝土防冻剂》JC/T 475 的有关规定。

4 各种外加剂中的氯离子总含量不宜大于混凝土中胶凝材料总质量的 0.02%，硫酸钠含量不宜大于减水剂干重的 15%。

5 减水剂宜采用聚羧酸系减水剂，其性能及试验方法应符合现行行业标准《聚羧酸系高性能减水剂》JG/T 223。

6 防冻剂中的氯离子含量不应大于 0.1%。

### 5.3 混凝土

**5.3.1** 现浇混凝土隧道结构或构件，混凝土最低等级强度、最大水胶比和钢筋的保护层最小厚度应符合本标准表 5.3.2 中不同环境下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度规定，预制构件的钢筋保护层厚度可比表中规定减少 5mm。

**5.3.2** 一般环境下不同设计年限钢筋混凝土结构，其混凝土最低强度等级、最大水胶比以及钢筋的保护层最小厚度应符合表 5.3.2 的规定。

表 5.3.2 一般环境下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度

环境作用等级	100 年			50 年（或 60 年）			30 年		
	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度
I-A	C30	0.55	30	C25	0.55	20	C25	0.60	20
I-B	C35	0.50	30	C30	0.55	25	C25	0.60	25
I-C	C40	0.45	40	C35	0.50	30	C30	0.55	30

**5.3.3** 冻融环境下不同设计年限钢筋混凝土结构，其混凝土最低强度等级、最大水胶比以及钢筋的保护层最小厚度应符合表 5.3.3 的规定。

表 5.3.3 冻融环境下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度

环境作用等级	100 年			50 年（或 60 年）			30 年		
	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度
II-C	Ca35	0.50	40	Ca30	0.55	30	Ca30	0.55	25
II-D	Ca40	0.45	45	Ca35	0.50	40	Ca35	0.50	30
II-E	Ca45	0.40	50	Ca40	0.45	45	Ca40	0.45	40

**5.3.4** 冻融下不同设计年限钢筋混凝土结构，混凝土抗冻耐久性指数不应低于表 5.3.4 的规定。

表 5.3.4 混凝土的抗冻耐久性指数 DF (%)

设计使用年限	100年			50年（或60年）			30年		
	高度饱水	中度饱水	含盐环境下冻融	高度饱水	中度饱水	含盐环境下冻融	高度饱水	中度饱水	含盐环境下冻融
严寒地区	80	70	85	70	60	80	65	50	75
寒冷地区	70	60	80	60	50	70	60	45	65
微冻地区	60	60	70	50	45	60	50	40	55

注：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与其初始值E<sub>0</sub>的比值， $DF=100 \times E_1 / E_0$ ；在达到300次循环之前E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， $DF=0.6 \times N / 300 \times 100$ 。

**5.3.5** 海洋氯化物环境下不同设计年限钢筋混凝土结构，其混凝土最低强度等级、最大水胶比以及钢筋的保护层最小厚度应符合表5.3.5的规定。

表5.3.5 海洋氯化物环境下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度

环境作用等级	100年			50年（或60年）			30年		
	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度
III-C	C45	0.40	45	C40	0.42	40	C40	0.42	35
III-D	C45	0.40	55	C40	0.42	50	C40	0.42	45
III-E	C50	0.36	60	C45	0.40	55	C45	0.40	45
III-F	C50	0.36	65	C50	0.36	60	C50	0.36	55

注：预制构件的保护层厚度可比表中规定减小5mm。

**5.3.6** 对于海洋氯化物环境中的重要配筋混凝土结构工程，设计时应提出混凝土的抗氯离子侵入性指标，并应满足表5.3.6的要求。

表5.3.6 海洋氯化物环境下混凝土材料抗氯离子指标

设计使用年限	100年			50年（或60年）			30年		
	III-D	III-E	III-F	III-D	III-E	III-F	III-D	III-E	III-F
氯离子扩散系数 ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )	6	4	4	8	6	5	10	7	5

注：1 混凝土的氯离子扩散系数和电通量应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082的规定；

2 表中规定的氯离子扩散系数D<sub>RCM</sub>，混凝土试样龄期为28天。

**5.3.7** 除冰盐等其他氯化物环境下不同设计年限钢筋混凝土结构，其混凝土最低强度等级、最大水胶比以及钢筋的保护层最小厚度应符合表5.3.7的规定。

表5.3.7 除冰盐等其他氯化物环境下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度

环境作用等级	100年			50年（或60年）			30年		
	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度
IV-C	C45	0.40	45	C40	0.42	40	C40	0.42	35
IV-D	C45	0.40	55	C40	0.42	50	C40	0.42	45
IV-E	C50	0.36	60	C45	0.40	55	C45	0.40	45

**5.3.8** 对于除冰盐等其他氯化物环境中的重要配筋混凝土结构工程，设计时应提出混凝土的抗氯离子侵入性指标，并应满足表 5.3.8 的要求。

表 5.3.8 混凝土抗氯离子侵入性指标

设计使用年限	100年			50年（或60年）			30年		
环境作用等级	III-D	III-E	III-F	III-D	III-E	III-F	III-D	III-E	III-F
氯离子扩散系数 ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )	6	4	4	8	6	5	10	7	5

注：1 混凝土的氯离子扩散系数和电通量应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的规定；

2 表中规定的氯离子扩散系数  $D_{RCM}$ ，混凝土试样龄期为 28 天。

**5.3.9** 化学腐蚀环境下不同设计年限钢筋混凝土结构，其混凝土最低强度等级、最大水胶比以及钢筋的保护层最小厚度应符合表 5.3.9 的规定。

表 5.3.9 化学腐蚀环境下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度

环境作用等级	100年			50年（或60年）			30年		
	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度	最低强度等级	最大水胶比	保护层最小厚度
V-C	C45	0.40	40	C40	0.45	35	C40	0.45	30
V-D	C45	0.40	45	C40	0.40	40	C40	0.40	35
V-E	C50	0.36	50	C45	0.40	45	C45	0.40	35
V-F	C50	0.36	55	C50	0.36	50	C50	0.36	40

**5.3.10** 混凝土的抗硫酸盐性能应按表 5.3.10 中的规定执行。

表 5.3.10 混凝土抗硫酸盐结晶侵蚀性能

环境作用等级	抗硫酸盐结晶破坏等级		
	100年	50年（或60年）	30年
V-D	$\geq \text{KS90}$	$\geq \text{KS60}$	$\geq \text{KS60}$
V-E	$\geq \text{KS120}$	$\geq \text{KS90}$	$\geq \text{KS90}$
V-F	$\geq \text{KS150}$	$\geq \text{KS120}$	$\geq \text{KS120}$

注：1 混凝土抗硫酸盐结晶破坏等级以混凝土抗压强度耐蚀系数下降到不低于 75%时的最大干湿循环次数来确定，并以符号 KS 来表示；

2 混凝土抗硫酸盐结晶干湿循环次数应符合现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 的规定。

**5.3.11** 不同强度等级的混凝土单位体积内凝胶材料用量应符合表 5.3.11 的规定。

表 5.3.11 混凝土胶凝材料用量

强度等级	最小胶凝材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )	最大胶凝材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )
C25	275	400
C30	280	400
C35	300	400
C40	320	450
C45	340	450
C50	360	500
C55	380	550
C60	400	550

**5.3.12** 不同环境类别中的混凝土中矿物掺合料用量宜按表 5.3.12 的规定执行。

表 5.3.12 混凝土中矿物掺合料用量范围

环境类别	水胶比	粉煤灰 (%)	粒化高炉矿渣粉 (%)
一般环境	≤0.4	≤30	≤50
	>0.4	≤20	≤30
冻融环境	≤0.4	≤30	≤40
	>0.4	≤20	≤30
海洋氯化物环境	≤0.4	30~50	50~80
	>0.4	20~40	30~60
除冰盐等其他氯化物环境	≤0.4	30~50	50~80
	>0.4	20~40	30~60
化学腐蚀环境	≤0.4	30~50	40~60
	>0.4	20~40	30~50

注：1 表中用量值为矿物掺合料占胶凝材料质量的百分比；本表规定的掺量是指单掺一种矿物掺和料时的适宜掺量范围。当采用多种矿物掺和料复合掺用时，不同矿物掺和料的掺量可参考本表并经过试验确定。

2 本表规定的矿物掺和料的掺量范围仅限于使用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥的混凝土。

3 对于预应力混凝土结构，粉煤灰的掺量不宜超过 30%

**5.3.13** 钢筋混凝土结构内氯离子总含量不应高于表 5.3.13 规定。

表 5.3.13 混凝土中氯离子的最大含量

环境作用等级	构件类型	
	钢筋混凝土	预应力混凝土

I -A	0.3%	0.06%
I -B	0.2%	
I -C	0.15%	
II -C、II -D、II -E		
III-C、III-D、III-E、III-F	0.1%	
IV-C、IV-D、IV-E	0.1%	
V-C、V-D、V-E、V-F	0.15%	

## 5.4 喷射混凝土

**5.4.1** 海底隧道用喷射混凝土的设计强度等级不应低于 C35，抗渗性能不低于 P8，喷射混凝土力学性能应符合表 5.4.1 的规定

表 5.4.1 喷射混凝土力学性能

混凝土等级	≥C35
1d 抗压强度	≥12MPa
与岩石黏结强度	≥0.8 MPa

**5.4.2** 喷射混凝土的水泥用量不应小于 300kg/m<sup>3</sup>，喷射钢纤维混凝土的胶凝材料用量不宜小于 400kg/ m<sup>3</sup>。

**5.4.3** 采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥时，喷射混凝土矿物掺合料最大掺量宜符合表 5.4.3 的规定。

表 5.4.3 喷射混凝土的矿物掺合料最大掺量

矿物掺合料	最大掺量 (%)	
	硅酸盐水泥	普通硅酸盐水泥
粉煤灰	30	20
粒化高炉矿渣	30	20
硅灰	12	10
复掺	50	40

**5.4.4** 喷射混凝土粗骨料宜采用质地坚硬、级配良好的碎石或卵石，不应使用碱活性骨料；粗骨料粒径不宜大于 16mm，喷射钢纤维混凝土中的粗骨料粒径不宜大于 10mm。

**5.4.5** 喷射混凝土细骨料宜采用中砂或粗砂，细度模数宜大于 2.5。

**5.4.6** 喷射混凝土用速凝剂应满足以下规定

- 1 喷射混凝土应采用无碱速凝剂，速凝剂应与水泥具有良好的适应性，

速凝剂掺量应通过试验确定，且不宜超过胶凝材料质量的 10%。

2 掺速凝剂的水泥净浆初凝时间不宜大于 3min，终凝时间不应大于 12min。掺无碱速凝剂的水泥净浆凝结时间试验方法应按《喷射混凝土应用技术规程》（JGJ/T 372）中的附录 B 执行。

3 掺速凝剂的胶砂试件与不掺速凝剂试件的 28d 抗压强度比不应低于 90%。

4 有预防混凝土碱骨料反应设计要求的工程，喷射混凝土中总碱含量不应大于  $3.0\text{kg/m}^3$ 。

**5.4.7** 海底隧道喷射混凝土抗硫酸盐侵蚀性能应符合本标准中表 5.3.10 的规定。

**5.4.8** 海底隧道喷射混凝土结构应考虑海水溶蚀导致的结构破坏。喷射混凝土抗溶蚀性能应满足表 5.4.8 中“溶蚀等级”的要求。

表 5.4.8 混凝土的溶蚀等级

钙离子有效扩散系数 pDe	溶蚀等级
pDe>12.5	低
11.0<pDe<12.5	中
pDe<11.0	高

## 5.5 钢材

**5.5.1** 海底隧道用钢材的选用，必须满足工程设计强度要求，并满足不同环境下的工作年限要求。

**5.5.2** 海底隧道用钢材的选用，应符合下列规定：

1 钢材在满足强度设计要求下宜优先选用耐腐蚀钢材。

2 一般大气环境下，钢材可选用普通碳素钢、低合金钢等，其他腐蚀环境下钢材必须经过适当表面防腐处理以达到设计工作年限。

3 经表面防腐处理的钢材应进行环境腐蚀试验，可通过盐雾、湿热等加速试验、环境挂片等方法，预测服役寿命期间的腐蚀量或减薄量。

4 经表面防腐处理的钢材应符合现行国家标准《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》GB/T 10125 的规定，采用中性盐雾试验（NSS 试验）法进行加速腐蚀试验，结果满足中性盐雾试验条件下至少 1000 小时不出现红锈的要求。

**5.5.3** 海底隧道用混凝土钢筋应结合工程设计需求，符合现行国家标准

《钢筋混凝土用钢》GB/T 1499 和《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》GB/T 33953 的规定。

#### 5.5.4 海底隧道用紧固连接件的选用应符合下列规定：

紧固连接件用钢在一般大气环境下可选用普通碳素钢、低合金钢等，参照表 5.5.4 规定。钢管片在一般大气环境下可选用普通碳素钢或低合金钢，海洋腐蚀环境（ $mdd \leq 0.05$ ）宜采用 CrNiCu 耐蚀钢，其他环境应采用 NiCuSn 耐蚀钢。

表 5.5.4 海底隧道一般腐蚀环境下紧固连接件用钢

连接件强度等级	材料	标准编号
6.8	20、35	GB/T 699
	20Cr	GB/T 3077
	NHL10	GB/T 43151
8.8	40、45	GB/T 699
	40Cr	GB/T 3077
	ML20MnTiB、ML35CrMo	GB/T 6478
	NHL10	GB/T 43151

#### 5.5.5 海底隧道用钢管片的选用应符合下列规定：

1 钢管片在一般大气环境下可选用普通碳素钢或低合金钢，海洋腐蚀环境（ $mdd \leq 0.05$ ）宜采用 CrNiCu 耐蚀钢其他环境应采用 NiCuSn 耐蚀钢；

2 海底隧道用管片钢在保证工作年限的同时应具有足够的强度及韧性，Q235 级管片钢的力学性能应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 的规定，Q355 级管片钢的力学性能应符合现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。

#### 5.5.6 海底隧道用钢材表面防腐处理方法，从耐久性方面应符合下列规定：

1 经表面防腐处理的钢材应满足本标准第 5.4.3 条的规定。紧固连接件宜对钢材表面进行粉末渗锌、多元合金共渗处理，应符合现行行业标准《钢铁制件粉末渗锌》JB/T 5067，钢管片优先采用环氧树脂封闭或富锌铝防腐漆涂覆；

2 钢材满足强度及耐久性设计需求条件下可采用其他表面防腐处理工艺，如电镀锌、热浸锌、达克罗等；

3 海洋高氯环境及化学腐蚀环境下，钢材应采用多种防腐表面处理工艺，可进行粉末渗锌和电泳处理，应符合现行行业标准《钢铁制件粉末渗锌》JB/T 5067 和《阴极电泳涂装通用技术规范》JB/T 10242 的规定，必要

时还应考虑对特殊部位使用环氧树脂封闭或抗盐碱层涂覆处理；

4 钢材采用表面防腐处理时，其表面防腐层厚度不应小于 70 $\mu\text{m}$ 。

## 5.6 防排水材料

**5.6.1** 海底交通隧道防排水材料的选用应符合如下基本规定：

- 1 材料性能和应与工程使用环境条件相适应；
- 2 每道防水层厚度应满足防水设防的最小厚度要求；
- 3 材料影响环境的物质和有害物质限量应满足要求。

**5.6.2** 高分子类防排水材料应根据其在海底交通隧道中的使用环境条件和工作条件，以及对应的材料老化机理，选择各单项影响因素条件下适用的老化测试方法，进行材料产品的耐久性测试和评定。

1 应进行耐水性测试试验，浸水试验条件不应低于 23 $^{\circ}\text{C}$   $\times$  7d；

2 应进行热老化测试试验，沥青及橡胶类材料的热老化测试试验应按不低于 70 $^{\circ}\text{C}$   $\times$  14d 的条件进行，合成高分子类材料的热老化测试试验应按不低于 80 $^{\circ}\text{C}$   $\times$  14d 的条件进行，试验后材料的低温柔性或低温弯折性温度升高不应超过热老化前标准值 2 $^{\circ}\text{C}$ ；

3 应进行腐蚀性介质耐久性测试试验；

4 密封胶的质量损失率，硅酮不应大于 8%，改性硅酮不应大于 5%，聚氨酯不应大于 7%，聚硫不应大于 5%；

5 止水条带、弹性密封垫、密封圈等橡胶类定型密封材料制品宜开展压缩永久变形测试试验。

**5.6.3** 防排水系统应根据其在海底交通隧道中的使用环境条件和工作条件，以及对应的材料老化机理，选择各单项影响因素条件下适用的老化测试方法，进行细部节点措施的耐久性测试和评定。

1 应进行耐水性测试试验和热老化测试试验，试验条件设置应参照本标准第 5.6.2 条的相关要求。

2 应进行腐蚀性介质耐久性测试试验。

**5.6.4** 海底交通隧道在建设期间采用的围岩灌浆材料，应根据其在隧道围岩的使用环境条件和工作条件，以及对应的材料老化机理，选择各单项影响因素条件下适用的老化测试方法，进行灌浆材料的耐久性测试和评定。

1 应开展灌浆材料结石体的抗氯离子渗透、抗硫酸盐侵蚀的测试试验；

2 必要时可开展碱-骨料反应试验；

3 宜进行海水环境条件下的体积稳定性测试试验。

**5.6.5** 防排水系统宜根据其在海底交通隧道中的使用环境条件和工作条件，以及对应的材料老化机理，选择综合影响因素条件下适用的老化测试方法，积极开展材料和系统的耐久性综合测试和评定。

## 6 盾构法隧道

### 6.1 一般规定

- 6.1.1 海底盾构法隧道断面形状宜为圆形；衬砌结构可采用单层预制管片衬砌，或采用在预制管片衬砌内侧施做二次衬砌的双层衬砌结构。
- 6.1.2 预制钢筋混凝土管片衬砌宜采用外表面防腐蚀附加措施。
- 6.1.3 盾构隧道内管线支架宜采用预埋件的连接方式。
- 6.1.4 盾构隧道内需设置完善的排水系统，将隧道内渗漏水及时引排至集水沟、集水井内，并抽排至隧道外。

### 6.2 衬砌结构

- 6.2.1 盾构隧道管片衬砌宜采用混凝土平板型管片，混凝土抗压强度等级不应低于 C50。
- 6.2.2 盾构隧道双层衬砌的二次衬砌可采用现浇混凝土结构或预制混凝土结构。
- 6.2.3 混凝土管片上若设有预留注浆孔，注浆孔底至外弧面的保护层厚度不宜小于 10cm。
- 6.2.4 盾构法隧道横通道、体外泵房等部位的特殊衬砌环宜采用混凝土管片。

### 6.3 管片连接构件

- 6.3.1 管片连接螺栓或承插式接头等钢质连接件应有良好的耐腐蚀性，可选用不锈钢或耐候钢，当采用耐候钢或普通碳素钢时，表面应采取可靠的防腐措施。
- 6.3.2 钢质连接件防腐涂装前应进行表面预处理，除锈等级和表面粗糙度应符合现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理、表面清洁度的目视评定》GB/T 8923 的规定。
- 6.3.3 钢质预埋件外露部分的防腐涂层应延伸至混凝土内不小于 30mm 的

范围。

**6.3.4** 螺栓防腐层表面应有较高的耐磨性和高硬度，中性盐雾试验至少 1000 小时不出现红锈，湿热试验至少 800 小时不出现红锈。

**6.3.5** 外露的螺栓、螺母、垫片应集合手孔封堵措施进行覆盖保护。隧道水平直径线以下范围的手孔内外露螺栓宜采用速凝混凝土或防腐蚀水泥砂浆填充覆盖；隧道水平直径线以上范围的手孔内外露螺栓宜采用塑料保护罩覆盖，塑料保护罩内应填充速凝水泥、防腐蚀水泥砂浆或发泡聚氨酯。

## 6.4 防排水系统

**6.4.1** 盾构隧道防水设计应包括管片自防水、管片接缝防水和特殊部位防水。

**6.4.2** 管片结构自防水

1 钢筋混凝土管片应采用防水混凝土制作，其抗渗等级不宜小于 P12，氯离子扩散系数不宜大于  $2 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 。

2 钢筋混凝土管片应进行单块检漏试验，管片外表在 0.8Mpa 水压力下，恒压 3h，最大渗水深度不超过 50mm。

**6.4.3** 管片接缝至少应设置一道密封垫。密封垫应符合下列规定：

1 密封垫应在设计最大接缝张开量和最大错位量情况下，在 3 倍埋深水头压力下不渗漏。

2 密封垫耐老化等性能指标要求可符合现行国家标准《高分子防水材料 第 4 部分：盾构法隧道管片用橡胶密封垫》GB 18173.4 的规定。

**6.4.4** 管片嵌缝防水设计

1 嵌缝材料应具有良好的不透水性、粘结性、耐久性、弹性和抗下坠性。

2 嵌缝槽宜采用弹性、刚性或遇水膨胀类密封材料进行嵌缝。

**6.4.5** 特殊部位防水

1 当采用注浆孔注浆时，注浆后应对注浆孔进行密封防水处理。

2 注浆孔及螺栓孔处密封圈应定位准确，并应与密封槽相贴合。

3 隧道与工作井、联络通道等附属构筑物的接缝处，应按设计要求进行防水处理。

**6.4.6** 复合式衬砌的内层衬砌混凝土浇筑前，应将外层管片的渗漏水引排或封堵，内衬浇筑时可将嵌缝处 PE 泡沫条在排水沟上方引出。

**6.4.7** 二次注浆施工后应采用环氧树脂砂浆封堵二次注浆孔并设置密封塞封闭。

## 6.5 构造与防腐蚀附加措施

**6.5.1** 盾构预制管片结构应采取外弧面防腐蚀涂层的附加措施，并添加钢筋阻锈剂。

**6.5.2** 盾构管片混凝土外弧面表面涂层性能应满足下列要求：

1. 除符合国家现行有关标准的规定外，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. 表湿区涂料应具有湿固化、耐磨损和耐冲击性能；
3. 混凝土表面涂层用成膜型涂料的性能应符合现行行业标准《混凝土结构防护用成膜型涂料》JG/T 335 的规定。

**6.5.3** 盾构管片混凝土硅烷浸渍应满足下列要求：

1. 混凝土表面憎水处理适用于盐腐蚀环境混凝土结构表面的防腐蚀保护。对于混凝土结构的水平面宜选用液体渗透型涂料，而对于侧面或仰面宜采用膏体渗透型材料。

2. 憎水处理前进行喷涂试验。试验区面积不宜小于 20m<sup>2</sup>。小区试验合格后，方能进行大面积涂装。涂装施工的防腐蚀材料、施工工艺应与小区试验保持一致。

3. C45 以下(含 C45)的混凝土，渗透深度应不小于 3mm；C45 以上的混凝土渗透深度应不小于 2mm；水灰比为 0.6 的混凝土渗透深度应不小于 10mm。

4. 硅烷浸渍处理后混凝土吸水率平均值应不大于 0.01mm/min<sup>2</sup>；不同时间制备的两批混凝土试件，憎水处理后暴露于碱液的吸水率平均值与未憎水处理的相比应小于 10%；氯化物吸收量的降低效果平均值应不小于 85%。

**6.5.4** 混凝土阻锈剂应符合现行行业标准《钢筋混凝土阻锈剂》JT/T 537 的规定，宜采用的 II 型和 III 型阻锈剂。

**6.5.5** 混凝土阻锈剂的主要技术性能指标见表 6.5.5：

表 6.5.5 钢筋混凝土阻锈剂主要技术性能要求

序号	检测项目		控制指标	
1	匀质性指标	总碱量 (Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O%)	≤1.5	
		氯离子含量 (%)	<0.1	
		硫酸钠含量 (%)	≤1.0	
		均匀性	无沉淀	
2	阻锈性能指标	钢筋的耐盐水浸渍性能	无腐蚀	
		盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比	≤30%	
		盐水浸烘循环下混凝土中钢筋的锈蚀面积百分率比	<5%	
		腐蚀电量比	≤50%	
3	内掺型阻锈剂的混凝土性能指标	混凝土抗压强度比	7d	≥ 95%
			28d	≥ 95%
		混凝土凝结时间差 (min)	初凝	-60~+120
			终凝	-60~+120
		混凝土抗渗性	不降低	

备注：钢筋混凝土阻锈剂主要技术性能要求中密度、总碱量、氯离子含量与硫酸钠含量的测试方法应符合现行国家标准《混凝土外加剂匀质性能试验方法》GB/T 8077的规定；钢筋的耐盐水浸渍性能、盐水浸烘循环下混凝土中钢筋的锈蚀面积百分率比、干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比、混凝土抗压强度比、混凝土凝结时间差、混凝土抗渗性、混凝土渗透深度应符合现行行业标准《钢筋混凝土阻锈剂》JT/T 537的规定。

**6.5.6 盾构管片混凝土添加的钢筋阻锈剂不应影响现场生产混凝土力学性能，其中现场混凝土力学性能应满足表 6.5.6 的规定。**

表 6.5.6 使用钢筋阻锈剂的管片混凝土抗压强度要求

编号	检测项目	控制指标
1	混凝土蒸养脱模后抗压强度比	≥100%
2	混凝土 28d 抗压强度比	≥100%

备注：混凝土抗压强度比指使用阻锈剂混凝土与不使用阻锈剂混凝土抗压强度的比值。其中混凝土采用实际工程使用原材料、配合比成型，按照现场管片生产制度进行蒸养和养护。

**6.5.7 盾构管片混凝土添加的钢筋阻锈剂应具有优异阻锈效果，其中钢筋阻锈性能应满足钢筋阻锈剂快速评价方法锈蚀面积百分率比不大于 20%，其中快速评价方法应符合本标准的附录 A 的规定。**

**6.5.8 使用钢筋阻锈剂应经过试配和适应性试验。内掺型钢筋阻锈剂与其他外加剂联合使用时，应确定该阻锈剂和其它外加剂之间的适应性，并保证钢筋阻锈剂能在混凝土中均匀分布。**

**6.5.9** 钢筋阻锈剂用量一般按照每立方米混凝土的质量计算。阻锈剂用量应根据混凝土结构的环境条件和阻锈剂品种，参考现行国家标准或根据试验确定。

**6.5.10** 钢筋混凝土管片纵向受力钢筋直径不应小于 16mm。

**6.5.11** 当钢筋保护层厚度超过 60mm 时，应适当掺加钢纤维或合成纤维。

## 6.6 施工质量附加要求

**6.6.1** 管片模具需经过三维激光扫描检测后方可投入使用。新购置的模具应进行管片试生产。在试生产的管片中，随机抽取两环或三环进行水平拼装检验，检验合格后方可正式生产。每套模具生产 200 环后必须再次进行水平拼装检验。

**6.6.2** 衬砌环整环水平拼装试验的拼装允许偏差应符合表 6.6.2 的规定。

表 6.6.2 水平拼装尺寸允许偏差

项 目	允许偏差	检查频率
环向缝间隙	≤1.0mm	每环测 6 点
纵向缝间隙	≤1.5mm	每条缝测 3 点
成环后内径	±1.0mm	测 4 条
成环后外径	+3, -1mm	测 4 条
螺栓孔不同轴度	±1.0mm	每个

**6.6.3** 钢筋混凝土管片几何尺寸允许偏差应符合表 6.6.3 的规定。

表 6.6.3 钢筋混凝土管片几何尺寸允许偏差

项 目	允许偏差	检查数量
宽 度	±1.0mm (管片外径<10m) ±0.4mm (管片外径≥10m)	每块测 6 点
弧、弦长	±1mm (封顶块±0.5mm)	每块测 6 点 (内外侧各 3 点)
厚 度	+3/-1mm	每块测 6 点
管片对角线	±1.0mm	每条对角线
环缝面和纵缝面	任意 1m 范围内≤0.2mm 与内外表面的角度偏差≤0.1°	每个端面测 6 点
密封垫沟槽与凹凸榫	半径±1.0mm 至管片边缘的距离±1.0mm 沟槽宽度与深度±1.0mm	每块测 3 点
螺栓孔直径及螺栓孔位置	±1.0mm	每个

螺栓孔及预埋螺帽轴向偏角	$\pm 0.15^\circ$	每个
钢筋保护层厚度	设计要求或-3~+5mm	每块测 8 点 (管片四角和拼接面中部各 1 点)

**6.6.4** 壁后注浆结束后，应及时采用地质雷达或超声波探测法对注浆质量进行检查，对未满足要求的部位，及时进行补充注浆。

**6.6.5** 暴露在隧道混凝土构件外的钢预埋件，其埋入混凝土中的锚固部分应与混凝土构件中的其他钢筋相隔离。

**6.6.6** 盾构进出洞口处，应设置洞口密封止水环，在管片与工作井井壁间应设置现浇钢筋混凝土环梁，在工作井井壁应预埋与后浇环梁连接的钢筋。

**6.6.7** 嵌缝作业应在接缝堵漏和无明显渗水后进行，嵌缝槽表面混凝土有缺损时，应采用聚合物水泥砂浆或特种水泥修补，强度应达到或超过混凝土本体的强度。嵌缝材料嵌填时，应先刷涂基层处理剂。嵌缝应密实、平整。

**6.6.8** 管片预埋螺帽使用前应模拟其工作状态进行抗拔力试验，试验数量不少于 3 个/200 环，最小抗拔力不低于设计要求。

**6.6.9** 二次注浆孔密封塞应进行注水拉拔试验，保证密封塞端头在 1.5 倍埋深水头下不发生渗水和松动。

## 7 钻爆法隧道

### 7.1 一般规定

- 7.1.1 海底钻爆法交通隧道应采用复合式衬砌，辅助坑道可以采用喷锚衬砌。
- 7.1.2 复合式衬砌的初期支护应按隧道主体结构设计。
- 7.1.3 兼做运营服务使用的辅助坑道，应按永久工程进行结构和防排水设计，设计工作年限不应低于 50 年。
- 7.1.4 海底钻爆法隧道平均渗漏水量不宜超过  $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ，具体渗漏水量控制标准可结合环境要求、建设费用和运营排水费用等因素综合比较后确定。

### 7.2 喷锚衬砌

- 7.2.1 用于喷锚衬砌的喷射混凝土抗压强度等级不应低于 C35，厚度不应小于 8cm，并应进行早期强度检测。
- 7.2.2 喷锚衬砌宜采用喷射纤维混凝土，当采用钢筋网喷射混凝土时，钢筋保护层厚度不应小于 30mm。
- 7.2.3 钢质锚杆的杆体、垫板、螺母均应采取防腐措施。
- 7.2.4 作为主体结构的喷锚衬砌，若混凝土抗氯离子渗透性能及保护层厚度等不满足耐久性设计要求，则运营期结构安全性计算时，不应考虑其中钢筋和型钢的承载作用。

### 7.3 复合式衬砌

- 7.3.1 二次衬砌可采用模筑混凝土、纤维混凝土或钢筋混凝土衬砌结构。
- 7.3.2 二次衬砌结构设计应综合考虑结构功能、环境条件、施工条件和建设成本等因素，选择对耐久性有利的结构型式，宜采用圆顺断面型式，减少暴露的表面积和棱角，并有利于施工时混凝土的捣固与养护。
- 7.3.3 二次衬砌拱顶应进行带模充填注浆，以保证初期支护与二次衬砌密

贴。

**7.3.4** 二次衬砌中在施工期临时预埋的吊环、紧固件等钢构件，使用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。

## 7.4 防排水系统

**7.4.1** 海底钻爆法隧道防水系统包括围岩注浆堵水、初期支护自防水、防水板、二次衬砌混凝土自防水以及止水带等；排水系统包括拱墙环向和底部横向盲管（或排水板）、纵向盲管、纵向水沟、横截沟、检查井、集水池、排水泵房等。

**7.4.2** 运营期间无法更换或更换与维修非常困难的防排水结构、材料设计工作年限应与主体结构相同。

**7.4.3** 海底钻爆法隧道拱墙部位防水设计标准为一级防水，即不允许渗水，结构表面无湿渍。混凝土应采用防水混凝土，其二次衬砌抗渗等级不应低于 P12，初期支护抗渗等级不应低于 P8。

**7.4.4** 隧道内集水池的有效容积，可按下列原则确定：

1 隧道内渗漏水集水池有效容积不宜小于排水分区内 8 小时的隧道渗漏水总量。

2 隧道内污水集水池有效容积不应小于排水分区内一次性消防水量。

## 7.5 构造与防腐蚀附加措施

**7.5.1** 钢筋间距应能保证混凝土浇筑均匀、捣实，且不宜小于 150mm，必要时可采用并筋。

**7.5.2** 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。

**7.5.3** 配有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。

**7.5.4** 配置构造钢筋的素混凝土结构，构造筋的混凝土保护层最小厚度不应小于 40mm，且不应小于 2.5 倍构造筋直径。

**7.5.5** 混凝土结构钢筋阻锈方案需结合理论和试验进行验证。

## 7.6 施工质量附加要求

**7.6.1** 宜采用锚杆钻注一体机进行锚杆施工，提高锚杆施工成孔及注浆质量，锚杆质量无损检测应符合现行行业标准《锚杆锚固质量无损检测技术规程》JGJ/T 182 的规定。

**7.6.2** 喷射钢纤维混凝土应进行初始弯曲韧性比和能量吸收比测试，相关要求应符合现行行业标准《钢纤维混凝土结构设计标准》JGJ/T465-2019 的规定，且弯曲韧性比不应该低于 0.6。

**7.6.3** 钢纤维喷射混凝土所用钢纤维现场宜采用机械投料方式均匀、稳定地撒入钢纤维，避免人工随意抛洒，以提高钢纤维喷射混凝土的均匀性及长期稳定性。

**7.6.4** 采用限排型防排水体系的复合式衬砌隧道，在二次衬砌浇筑前应分段对渗漏水量进行监测，平均渗漏水量超标的，应先进行渗漏水处理。

**7.6.5** 施工中需保证盲沟、盲管连接质量，并注意保护，确保排水系统通畅。

## 8 沉管法隧道

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 沉管管节结构类型可采用钢筋混凝土管节或钢壳-混凝土管节,结构类型的选择应考虑结构受力与防水、耐久性要求及可施工性等因素。

**8.1.2** 沉管管节可采用整体式、节段式、半刚性纵向结构形式,纵向结构形式的选择应考虑受力条件、管节长度、结构安全与防水、施工工艺、造价等因素。

**8.1.3** 沉管隧道耐久性设计应结合结构的环境条件、重要程度、管节结构类型及纵向结构形式等方面进行统筹考虑和综合优化,以取得耐久性和经济性的统一。

### 8.2 管节结构

**8.2.1** 管节长度和数量应根据建设边界条件,通过技术经济比较确定,整体式管节长度不宜大于 130m,节段式管节长度不宜大于 180m。

**8.2.2** 整体式管节应符合下列规定:

- 1 管节应沿纵向形成刚性连续整体,管节中间不设置可变形接缝。
- 2 钢筋混凝土管节的后浇带与施工缝应满足结构纵向受力和防水要求;钢壳混凝土管节的钢材焊接质量应满足结构纵向受力和水密性要求。

**8.2.3** 节段式管节应符合下列规定:

1 管节沿纵向由多个节段拼接而成,节段接头应满足受力、变形、防水要求。

2 节段长度宜取 18~25m,应采用全断面浇筑、匹配预制工艺,节段接头相邻混凝土界面应采取隔离措施。

3 施工期应采用临时预应力连接,满足管节移动、浮运、沉放阶段的刚性连续要求,管节沉放完成后在适当时机解除临时预应力。

**8.2.4** 半刚性管节应符合下列规定:

- 1 管节沿纵向由多个节段通过永久纵向预应力串联而成。
- 2 纵向预应力应满足管节与节段接头在浮运沉放期和运营期的受力、

变形和防水要求。纵向预应力的耐久性应满足主体结构的设计使用年限要求。

**8.2.5** 钢筋混凝土管节不应设置贯穿结构内外的金属构件。

**8.2.6** 钢壳混凝土组合结构防腐应采用阴极保护和涂层防腐联合保护或单独采用阴极保护。单独采用阴极保护时，应考虑施工期的防腐蚀措施。

**8.2.7** 当牺牲阳极埋设于海泥中时，应选用适当的阳极材料，并应考虑其驱动电压额电流效率的下降。

### 8.3 沉管接头

**8.3.1** 接头设计应根据纵向结构体系及接头形式、地基及基础处理方案、基底荷载等因素确定，接头类型与构造布置应根据接头抗剪能力、接头张开量等要求确定，接头构造设计应满足接头的水密性、耐久性、抗震性、施工和维护的便利性等要求。

**8.3.2** 管节接头、节段接头及最终接头防水、抗剪、抗震等构造总体布置应合理，且可施工性好，质量易得到保证，并便于检修维护。

**8.3.3** 管节接头宜采用柔性接头，并设置防水措施及限位措施。

**8.3.4** 管节接头钢端壳应成对设计，并应符合下列规定：

1 钢端壳的结构形式应与主体结构相匹配。钢筋混凝土管节的钢端壳可采用 L 型或 H 型等构造，钢壳混凝土管节的钢端壳应采用与主体结构一体化的构造。

2 结构尺寸应满足止水带安装及止水带压缩变形、管节沉放安装误差及后期不均匀沉降的要求。

3 强度和刚度应满足水力压接时外部水土压力荷载及轴向 GINA 反力要求。

4 钢端壳面板的每延米平整度不应大于 2mm，整体平整度不应大于 5mm。

**8.3.5** 管节接头应设置外侧 GINA 止水带与内侧 OMEGA 止水带两道密封止水构造，并宜设置水密性检测装置。

**8.3.6** 节段接头应采用两道及以上防水措施，并应设置水密性检测装置，宜采用可注浆中埋式止水带及内侧 OMEGA 止水带。

**8.3.7** 预应力构造设计应符合下列规定：

- 1 沉放前管节内各节段应采用纵向预应力连接成整体。
- 2 纵向半刚性结构体系应采用永久预应力构造，应采取措施保证满足设计使用年限内预应力系统的耐久性要求。
- 3 纵向柔性结构体系应采用临时预应力构造，节段接头附近应预留钢束切断措施。预应力钢束切断后，应对切断孔进行注浆充填。

**8.3.8** 由于外海环境复杂，最终接头宜优先选用整体预制安装方式，最终接头结构形式选择适配标准管节结构的钢筋砼或钢壳砼。

## 8.4 防排水系统

**8.4.1** 沉管隧道防水应按“结构自防水为主，外防水为辅，接头防水为重点”的原则设计。

**8.4.2** 沉管隧道应根据隧道使用功能、使用要求、结构形式、环境条件、施工条件、材料性能等，针对管节结构防水、接头防水、施工缝防水、最终接头防水等进行综合防水设计。

**8.4.3** 节段式管节结构应采用混凝土自防水；整体式管节结构应以混凝土自防水为主，宜辅助设置全外包防水层。

**8.4.4** 节段式管节宜采用全断面一次浇注成型方式，以保证隧道结构防水效果；整体式管节应在纵横向施工缝处采用可靠、耐久的止水措施；管节预制完成后应进行试漏试验。

**8.4.5** 管节混凝土施工缝防水设计应符合下列规定：

- 1 应根据防水等级、最大水压等确定混凝土施工缝的结构形式、防水材料 & 设置方式。
- 2 混凝土施工缝应涂刷混凝土界面处理剂或水泥基渗透结晶型防水涂料，水平施工缝接缝面应增加水泥砂浆接茬措施。
- 3 混凝土施工缝宜设置预埋注浆管或遇水膨胀止水胶与中埋式钢边橡胶止水带形成双道防水措施。
- 4 钢端壳与混凝土施工缝中宜设置止水钢片、遇水膨胀止水材料、预埋式注浆管形成多道防水线；钢端壳所设防水材料应与混凝土水平施工缝的防水材料形成搭接。

**8.4.6** 管节接头防水应满足水密性、耐久性要求、具有适当的抵抗变形能

力并易于施工和检修，宜优先采用 GINA 橡胶止水带和 OMEGA 橡胶止水带双道防水线。

**8.4.7** 节段接头防水构造应采用双道密封止水，可选用中埋式止水带与 OMEGA 橡胶止水带。

**8.4.8** 管节最终接头采用刚性连接时宜在接缝处设置预埋式注浆管、遇水膨胀止水胶；采用柔性连接时，宜设置中埋式止水带与 OMEGA 橡胶止水带。

**8.4.9** GINA 止水带选型及紧固件设计应符合下列规定：

1 应根据各接头位置所处的最大与最小水深、可能产生的最大变位量、管节横断面面积及抗震设防等级，确定 GINA 止水带断面构造形式、断面尺寸和变形特性等。

2 应根据温度变化、差异沉降、地震工况等发生的变形量，施工安装误差以及 GINA 止水带长期松弛等因素，校核 GINA 止水带水密性的最小压缩量。

3 GINA 止水带的胶料应满足硬度、强度、伸长率及热老化性等物理性能指标的要求。

4 GINA 止水带使用寿命不应小于主体结构设计使用年限。

5 GINA 止水带固定宜采用卡箍或穿孔方式，螺栓和压件等应采取耐久性保护措施。

**8.4.10** OMEGA 止水带选型及紧固件设计应符合下列规定：

1 应根据接头可能承受的水压值、产生的三向位移量等要求进行 OMEGA 止水带选型及断面尺寸确定。

2 OMEGA 止水带的胶料应满足硬度、强度、伸长率及热老化性等物理性能指标的要求。

3 OMEGA 止水带安装后，应进行检漏测试，检漏压力应按可能作用的最大水头压力的 1.2 倍，OMEGA 止水带接头张开量可根据标定的张开量与水压关系曲线，结合水头压力计算。

4 OMEGA 止水带的金属紧固件等应采取防腐蚀措施。

**8.4.11** 节段接头可注浆中埋止水带选型应符合下列规定：

1 应结合节段接头最大水压、温度变化、差异沉降、地震工况等发生的位移量及施工允许偏差等进行选型。

2 应满足设计使用年限内水密性与耐久性的要求。

**8.4.12** 沉管隧道内排水坡度宜与隧道纵坡一致，排水分区宜与沉管隧道纵坡设计综合考虑。隧道内积水可采用一次或分段接力的方式排出洞外，排水分区长度不宜大于 1500m。

**8.4.13** 管节接头、节段接头及沟槽等可能产生蓄水的部位，宜设置排水通道。

## 8.5 构造与防腐蚀附加措施

**8.5.1** 沉管隧道混凝土构件截面几何形状应简单、平顺，结构表面形状应有利于排水。

**8.5.2** 隧道结构施工缝、伸缩装置等的设置宜避开不利的环境作用。

**8.5.3** 对暴露在混凝土构件外的预埋钢筋或钢结构，其埋入混凝土的锚固构件应与混凝土构件中的其他钢筋相隔离。

**8.5.4** 隧道钢结构需设置必要的腐蚀余量，应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的规定。

**8.5.5** 混凝土结构可通过防水浸渍剂、渗透结晶剂、防水涂层等表面涂层改善其抗渗性能，防腐蚀措施设计应符合以下规定：

1 环境作用 D 级以上混凝土结构可采用防渗涂层、改性材料及附加防护层构造等措施，相关措施应符合 6.5.2 和 6.5.3 中的相关规定。

2 环境作用 E 级可采用在混凝土中掺入钢筋阻锈剂、采用牺牲阳极保护等措施，其中阻锈剂应符合 6.5.4 中的规定，外加电流阴极保护系统和牺牲阳极阴极保护系统的设计、安装与调试应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的规定。

3 环境作用 E 级混凝土结构可增设防腐蚀面层，防腐蚀面层应符合 6.5.2 和 6.5.3 中的相关规定。

**8.5.6** 临水的混凝土构件应采取防腐蚀措施，防腐蚀措施宜与管节外包防水体系进行综合考虑，可选用涂层钢筋和耐蚀钢筋、钢筋阻锈剂、混凝土表面处理（表面涂层、防腐面层）、电化学防护等。

**8.5.7** 钢壳混凝土结构宜采用预留腐蚀厚度、防腐涂层和牺牲阳极保护的组合防腐蚀措施。

**8.5.8** 钢壳外壁防腐蚀涂料的选用宜满足下列要求：

1 同一涂装配套中的底、中、面漆宜选用相同性能的产品。

- 2 涂料应符合涂装施工的环境条件。
- 3 应能适应干湿交替变化，并具有耐磨性、耐冲击性能。应能与阴极保护配套，具有较好的耐阴极剥离性和耐海水浸泡性。
- 4 钢壳外壁防腐蚀涂层体系可参照表 8.5.8-1 选用。

表 8.5.8-1 沉管钢壳外壁防腐涂层体系系统

配套涂料名称	单道膜厚(μm)	道数	涂层膜厚(μm)	施工方式	部位
环氧玻璃鳞片涂料	350	2	~700	高压无气喷涂	牺牲阳极保护区
环氧玻璃鳞片涂料	500	3	~1000	高压无气喷涂	沉管底部、远离牺牲阳极保护区

- 5 钢壳外壁防腐蚀涂层性能应符合表 8.5.8-2 的规定。

表 8.5.8-2 沉管钢壳外壁防腐涂层

序号	项目	性能指标	试验方法
1	附着力, MPa	≥8	GB/T 5210
2	抗冲击, cm	≥50	GB/T 20624.1
3	耐磨性 (1000g/1000r), mg	≤40	GB/T 1768
4	耐盐雾, 4000h	无起泡、生锈、脱落	GB/T 1771
5	抗氯离子渗透性 (30d), mg/cm <sup>2</sup> ·d	≤1.0*10 <sup>-3</sup>	JTJ 275-2000 附录 C
6	耐阴极剥离性 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离≤8	ISO 20340
7	耐海水浸泡性 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离≤8	(GB/T34145-2015, IDT
8	老化试验 4200h, mm	划痕向外剥离平均距离≤8	ISO 20340)

**8.5.9** 端钢壳、钢底板、限位装置、钢剪力键、GINA 止水带和 OMEGA 止水带的压板及紧固件等，应采取涂刷耐腐蚀性涂层或金属喷涂、牺牲阳极保护等措施。

**8.5.10** 隧道基础采用桩基结构的受力钢筋宜采用环氧树脂涂层带肋钢筋。

**8.5.11** 对采用大块石进行管顶回填防护的隧道管节，管顶应采用混凝土覆盖层等保护措施，避免施工期间受到损伤。

**8.5.12** 沉管结构使用阶段的耐久性维护应满足下列要求：

- 1 应以工程交付使用前的沉管结构与构件的耐久性评估指标作为结构运营的耐久性起点状态。
- 2 应及时采集结构耐久性监测系统数据，实时定量评估结构和构件的耐久性状态。
- 3 结构运营期间，应针对结构和构件建立耐久性检测制度。
- 4 应根据沉管结构和构件的耐久性起点状态，建立合理的构件维护制

度。

## 8.6 施工质量附加要求

**8.6.1** 管节预制应根据场地条件、质量、工期、造价等要求选择干坞法或工厂法。当管节数量多、连续性要求高时，宜选择工厂法预制工艺。

**8.6.2** 采用整体式管节时，宜根据现场条件及施工能力合理进行分段、分步浇筑；采用节段式管节时，宜以节段为基本预制单元实施全断面一次性匹配浇注。

**8.6.3** 管节预制施工前应进行混凝土配合比设计，并制定混凝土抗裂专项方案。

**8.6.4** GINA、OMEGA 等专用橡胶止水带应设专门仓库及保护设施。

**8.6.5** 管节结构预制施工控制的主要参数应包括管节混凝土等级、抗渗标号、管节钢筋强度、管节之间接头件受力性能、管节永久性钢结构件的材料防腐性能指标。

**8.6.7** 管节养护应满足下列要求：

1 底板及顶板的上表面宜覆盖土工布浇水保持潮湿，待混凝土终凝之后，在顶、底板表面蓄水养护；

2 外侧墙宜适当推迟混凝土拆模时间，拆模后，继续保温保湿养护，养护时间不小于 14 天；

3 内模拆除后在管道两端应采用土工布等材料封盖，以减少管道内气体流动，保持内孔温湿度的养护要求。

**8.6.8** 端钢壳制作应满足下列要求：

1 端钢壳放样应考虑设计尺寸、制作误差、装配公差、间隙及反变形值、焊接和火焰矫正等过程中的收缩量等因素。

2 端钢壳应在工厂的专用胎架上制作，出厂前必须进行试拼验收。

3 半成品焊接应满足专门制作平台上的要求，超声波探伤应符合现行国家标准《钢结构工程施工及验收规范》GB 50205 的规定。

4 变形控制及校正应采取增设临时支撑、加压板、先焊收缩量大焊缝等措施控制变形；在梁板纠正合格后再点焊端面的钢筋，并采用多把焊枪大功率火焰纠正钢筋焊接后的变形。

**8.6.9** H 型端钢壳细石混凝土灌注应满足下列要求：

1 在端钢壳的安装、校正、加固和管节混凝土施工完成并稳定后，应尽快完成端壳面板与腹板间的灌浆。

2 灌浆应采用高强度、无收缩、易流动及低水率的细石混凝土，细石粒径在 2mm~5mm 之间，强度等级不低于 C40。

3 注浆压力宜控制在 0.3~0.5MPa，灌注时按照从下至上、从中间到两边，分步对称缓慢均匀进行。

4 灌注过程应要做好记录，对每隔腔实际灌注量和理论体积要逐一比较，如发现出入要找出原因并采取措施。

#### **8.6.10 预埋件安装应满足下列要求：**

1 预埋件应在钢筋绑扎区初步定位，然后再到浇筑台座进行精定位。

2 OMEGA 橡胶止水带的预埋件应满足下列要求：

(1) 预埋件应分块制作，分散在各钢筋绑扎功能区进行安装，钢筋笼运输到位后，再浇筑台座进行精确定位及接头焊接；

(2) 预埋件从两侧同时向中间进行精定位，分段进行精调及接头焊接施工；

(3) 预埋件初次安装预留合适调整量。钢筋笼定位完成后，预埋件进行精调后，再用定位钢筋将预埋件与钢筋笼焊结固定；

(4) 预埋件的焊接焊缝满足焊缝的相关要求，面板和翼缘的所有分块间焊缝水密性焊接；

(5) 端钢壳处的管节接头预埋 OMEGA 橡胶止水带套筒、预埋件的螺孔采用螺柱结合基油脂封闭。

3 中埋式可注浆钢边止水带施工应严格按照技术说明书步骤进行操作，且满足以下要求：

(1) 止水带可采用现场安装完成后进行接驳的方式。

(2) 注浆管应在混凝土浇注后进行疏通清理，水密性试验过程前进行注浆封堵工作。

## 9 明挖法隧道

### 9.1 一般规定

**9.1.1** 明挖法隧道主体结构和内部结构可采取现浇和（或）预制混凝土两种方式，其中采用预制混凝土制作的隧道耐久性要求可参照沉管法隧道。

**9.1.2** 基坑支护结构的设计使用年限不应小于一年；当支护结构作为主体结构的一部分时，设计使用年限应与主体结构使用年限一致。

**9.1.3** 明挖隧道主体结构应设置全包柔性外防水层，明挖隧道内应设置完善的截水、排水系统。

### 9.2 隧道主体结构

**9.2.1** 明挖法隧道主体结构断面形状宜为多孔矩形，也可设计为折板或拱形。

**9.2.2** 不同环境作用等级下的结构表面最大计算裂缝宽度允许值应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 的规定。海底隧道钢筋混凝土主体结构迎水土侧裂缝开展宽度不应大于 0.2mm，主体结构背水土侧裂缝开展宽度根据环境作用等级可适当放宽，但不宜大于 0.3mm。

**9.2.3** 海底隧道对裂缝宽度无特殊外观要求，当保护层设计厚度超过 30mm 时，可将厚度取为 30mm 计算裂缝的最大宽度。

**9.2.4** 主体结构侧墙不应采用单一墙，宜选用复合墙，可选用叠合墙，围护墙宜作为主体结构侧墙的一部分与内衬墙共同受力。

**9.2.5** 主体结构变形缝、施工缝等结构缝的设置宜避开局部环境作用不利的部位，当可能遭受腐蚀性环境侵蚀时，应对接缝部位加强防排水、封堵措施，并宜采取附加防腐蚀措施。

**9.2.6** 主体结构顶板和底板不宜设置纵向结构缝。

### 9.3 基坑围护结构

**9.3.1** 满足本标准主体结构混凝土材料、保护层等耐久性指标要求的地下

连续墙、钻孔灌注桩可用作隧道主体结构构件，其余围护结构不应作为主体结构构件使用。

**9.3.2** 围护结构与主体结构相结合时，与主体结构相关的构件之间的结点连接、变形协调、防水构造及耐久性措施应满足主体结构的设计工作年限要求。

**9.3.3** 地下连续墙与隧道主体结构外墙相结合时，主体结构各设计工况下地下连续墙的计算分析应符合现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120 的规定。

**9.3.4** 采用水下灌注施工的混凝土围护结构，混凝土强度应提高一个等级。

**9.3.5** 基坑钢筋混凝土支撑、围檩不宜作为隧道主体结构构件。

## 9.4 防排水系统

**9.4.1** 明挖隧道防水应包括主体结构自防水和变形缝、施工缝、后浇带等结构缝部位防水。

**9.4.2** 主体结构防水

1 钢筋混凝土迎水土侧主体结构应采用防水混凝土制作，其抗渗等级不应低于 P8，应采取减少开裂的措施。

2 迎水土侧主体结构外侧至少应设置一道外包柔性防水层。

**9.4.3** 隧道施工缝内至少应设置两道防水层，变形缝内至少应设置三道防水层，其中变形缝内应设置中埋式橡胶止水带。

**9.4.4** 明挖隧道结构表面应有利于排水，应避免水和有害物质在结构表面积聚，对可能产生蓄水的部位，宜设置可检修的排水通道。

**9.4.5** 排水管的出口不得紧贴混凝土构件表面，宜离开混凝土构件表面一定距离。不宜在隧道接缝或止水构造处排水。

**9.4.6** 混凝土表面的防水层除经专门论证外，不应考虑其对氯化物的阻隔作用。

## 9.5 构造与防腐附加措施

**9.5.1** 构件截面的几何形状应简单、平顺，减少棱角、突变和应力集中。

**9.5.2** 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。处于 D 级以下环境作用等级下的钢筋混凝土结构构件，受力钢筋直径不应小于 16mm；处于 D 级及以上环境作用等级下的钢筋混凝土结构构件，受力钢筋直径不应小于 20mm。

**9.5.3** 隧道主体结构外表面不宜留设吊环、紧固件、连接件、穿墙管等金属部件，临时设置的相关金属部件在隧道运营前应自结构表面切除，切面及其周边范围应采取防腐措施。当环境类别为 III、IV 时，其防腐范围应为从伸入混凝土内 100mm 处起至露出混凝土外的表面。

**9.5.4** 穿墙管等运营期需保留构件宜采用耐腐蚀、耐锈蚀材料，穿墙管外侧防水层应铺设严密，不留接茬。

**9.5.5** 海底隧道内的排水沟过水表面应根据水沟材质采取相应的防腐蚀处理措施，并应通过腐蚀性介质耐久性试验。

**9.5.6** 对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，无法更换的可考虑适当增加结构的耐久性富裕度。

**9.5.7** 隧道结构变形缝处应设置缝间抗剪切构造措施，应根据剪切件的材料及性质，制定满足与主体结构使用年限一致的耐久性措施。

**9.5.8** 当氯化物环境作用等级为 E、F 级时，海底隧道主体结构各构件应采用防腐蚀附加措施。

**9.5.9** 防腐蚀附加措施及其最低保护年限应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 附录 C 的规定。采取其他附加防腐蚀措施时，应经过专门的技术论证，证明其抵抗环境腐蚀介质侵蚀的能力。

**9.5.10** 采取防腐蚀附加措施时，应考虑防腐蚀层设计与防水层设计相结合。

## 9.6 施工质量附加要求

**9.6.1** 隧道主体结构施工中，应重点对主体结构表层混凝土的振捣密实与均匀性、混凝土的良好养护、混凝土保护层厚度或钢筋定位的准确性、混凝土的裂缝等进行严格的质量控制。

**9.6.2** 隧道主体结构混凝土应振捣密实、均匀，加强养护，不得存在表面凹凸、空洞、麻面、错台以及骨料架空等混凝土缺陷，结构的养护和质量控制应符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的规定。

**9.6.3** 隧道钢筋混凝土保护层厚度应严格控制，主体结构保护层厚度施工误差应控制在 $\pm 5\text{mm}$  范围内，且钢筋保护层厚度的检测合格率应达到 90% 及以上。

**9.6.4** 隧道主体结构混凝土浇筑宜采用大刚度钢模施工，内部混凝土构件宜采用预制件，采用现浇结构时应采用钢模施工。

**9.6.5** 隧道基底至结构底板以上 500mm 范围及结构顶板以上不小于 500mm 范围的回填层压实系数不应小于 0.94。

## 10 隧道内部结构及附属构件

**10.1.1** 隧道内部结构中难更换的构件应与主体结构工作年限一致，易更换构件设计工作年限可取 50 年；附属构件的设计工作年限不宜低于 25 年。

**10.1.2** 隧道内附属构件应预设检查与维修的构造与设施，便于检查和更换。

**10.1.3** 隧道内部装饰材料应选择耐磨损、耐腐蚀、易清洁的材料，以适应隧道内部的特殊环境。

**10.1.4** 隧道内应设计合理的检修通道，以便对隧道内部结构和附属构件进行定期检查和维护。

**10.1.5** 隧道内预制构件的尺寸误差和安装偏差应满足设计要求。

**10.1.6** 隧道内预制口子件、车道板拼缝应做好防水处理，并在浇筑路面垫层前，对内部结构拼缝的防水能力进行检验。

## 11 检测与维修

**11.1.1** 隧道运营期应制定科学的运营维护计划，定期进行结构健康监测与评估，及时发现并处理病害，延长隧道使用寿命。

**11.1.2** 隧道结构使用阶段的耐久性维护应满足下列要求：

1 应以工程交付使用前的隧道结构与构件的耐久性评估指标作为结构运营的耐久性起点状态。

2 应及时采集结构耐久性监测系统数据，实时定量评估结构和构件的耐久性状态。

3 结构运营期间，应针对结构和构件建立耐久性检测制度。

4 应根据隧道结构和构件的耐久性起点状态，建立合理的构件维护制度。

**11.1.3** 维修阈值：基于环境及隧道结构构造要求，设定各类病害的维修阈值，如最大允许裂缝宽度、渗水量、混凝土碳化深度、钢筋锈蚀程度等。

**11.1.4** 维修类别与等级：按照病害严重程度、结构重要性及对运营影响程度，将维修分为日常保养、小修、中修、大修等不同类别和等级，明确各类维修的触发条件和实施要求。

**11.1.5** 检测方法

1 常规检测：包括目视检查、尺量、锤击回声法、超声波检测、雷达探测、红外热成像等，用于识别裂缝、渗水、空洞、脱空、钢筋锈蚀、衬砌厚度减薄等问题。

2 专项检测：如地质雷达探测、地质钻探、混凝土强度无损检测（如超声波、回弹法、钻芯取样等）、钢筋锈蚀电位测量、渗漏点定位、地表沉降监测等，针对特定问题或潜在隐患进行深入排查。

3 长期监测：利用自动化监测系统（如光纤光栅传感器、无线传感器网络等）对隧道关键部位（如衬砌应力、收敛变形、地下水位等）进行连续监测，及时捕捉异常变化。

## 附录 A 阻锈剂快速评价方法

### A.0.1 试样制备

将 HPB300 钢筋加工制成长度 100mm、直径 10mm 的圆柱体，并使用 400 号砂纸打磨钢筋工作表面。

### A.0.2 溶液制备

#### 1 阻锈剂盐溶液

(a) 向玻璃烧杯中加入 17.5g 氯化钠和推荐用量的钢筋混凝土阻锈剂，用蒸馏水稀释至 500g；

(b) 测试溶液初始 pH，保持溶液 pH 值在  $9 \pm 1$  的范围内；若 pH 值较低采用质量分数为 10% 的氢氧化钠溶液进行调节，若 pH 值较高采用 1mol/L 的盐酸溶液进行调节；

(c) 测试溶液 pH，若溶液 pH 值在  $9 \pm 1$  的范围内，制得阻锈剂盐溶液。

#### 2 非阻锈剂盐溶液

向玻璃烧杯中加人、17.5g 氯化钠,用蒸馏水稀释至 500g。调节溶液 pH，若 pH 值较低采用质量分数为 10% 的氢氧化钠溶液进行调节，若 pH 值较高采用 1mol/L 的盐酸溶液进行调节；保持溶液 pH 值在  $9 \pm 1$  的范围内，制得非阻锈剂盐溶液。

### A.0.3 试验环境条件

试验环境温度均应保持在  $(20 \pm 3)^\circ \text{C}$ 。

### A.0.4 试验步骤及结果处理

a) 将处理后的钢筋以全浸泡的方式放入非阻锈剂盐溶液和阻锈剂盐溶液，其中溶液液面高度应高于钢筋最高点 20mm 以上；每组实验钢筋数量应不少于 3 个；

b) 钢筋在溶液中浸泡， $24 \pm 1\text{h}$  后将钢筋取出，并测试钢筋锈蚀面积。

c) 钢筋锈蚀面积测试可采用图像处理软件测试或者人工测试的方式。人工测试应用玻璃纸或透明胶带纸裹在每根钢筋试件表面，描绘锈蚀部分轮廓，然后将玻璃纸或透明胶带纸取下贴在方格纸上，统计每根有效钢筋试件锈蚀部分面积和钢筋工作面积（参照《钢筋阻锈剂应用技术规程》

(JGJ/T 192 - 2009) 中 A.3.7 部分钢筋锈蚀面积人工测试方法)。

#### A.0.5 结果判定

可根据钢筋锈蚀面积比确定阻锈剂效果的优劣。钢筋锈蚀面积百分率(A)按照式(A.0.5-1)计算。

$$A = \frac{a_1}{a_2} \times 100\% \quad (\text{式 A.0.5-1})$$

式中：A—钢筋锈蚀面积百分率；

$a_1$ —计算得到的钢筋锈蚀面积( $\text{mm}^2$ )；

$a_2$ —钢筋工作面积( $\text{mm}^2$ )；

掺加阻锈剂的钢筋试件与基准钢筋锈蚀面积百分率比应按式(A.0.5-2)计算。

$$R = \frac{A_a}{A_j} \times 100\% \quad (\text{式 A.0.5-2})$$

式中：R—掺加阻锈剂的钢筋与基准钢筋锈蚀面积百分率比；

$a_1$ —掺加阻锈剂的钢筋锈蚀面积百分率(%)；

$a_2$ —基准钢筋锈蚀面积百分率(%)。；

## 附录 B 钢筋混凝土保护层厚度计算方法

### B.1 计算说明

**B.1.1** 当海底交通隧道混凝土结构的耐久性设计有特殊要求时，可利用混凝土结构寿命预测模型计算选定构件的保护层厚度，用于判断设计的合理性和安全性。

**B.1.2** 本附录介绍了氯盐侵蚀条件下，常用的混凝土结构寿命预测模型，结构设计人员应根据结构的特点和需求，选用适宜的计算方法。

表 B.1.2 混凝土结构寿命预测计算方法及特点

序号	方法简称	模型出处	特点	耐久性极限状态
方法 1	CECS 评定标准方法	《混凝土结构耐久性评定标准》CECS220:2007	国内主流混凝土寿命预测模型，参数相对较少，通用性较好，易理解	①钢筋开始锈蚀； ②保护层锈胀开裂； ③混凝土表面出现可接受的最大外观损伤
方法 2	欧洲 Duracrete 方法	欧洲 Duracrete 研究报告	量化分级环境、材料和施工等参数，未考虑混凝土强度等关键参数，系数体系复杂庞大	钢筋脱钝

### B.2 方法 1——CECS 评定标准方法

**B.2.1** 根据混凝土结构特点和设计需要，选取适宜的耐久性极限状态；使用极限状态阶段的临界点计算公式，同时依据环境作用等级确定结构混凝土表面氯离子浓度，使用氯离子扩散系数、时间依赖系数、环境温湿度等参数的测量值或计算值，确定结构达到各极限状态所需的时间。

**B.2.2** 结构耐久性应根据需要按不同的耐久性极限状态评定，耐久性极限状态可分为下列三种：

- 1 钢筋开始锈蚀；
- 2 混凝土保护层锈胀开裂；
- 3 混凝土表面出现可接受的最大外观损伤。

**B.2.3** 不考虑氯离子扩散系数的时间依赖性时，钢筋开始锈蚀的时间  $t_i$  可按式 (B.2.3-1) 和式 (B.2.3-2) 估算：

$$t_i = \left(\frac{c}{K}\right)^2 \times 10^{-6} \quad (\text{B.2.3-1})$$

$$K = 2\sqrt{D} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{M_{cr}}{M_s}\right) \quad (\text{B.2.3-2})$$

式中：

$t_i$ ——钢筋开始的时间（年，以 a 表示）；

$c$ ——混凝土保护层厚度（mm）；

$K$ ——氯盐侵蚀系数；

$D$ ——氯离子扩散系数（ $\text{m}^2/\text{a}$ ）；

$\operatorname{erf}$ ——误差函数；

$M_{cr}$ ——钢筋锈蚀的临界氯离子浓度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ），可按表 B.2.3-1 取用；

$M_s$ ——混凝土表面氯离子浓度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）。 $M_s$  值应采用调查值或实测数据推算值。当缺乏有效的实测数据时，可参照表 B.2.3-2 取用；近海大气区混凝土表面氯离子浓度应优先通过实测，按《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS220: 2007) 相关规定进行确定。距海岸 0.1km 处  $M_s$  值可按表 B.2.3-3 取用，其他位置应乘以表 B.2.3-4 的修正系数。

表 B. 2. 3-1 钢筋锈蚀的临界氯离子浓度  $M_{cr}$

水胶比 (W/B)	0.40	0.45	$\geq 0.50$
混凝土强度等级	C40	C30	$\leq \text{C}25$
$M_{cr}$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.40	1.30	1.20

表 B. 2. 3-2 潮汐区、浪溅区混凝土表面氯离子浓度  $M_s$

混凝土强度等级	C40	C30	C25	C20
$M_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	8.1	10.8	12.9	15.0

表 B. 2. 3-3 距海岸 0.1km 处混凝土表面氯离子浓度  $M_s$

混凝土强度等级	C40	C30	C25	C20
$M_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	3.2	4.0	4.6	5.2

表 B. 2. 3-4 表面氯离子浓度修正系数

距海岸的距离 (km)	海岸线附近	0.1	0.25	0.5	1.0
$M_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.96	1	0.66	0.44	0.33

#### B.2.4 氯离子扩散系数 $D$ 可按下列规定取用：

1 应优先根据混凝土中氯离子分布检测结果由下式推算：

$$D_0 = \frac{x^2 \times 10^{-6}}{4t_0 [\operatorname{erf}^{-1}(1 - M(x, t_0)/M_s)]^2} \quad (\text{B.2.4-1})$$

式中：

$x$ ——氯离子扩散深度（mm）；

$t_0$ ——结构建成至检测时的时间 (a) ;

$M(x, t_0)$ ——检测时  $x$  深度处的氯离子浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;

2 需要考虑氯离子扩散系数时间依赖性时, 可按下式估算:

$$D = D_0(t_0/t)^\alpha \quad (\text{B.2.4-2})$$

式中  $\alpha$  值宜用每隔 2~3 年实测数据推算的  $D$  值确定; 不能实测时, 可按下式确定:

$$\alpha = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (\text{B.2.4-3})$$

式中:

%FA——粉煤灰占胶凝材料百分比;

%SG——磨细矿渣占胶凝材料百分比。

3 无实测数据时, 普通硅酸盐混凝土龄期 5 年的氯离子扩散系数可按下式估算:

$$D_{5a} = (7.08W/B - 1.846)(0.0447T - 0.052) \quad (\text{B.2.4-4})$$

式中:

$D_{5a}$ ——龄期 5 年的氯离子扩散系数( $\text{m}^2/\text{a}$ );

$W/B$ ——混凝土水胶比;

$T$ ——环境年平均温度 ( $^\circ\text{C}$ ) 。

**B.2.5** 考虑氯离子扩散系数时间依赖性时, 钢筋混开始锈蚀时间  $t_i$  可按下式计算:

$$t_i = \left\{ \frac{c^2 \times 10^{-6}}{4D_0 \cdot t_0^\alpha \left[ \text{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{M_{cr}}{M_s} \right) \right]^2} \right\}^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (\text{B.2.5})$$

式中:

$D_0$ —— $t_0$  时的氯离子扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{a}$ ) ;

$\alpha$ ——氯离子扩散系数时间依赖系数, 宜用实测推算值。

**B.2.6** 近海大桥环境钢筋开始锈蚀时间  $t_i$  可按下列规定估算

1  $t_i \leq t_l$  时,  $t_i$  由下式迭代估算

$$M_{cr} = k\sqrt{t_i} \left\{ \exp \left( -\frac{c^2 \times 10^{-6}}{4Dt_i} \right) - \left[ \frac{c\sqrt{\pi} \times 10^{-3}}{2\sqrt{Dt_i}} \left( 1 - \text{erf} \left( \frac{c \times 10^{-3}}{2\sqrt{Dt_i}} \right) \right) \right] \right\} \quad (\text{B.2.6-1})$$

式中:

$k$ ——混凝土表面氯离子聚集系数, 可按下式计算:

$$k = \frac{M_{s2}}{\sqrt{t_0}} \quad (\text{B.2.6-2})$$

式中:

$M_{s2}$ ——实测混凝土表面氯离子浓度

2  $t_i > t_l$  时, 钢筋开始锈蚀时间为  $t_i = t_l + t_2$ ,  $t_2$  通过求解式 B.2.6-3 确定。

$$M_{cr} = M_1 + (M_s - M_1) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{c \times 10^{-3}}{2\sqrt{Dt_2}} \right) \right] \quad (\text{B.2.6-3})$$

$$M_1 = k\sqrt{t_1} \left\{ \exp \left( -\frac{c^2 \times 10^{-6}}{4Dt_i} \right) - \left[ \frac{c\sqrt{\pi} \times 10^{-3}}{2\sqrt{Dt_1}} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{c \times 10^{-3}}{2\sqrt{Dt_i}} \right) \right) \right] \right\} \quad (\text{B.2.6-4})$$

**B.2.7** 保护层锈胀开裂的时间  $t_{cr}$  可按下式计算:

$$t_{cr} = t_i + t_c \quad (\text{B.2.7-1})$$

$$t_c = \frac{\delta_{cr}}{\lambda_{cl}} \quad (\text{B.2.7-2})$$

式中:

$t_c$ ——钢筋开始锈蚀至保护层锈胀开裂的时间(a);

$\delta_{cr}$ ——保护层开裂时刻的临界钢筋锈蚀深度(mm), 可按式(B.2.7-3)

及式(B.2.7-4) 计算:

对于杆件(角部钢筋):

$$\delta_{cr} = 0.012c/d + 0.00084f_{cu,k} + 0.018 \quad (\text{B.2.7-3})$$

对于墙、板(非角部钢筋):

$$\delta_{cr} = 0.015(c/d)^{1.55} + 0.0014f_{cu,k} + 0.016 \quad (\text{B.2.7-4})$$

$d$ ——钢筋直径;

$f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值, 即为混凝土强度等级;

$\lambda_{cl}$ ——氯腐蚀环境保护层开裂前钢筋的平均锈蚀速度(mm/a)。

**B.2.8** 保护层开裂前钢筋年平均锈蚀速度  $\lambda_{cl}$  可按下式计算:

$$\lambda_{cl} = 11.6 \times i \times 10^{-3} \quad (\text{B.2.8})$$

式中:

$i$ ——钢筋腐蚀电流密度( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )。

**B.2.9** 普通硅酸盐混凝土钢筋腐蚀电流密度可按下式估算:

1) 掺入型氯盐侵蚀环境( $M_{sl} > M_{cr}$ ):

$$\ln i = 8.617 + 0.618 \ln \left[ M_{sl} \left( \frac{11.1}{M_{sl}^{0.9} t^{0.93}} + 0.368 \right) \right] - \frac{3034}{T+273} - 5 \times 10^{-3} \rho + \ln m_d \quad (\text{B.2.9-1})$$

2) 渗入型氯盐侵蚀环境:

$$\ln i = 8.617 + 0.618 \ln M_{sl} - \frac{3034}{T+273} - 5 \times 10^{-3} \rho + \ln m_{cl} \quad (\text{B.2.9-2})$$

$$M_{st} = M_{s0} + (M_s - M_{s0}) \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{c \times 10^{-3}}{2\sqrt{Dt_{cr}}} \right) \right) \quad (\text{B.2.9-3})$$

式中:

$M_{st}$ —钢筋表面氯离子浓度(kg/m<sup>3</sup>);

$m_{cl}$ —局部环境影响系数,可按表 B.2.9 取值;

表 B.2.9 氯盐侵蚀环境等级及参数

环境类别	环境等级	环境状况	混凝土表面氯离子达到稳定值的累积时间 $t_1$ (a)	局部环境系数 $m_{cl}$	
				室外	室内
近海大气环境	IIIa	离海岸 1.0km 以内	20~30	4.0~4.5	2.0~2.5
	IIIb	离海岸 0.5km 以内	15~20		
	IIIc	离海岸 0.25km 以内	10~15		
	III d	离海岸 0.1km 以内	10		
浪溅区	IIIe	水位变化区和浪溅区	瞬时	4.5~5.5	
除冰盐环境	III f	除冰盐环境	检测结果确定	4.5~5.5	

$\rho$ ——混凝土电阻率 ( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ ),可按实测值取用,也可按式 (B.2.9-4) 计算:

$$\rho = k_{\rho} (1.8 - M_{cl}^{\mu}) + 10(RH - 1)^2 + 4 \quad (\text{B.2.9-4})$$

式中:

$k_{\rho}$ ——当水胶比  $W/B=0.3 \sim 0.4$ ,或普通硅酸盐混凝土为 C40~C50 时,  $k_{\rho}=11.1$ ;

当水胶比  $W/B=0.5 \sim 0.6$ ,或普通硅酸盐混凝土为 C20~C30 时,  $k_{\rho}=5.6$ ;

当水胶比  $W/B=0.4 \sim 0.5$ ,或普通硅酸盐混凝土为 C30~C40 时内插;

$M_{cl}^{\mu}$ ——混凝土保护层中氯离子浓度平均值,可近似取混凝土表面和钢筋表面氯离子浓度的平均值,即  $M_{cl}^{\mu} = (M_s + M_{st})/2$ 。当  $M_{cl}^{\mu} > 3.6$  时,取  $3.6(\text{kg}/\text{m}^3)$ ;

$RH$ —环境相对湿度;

$M_{s0}$ ——腐蚀环境混凝土制备时已经含有的氯离子含量(kg/m<sup>3</sup>);

**B.2.10** 保护层开裂后年平均钢筋锈蚀速率  $\lambda_{cll}$  可按式估算:

$$\lambda_{cll} = (4.5 - 26\lambda_{cl}) \cdot \lambda_{cl} \quad (\text{B.2.10})$$

当  $\lambda_{cll} < 1.8\lambda_{cl}$  时,取  $\lambda_{cll}=1.8\lambda_{cl}$ 。

### B.3 方法 2——欧洲 Duracrete 方法

**B.3.1** 将临界氯离子浓度等环境、材料和施工工艺参数加以定量分级，并根据极限状态及概率方法确定分项系数。计算时根据具体情况，选择相符的影响因子，计算结构达到极限状态的时间。

**B.3.2** 以钢筋脱钝作为混凝土结构的耐久性极限状态。

**B.3.3** 氯化侵蚀的钢筋脱钝时间 $t_i^d$ ，可按下式计算：

$$t_i^d = \left\{ \left[ \frac{2}{x^{c-4}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{c_{cr}^c}{\gamma_{c_{cr}}} \cdot \frac{1}{A_{C_{s,cl}}^c \cdot W/B \cdot \gamma_{C_{s,cl}}} \right) \right]^{-2} \cdot \frac{R_{0,cl}^c}{k_{e,cl}^c k_{c,cl}^c t_0^{n_{cl}^c} \gamma_{R_{cl}}} \right\}^{\frac{1}{1-n_{cl}^c}} \quad (\text{B.3.3-1})$$

式中：

$\operatorname{erf}$ ——误差函数；

$c_{cr}^c$ ——临界氯离子浓度的特定值，以占胶凝材料的质量比表示，可按表 B.3.3-1 取值。

表 B.3.3-1 临界氯离子浓度值 $c_{cr}^c$

条件	特征值	单位
OPC,W/B=0.5,水下区	1.6	[%]占胶凝材料的质量比
OPC,W/B=0.4,水下区	2.1	[%]占胶凝材料的质量比
OPC,W/B=0.3,水下区	2.3	[%]占胶凝材料的质量比
OPC,W/B=0.5,浪溅区和潮汐区	0.50	[%]占胶凝材料的质量比
OPC,W/B=0.4,浪溅区和潮汐区	0.80	[%]占胶凝材料的质量比
OPC,W/B=0.3,浪溅区和潮汐区	0.90	[%]占胶凝材料的质量比

$\gamma_{c_{cr}}$ ——临界氯离子浓度的分项系数，可按表 B.3.3-2 取值；

$\gamma_{R_{cl}}$ ——抗力分项系数，可按表 B.3.3-2 取值。

表 B.3.3-2 海洋环境下结构分项系数取值

修复比维修风险系数	高	中	低
$\Delta x[\text{mm}]$	20	14	8
$\gamma_{c_{cr}}$	1.20	1.06	1.03
$\gamma_{C_{s,cl}}$	1.70	1.40	1.20
$\gamma_{R_{cl}}$	3.25	2.35	1.50

$A_{C_{s,cl}}^c$ ——描述表面氯离子浓度和水胶比之间关系的回归参数特定值，以与胶凝材料的质量比表示，可按表 B.3.3-3 取值；

混凝土表面氯离子浓度可按下式计算：

$$C_{s,cl}^d = A_{C_{s,cl}}^c (W/B) \gamma_{C_{s,cl}} \quad (\text{B.3.3-2})$$

表 B. 3. 3-3 回归参数 $A_{C_{s,cl}}^c$ 取值表

条件	特征值	单位
OPC, 水下区	10.3	[%]占胶凝材料的质量比
OPC, 潮汐和浪溅区	7.76	[%]占胶凝材料的质量比
OPC, 大气区	2.57	[%]占胶凝材料的质量比
PFA, 水下区	10.8	[%]占胶凝材料的质量比
PFA, 潮汐和浪溅区	7.46	[%]占胶凝材料的质量比
PFA, 大气区	4.42	[%]占胶凝材料的质量比
GGBS, 水下区	5.06	[%]占胶凝材料的质量比
GGBS, 潮汐和浪溅区	6.77	[%]占胶凝材料的质量比
GGBS, 大气区	3.05	[%]占胶凝材料的质量比
SF, 水下区	12.5	[%]占胶凝材料的质量比
SF, 潮汐和浪溅区	8.96	[%]占胶凝材料的质量比
SF, 大气区	3.23	[%]占胶凝材料的质量比

W/B——水胶比；

$\gamma_{C_{s,cl}}$ ——表面氯离子浓度的分项系数，可按表 B.3.3-2 取值；

$x^c$ ——混凝土保护层厚度特征值；

$\Delta x$ ——保护层厚度预留差额，可按表 B.3.3-2 取值；

$R_{0,cl}^c$ ——抗力特征值， $R_{0,cl}^c = 0.01585 \frac{year}{mm^2}$ ；

$k_{c,cl}^c$ ——养护因子特征值，可按表 B.3.3-4 取值；

$k_{e,cl}^c$ ——环境因子特征值，可按表 B.3.3-5 取值；

$t_0$ ——做验证强度试验时的混凝土龄期， $t_0=0.0767$  年(对应于 28 天)；

$n_{cl}^c$ ——龄期因子特征值，可按表 B.3.3-6 取值；

表 B. 3. 3-4 养护因子 $k_{c,cl}^c$ 取值表

条件	特征值	单位
养护 1 天	2.08	-
养护 3 天	1.50	-
养护 7 天	1	-
养护 28 天	0.79	-

表 B. 3. 3-5 环境因子 $k_{e,cl}^c$ 取值表

条件	特征值	单位
OPC, 水下区	1.32	-
OPC, 潮汐区	0.92	-
OPC, 浪溅区	0.27	-
OPC, 大气区	0.68	-
OPC, 水下区	3.88	-
OPC, 潮汐区	2.70	-

OPC, 浪溅区	0.78	-
OPC, 大气区	1.98	-

表 B. 3. 3-6 氯化侵蚀龄期因子 $n_{Cl}^c$ 取值表

条件	特征值	单位
OPC, 水下区	0.30	-
OPC, 潮汐和浪溅区	0.37	-
OPC, 大气区	0.65	-
PFA, 水下区	0.69	-
PFA, 潮汐和浪溅区	0.93	-
PFA, 大气区	0.66	-
GGBS, 水下区	0.71	-
GGBS, 潮汐和浪溅区	0.60	-
GGBS, 大气区	0.85	-
SF, 水下区	0.62	-
SF, 潮汐和浪溅区	0.39	-
SF, 大气区	0.79	-

## 本技术规程用词说明

1 执行本技术规程条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

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用词：

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用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合·····的规定”或“应按·····执行”。

## 引用标准名录

- 1 《通用硅酸盐水泥》 GB 175
- 2 《碳素结构钢》 GB/T 700
- 3 《钢筋混凝土用钢》 GB/T 1499
- 4 《低合金高强度结构钢》 GB/T 1591
- 5 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》 GB/T 1596
- 6 《混凝土外加剂》 GB 8076
- 7 《混凝土外加剂匀质性性能试验方法》 GB/T 8077
- 8 《涂覆涂料前钢材表面处理、表面清洁度的目视评定》 GB/T 8923
- 9 《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》 GB/T 10125
- 10 《建设用砂》 GB/T 14684
- 11 《建设用卵石、碎石》 GB/T 14685
- 12 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》 GB/T 18046
- 13 《高分子防水材料 第 4 部分：盾构法隧道管片用橡胶密封垫》 GB 18173.4
- 14 《砂浆和混凝土用硅灰》 GB/T 27690
- 15 《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》 GB/T 33953
- 16 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 GB/T 50082
- 17 《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204
- 18 《钢结构工程施工及验收规范》 GB 50205
- 19 《混凝土结构耐久性设计标准》 GB/T 50476
- 20 《矿物掺合料应用技术规范》 GB/T 51003
- 21 《混凝土用水标准》 JGJ 63
- 22 《建筑基坑支护技术规程》 JGJ 120
- 23 《锚杆锚固质量无损检测技术规程》 JGJ/T 182
- 24 《钢纤维混凝土结构设计标准》 JGJ/T465-2019
- 25 《钢铁制件粉末渗锌》 JB/T 5067
- 26 《阴极电泳涂装通用技术规范》 JB/T 10242
- 27 《混凝土防冻剂》 JC/T 475

- 28 《聚羧酸系高性能减水剂》 JG/T 223
- 29 《混凝土结构防护用成膜型涂料》 JG/T 335
- 30 《钢筋混凝土阻锈剂》 JT/T 537
- 31 《水运工程结构耐久性设计标准》 JTS 153
- 32 《水运工程结构防腐蚀施工规范》 JTS/T 209
- 33 《铁路工程水质分析规程》 TB 10104
- 34 《用湿蜡法测定大气氯化物沉淀速率的标准试验方法》 ASTM G140-02

中国工程建设标准化协会标准

海底交通隧道耐久性设计标准

Standard for Durability Design of Undersea Traffic Tunnels

（征求意见稿）

**T/CECS XXX—2023**

条文说明

## 目录

1 总 则.....	65
2 术语.....	67
3 基本规定.....	68
4 环境.....	70
5 材料.....	75
6 盾构法隧道.....	87
7 钻爆法隧道.....	92
8 沉管法隧道.....	94
9 明挖法隧道.....	98
10 隧道内部结构及附属构件.....	108
11 检测与维修.....	110
附 录 A 阻锈剂快速评价方法.....	112
附 录 B 钢筋混凝土保护层厚度计算方法.....	113

## **Contents**

1	General Provisions .....	65
2	Terms .....	67
3	Basic Requirements.....	68
4	Environments .....	70
5	Materials.....	75
6	Shield Tunnels.....	87
7	Drill and Blast Tunnels .....	92
8	Immersed Tunnels.....	94
9	Cut-and-Cover Tunnels.....	98
10	Internal Structure and Ancillary Components of the Tunnel.....	108
11	Inspection and Maintenance .....	110
	Appendix A Rapid Evaluation Method for Rust Inhibitors.....	112
	Appendix B Calculation Method for Thickness of Reinforced Concrete protective Layer .....	113

(本条文说明系对重点条文的编制依据、存在的问题以及在执行中应注意的事项等予以说明,不具备与规范正文同等的效力,仅供使用者作为理解和把握暂行规范的参考。为了减少篇幅,只列条文号,未抄录原条文。)

## 1 总 则

**1.0.1** 海底交通隧道多为重大的跨海交通干线,工程规模大、修建难度高,隧道外侧接触海水和含海水的岩土体、内侧接触空气,且可能承受较高水压作用,隧道的耐久性设计直接关系到工作年限,在设计过程中需重点考虑。我国现行的耐久性设计相关标准中针对海底隧道在耐久性设计方面的特殊要求考虑较少,甚至对海底隧道使用的钢结构等非混凝土构件无相关耐久性要求。此外,现行的国家标准、公路行业、铁路行业标准中针对海洋环境下混凝土结构耐久性技术标准并不统一,设计执行难度大。本规范利用近年来我国在海底隧道工程耐久性技术相关研究成果和建设经验,统一海底交通隧道耐久性设计相关技术标准和要求,目的是保障不同交通功能、不同工法修建的海底交通隧道工程的主体结构、防排水系统及内部结构和构件在设计工作年限内能达到预期性能。

**1.0.2** 不同隧道施工方法所使用的建筑材料和结构服役状态不尽相同,本标准针对常用的四种海底隧道修建工法隧道耐久性设计分别进行规定;目前铁路和公路行业有相应的混凝土结构耐久性设计规范,本标准在梳理既有国家和行业标准上,对海底交通隧道工程耐久性设计标准进行统一,同时也为公路兼城市道路隧道、公路与铁路合建隧道、公路与城市轨道交通合建隧道等工程项目的设计提供依据。本规程中所述的“海底隧道”,除了一般意义上的海域段隧道之外,还包括与海域段隧道相连、受海洋环境作用的陆域段隧道结构。

根据海底隧道特点,所涉及的环境作用包括:碳化、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、冻融循环、化学腐蚀环境。

**1.0.3** 本条规定参考《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T50476-2019) 1.0.2 条。

**1.0.4** 根据《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T50476-2019) 1.0.3 条以及附录 A,与耐久性极限状态相对应的结构设计使用年限应具有规定的保

证率，并应满足正常使用极限状态的可靠度要求。根据正常使用极限状态失效后果的严重程度，可靠度宜为 90%~95%，相应的失效概率宜为 5%~10%。环境作用下的耐久性问题十分复杂，存在较大的不确定和不确定性，目前尚缺乏足够的工程经验与数据积累，因此在使用本标准时，如有可靠的调查类比与试验依据，通过专门的论证，可以局部调整本标准的规定。此外，个地方宜根据当地环境特点与工程实践经验，制订相应的地方标准，进一步细化和具体本标准的相关规定。

## 2 术语

**2.0.5** 术语中的钢筋包括受力主筋、箍筋和分布钢筋，参考《铁路混凝土结构耐久性设计规范》，不包括拉结筋。

**2.0.7** 《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》《铁路混凝土结构耐久性设计规范》中均提到了“主体结构”，但什么是隧道主体结构并未有术语解释。《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》3.0.7条中，将明挖隧道的顶底板和侧墙，钻爆法隧道初期支护喷射混凝土、锚杆、钢筋网，模筑混凝土衬砌拱墙和仰拱，盾构法预制混凝土管片均作为隧道主体结构。本标准参考《工程结构设计基本术语标准》（GB/T 50083-2014），对隧道主体结构进行了定义。隧道主体结构均为不可更换构件。

**2.0.8** 位于隧道主体结构内部且不直接参与主体结构受力的结构，如分隔墙、车道板、烟道板、防撞侧石等。

**2.0.9** 《工程结构设计基本术语标准》（GB/T 50083-2014）通用术语中对“结构构件”有定义；《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》中提出了可更换构件和不可更换构件的概念，《铁路混凝土结构耐久性设计规范》中提到了“可更换的小型构件”的概念。但在实际操作中对双层隧道中间车道板结构是否属于可更换构件存在争议，这影响到了设计工作年限的选取，因此本标准对什么是可更换结构构件进行了明确。隧道工程主体结构以外的内部构件均为可更换构件，但是由于结构所处部位、作用的不同，更换的难易程度差距很大，如隧道路面（或道床）下的仰拱填充、双层隧道的中间车道板、内部风道等结构构件更换非常困难，而水沟盖板更换相对容易，故根据更换难易程度又可分为难更换构件和易更换构件两类。

**2.0.11** 混凝土结构的防腐蚀附加措施应根据环境作用和条件、施工条件、便于维护以及全寿命成本等因素综合考虑。目前包括混凝土表面涂层、硅烷浸渍、环氧涂层钢筋、钢筋阻锈剂和阴极保护等。

### 3 基本规定

**3.0.2** 《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）3.3.2 条规定：一般环境下的民用建筑在设计使用年限内无需大修，其构件的设计使用年限应与结构整体设计使用年限相同。环境作用等级为 D、E、F 的桥梁、隧道等混凝土结构，其部分构件可设计成易于更换的形式，或能够经济合理地进行大修。可更换构件的设计工作年限可低于结构整体的设计工作年限，并应在设计文件中明确规定。

**3.0.5** 主体结构包括：明挖法隧道顶板、底板、侧墙，盾构法隧道衬砌管片及管片间连接件，钻爆法隧道初期支护、二次衬砌，沉管法隧道管节结构及接头等。隧道内部结构中难更换构件包括：管片内衬、预制箱涵、车道板、牛腿等支撑结构，烟（风）道结构，仰拱填充及暗沟等。隧道内部结构中易更换构件包括：防撞侧石、调平层、路面水沟与管线沟槽及盖板等。

交通隧道内部结构更换时对隧道正常运营干扰很大，甚至需中断交通，因此难更换构件应与主体结构工作年限一致；易更换构件设计工作年限可为 50 年，但考虑到混凝土构件设计工作年限增加到 100 年引起的工程费用增加较少，易更换构件设计工作年限 100 年比 50 年时全寿命周期的费用更低，因此建议易更换的混凝土构件设计工作年限也取 100 年。

**3.0.6** 《建筑与市政工程防水通用规范》（GB 55030—2022）第 2.0.2 条第 1 款规定“地下工程防水设计工作年限不应低于工程结构设计工作年限”。海底交通隧道在运营期间一旦发生渗漏，将严重影响隧道的使用功能，并可能影响结构的耐久性和安全性。进行渗漏水治理时，防排水设施通常难以更换，且维修成本较高。因此，海底交通隧道应提高对防排水系统重要性的认识，综合运用材料、工艺、装备等相关技术措施及管理制度，确保在隧道主体结构设计工作年限内，具有预期有效的防水功能。此外，根据《建筑与市政工程防水通用规范》（GB 55030—2022）2.0.6 条的规定，海底交通隧道属于甲类工程防水类别（对渗漏敏感的地下工程）和 I 类工程防水使用环境类别（设防水位标高于结构底板标高、地下水始终存在、防水功能重要程度高），因此其工程防水等级应为一级。

综合国内已有的海底交通隧道运营管理经验来看，海底交通隧道防排水系统需要关注其材料耐久性和功能可维护性两方面的要求，才能具有较好的“韧性”，综合保障隧道的长期安全运营和减轻养护的工作压力。由于目前国内外研究成果暂时不够系统，以及考虑到本规范的编制重点范围，在本规范中后续章节中主要针对隧道防排水系统的材料耐久性进行了要求，对其功能可维护性暂时未做明确要求。但是相关的建设管理、勘察、设计、施工、运维等单位，应重视对海底交通隧道防排水系统可维护性技术（包括材料、构造、装备、工艺、管理制度等）的积极探索和应用，以确保在隧道的设计工作年限内海底交通隧道防排水系统能发挥和保持预期的功能，综合达成设计工作年限目标。

**3.0.7** 现行设计规范中对隧道内装饰板、防火板等附属部件设计工作年限无相关规定，地铁疏散平台设计工作年限一般为30年或50年。武汉三阳路长江隧道设计时通过调研，将隧道内装饰板的设计工作年限定为30年。考虑到附属构件便于更换，本标准参考《工程结构可靠度设计统一标准》房屋建筑物中易于替换结构构件的规定，将设计工作年限定为25年。

**3.0.9** 海底隧道应针对典型断面或关键部位开展耐久性监测，并宜采用无线传输与采集，实现隧道工程混凝土结构服役性能的实时感知。

## 4 环境

**4.1.1** 本部分环境作用类别及环境作用等级的划分主要针对海底隧道混凝土结构。结构所处区域和环境特点是判断和确定结构所属环境类别的基本依据，对于有分区、分部位进行耐久性设计要求的混凝土结构，比如隧道入口和隧道内部所处的局部环境特点并不相同。因此，在确定了环境类别之后，再根据本标准规定和进一步的环境调研结果，判断混凝土构件所处的环境作用等级。

**4.1.2** 多种环境因素的耦合作用，可能加剧劣化作用。但目前针对耦合作用下的劣化定量研究成果较少，因此本规范将满足每种环境类别下最不利条件的规定作为耐久性设计的基本要求。

**4.2.1** 《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T-50476）和《混凝土结构耐久性设计与施工指南》（CCES 01）中按照结构所处的环境及其对钢筋和混凝土材料的不同腐蚀作用机理，将混凝土结构所处的环境类别分为5类，分别为一般环境、冻融环境、海洋氯化物环境、除冰盐等其他氯化物环境和化学腐蚀环境。《铁路混凝土结构耐久性设计规范》（TB-10005）将环境类别分为7类，与《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T-50476）相比增加了“盐结晶环境”和“磨蚀环境”，并且将正常大气环境中钢筋保护层混凝土碳化引起的钢筋锈蚀称为“碳化环境”；《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T-3310）与《铁路混凝土结构耐久性设计规范》（TB-10005）环境类别基本一致，但混凝土碳化引起的钢筋锈蚀与国家推荐标准保持一致，称为“一般环境”。根据海底交通隧道环境特点，常见混凝土结构耐久性问题为隧道内衬砌的碳化，海水作用下混凝土和钢筋的腐蚀破坏，同时并考虑到隧道洞口工程可能遇到的环境作用，环境类别划分参照《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T-50476），划分为5类。

**4.2.2** 《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T-50476）针对化学腐蚀环境最高环境作用等级为V-E，JTG/T-3310《公路混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T-3310）对化学腐蚀环境最高环境作用等级为V-F。考虑海洋环境硫酸根离子浓度较高，混凝土易产生硫酸盐侵蚀破坏，因此参照《公路混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T-3310）中对于环境作用等级的表达，

增加 V-F 环境作用等级。

**4.2.3** 海底隧道钢结构环境比较复杂，包括大气、海水、土壤等环境，现有相关钢结构耐蚀标准难以覆盖海底隧道钢结构环境。《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性第一部分：分类测定和评估》GB/T19292.1/ISO 9223 大气腐蚀环境分 6 类，C1~C5、CX，JGJ/T 251《建筑钢结构防腐蚀技术规程》根据腐蚀性物质对大气环境分 A~D 四类；本条根据海底隧道钢结构大气环境腐蚀介质分 I、II 一般大气及海洋大气环境。ISO12944-2《色漆和清漆—防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护—第 2 部分：环境分类》水和土壤环境分 4 类，本条根据钢结构所处海洋及土壤环境分 III、IV 海洋高氯环境及化学腐蚀环境。

**4.3.2** CO<sub>2</sub> 浓度、温度和相对湿度是影响混凝土碳化的主要环境因素，其中相对湿度的影响最为显著，因此将相对湿度作为一般环境类别作用等级划分的主要依据。《混凝土结构耐久性设计标准》（GBT-50476）中仅简单规定在不同环境作用等级下的环境条件，同时指出“干燥、低湿度环境指年平均湿度低于 60%，中、高湿度环境指年平均湿度大于 60%”《公路混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT-3310）中规定了不同环境作用等级下环境湿度范围，相比于 GBT-50476 划分更为详细和准确，因此参照公路混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT-3310）中对于湿度的要求，明确一般环境下混凝土结构的环境作用等级。

**4.3.3** 《公路混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT-3310）中对于隧道的构件示例给出一般环境下混凝土结构构件示例，为了更详细规定隧道结构不同位置环境作用等级，按照隧道距洞口段距离划分环境作用等级。但隧道洞口段具体长度的确定没有相关标准，故应用难度很大。

针对海底隧道桩基部分，由于其完全埋入土中，不与大气环境接触，因此海底隧道桩基结构环境作用等级宜取 I-A。

针对海底隧道海域段部分，由于混凝土结构一侧与湿润土体或水接触、一侧与空气接触。与湿润土体或水接触的混凝土处于饱水状态、不易碳化，而接触空气一侧，水分从临水侧迁移供给，混凝土容易碳化。针对该种类型结构，《混凝土结构耐久性设计规范》（GBT-50476）中规定“一般应按 I-C 级环境考虑。如果混凝土密实性好、构件厚度较大或临水表面已做可靠防护层，临水侧的水分供给可以被有效隔断，这时接触干燥空气的一侧可不按 I-C 级考虑”；《铁路混凝土结构耐久性设计规范》（TB-10005）

同样规定“薄型结构的一侧干燥而另一侧湿润或饱水时，其干燥一侧混凝土的碳化作用等级应按 T3 考虑”。海底隧道衬砌结构混凝土密实度好、构件厚度较大，且根据胶州湾海底隧道、厦门翔安海底隧道、武汉东湖隧道等水下隧道空气湿度测试结果，隧道内空气相对湿度一般为 60%~95%，因此海底隧道洞身衬砌结构环境作用等级宜取 I -B。

对于海底隧道洞门、洞口敞开段结构，其与外界环境直接接触，受沿海地区环境的影响结构表面频繁与水接触，因此环境作用等级宜取 I -C。

**4.4.3** 混凝土在反复冻融作用下会造成内部损伤，产生开裂甚至剥落。与冻融破坏有关的环境因素主要有水、最低温度、降温速率和反复冻融次数。由于在海底隧道环境下，海水中的有盐环境会导致混凝土产生盐冻破坏，不仅造成混凝土内部损伤，而且能使混凝土表面起皮剥蚀，盐中的氯离子还会引起混凝土内部钢筋的锈蚀，因此在同等湿度条件下，有盐环境混凝土作用等级提升一个等级。

不同标准中对于冻融环境下混凝土结构的环境作用等级划分基本一致，主要通过温度和结构饱水程度确定，因此本标准中参照《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T-50476）中对于冻融环境下混凝土结构的环境作用等级划分。

**4.4.4** 参照《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T50476）中对于冻融环境下混凝土结构构件示例明确混凝土结构构件示例。

对于海底隧道结构，随着向隧道中部靠近温度逐渐升高、隧道内部冻融问题逐渐减弱，因此对于冻融环境下的海底隧道工程，同样仅考虑离隧道洞口一定范围内的冻融破坏，隧道内部可不考虑冻融破坏。相关文献测试报道了高寒高海拔地区山体隧道内温度分布，测试结果表明即使外界处于严寒环境，隧道内部距离洞口 2km 处温度已经大于 0℃，并且随着外界环境温度的提升，这一距离也逐渐缩短。针对冻融环境下海底隧道结构的耐久性设计，可根据已有气象数据资料和现场调研数据确定受冻融影响结构段的长度，在缺少相关数据的条件下，重点考虑距离隧道洞口 2km 范围内混凝土结构。

**4.5.3** 不同标准中对海洋氯化物环境下混凝土结构环境作用等级的规定基本一致，依据距离海岸线距离和距离水位高度判定。《公路混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT-3310）中对于不同作用等级下的环境条件描述相对较为准确，因此本标准中参照《公路混凝土结构耐久性设计规范》

(JTGT-3310) 的依据进行判断。

**4.5.4** 考虑海底隧道结构的形式，对于隧道的构件示例给出本标准中海洋氯化物环境下混凝土结构构件示例。

**4.5.4** 海底隧道结构的构件维修困难，宜取用较高的环境作用等级。一面接触海水另一面接触空气的混凝土构件，其内部钢筋的锈蚀危险性与其是否能够同时接触到海水与空气相关，如果在使用周期内仅能接触到空气或者海水则环境作用等级较低，否则应提高环境作用等级。对于海底隧道而言，隧道衬砌结构一侧与湿润土体或水接触、一侧与空气接触，衬砌内钢筋锈蚀风险较高，因此认为其环境作用等级不宜低于III-E。如果钻爆法隧道复合式衬砌二次衬砌混凝土浇筑前拱墙部位防水层无渗漏，且防水材料的耐久性满足设计要求时，二次衬砌拱墙部位的海洋氯化物环境作用等级可取III-D。

**4.5.3** 《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)及《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)中对海洋氯化物环境下混凝土结构环境作用等级的规定基本一致，依据环境水体中氯离子浓度和与除冰盐溶液接触情况进行判定。

**4.5.6** 本条海洋大气环境参考沿海桥梁耐候钢选材规范，根据大气氯化物沉淀量进行等级划分，划分依据主要参考日本滨海地区高镍耐候钢选材依据。

**4.6.4** 海底隧道内部由于不产生积雪，无需使用除冰盐。仅在外界使用除冰盐时，通过车辆带入除冰盐溶液，或除冰盐盐雾扩散到隧道内部，因此对于隧道工程除冰盐等其他氯化物环境，仅需考虑隧道洞口一定范围内结构作用。除冰盐盐雾扩散作用，参照《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)中的规定，认为其作用距离为距离洞口段<1000m 范围内；车辆带入除冰盐溶液浓度及作用距离与车流量、冬季喷洒除冰盐的具体用量和频度等多种因素有关，海底隧道设计中可根据当地环境条件按实际调研情况和经验确定。

《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)中对于隧道的构件示例如表 4.6.4a 所示，其中仅简单划分了不同构件的环境作用等级。考虑海底隧道结构的形式，进一步进行划分，给出本标准中除冰盐等其他氯化物环境下混凝土结构构件示例。

**4.7.2** 《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)中对于化学腐蚀环

境作用等级的分类仅包含 C、D、E 三个等级。《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)和《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)中对于化学腐蚀环境作用等级的分类仅包含 C、D、E、F 四个等级，其中 C、D、E 三个等级的判定依据基本一致，依据硫酸根离子浓度、镁离子浓度等判定，《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)和《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)中考虑水体中更高的硫酸根离子浓度，增加了 F 等级。本标准针对海底隧道环境，海水中硫酸根离子浓度相对较高，考虑较高硫酸根离子浓度下的混凝土结构耐久性设计，因此参考《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)中环境等级判定依据进行判定。

《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)中将化学腐蚀环境分为非干旱高寒地区的环境作用等级和干旱、严寒地区的环境作用等级。我国干旱区指干燥度系数大于 2.0 的地区，高寒地区指海拔 3000m 以上的地区，海底隧道建设均处于海洋环境，不存在干旱和严寒环境，在此仅作为补充、列出环境作用等级的要求。

《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)和《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)中指出“对于一面接触含盐环境水(或土)而另一面临空且处于大气干燥或多风环境中的薄壁混凝土结构(如隧道衬砌)，接触含盐环境水(或土)的混凝土按遭受化学侵蚀环境作用考虑，临空面的混凝土按遭受盐类结晶破坏环境作用考虑”。《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)中对于硫酸盐环境作用等级判定已包含《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)和《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)两项标准中对于盐类结晶破坏环境作用等级的判断依据，在此不再进行细分，海底隧道工程耐久性设计过程中可参考相关标准。

## 5 材料

**5.1.2** 《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476) 3.4.4条规定混凝土强度等级应根据 28d 或设计规定龄期的立方体抗压强度, 并按现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB 50107 确定; 公路行业和《混凝土强度检验评定标准》GB/T50107-2010采用的混凝土强度等级均是28天龄期强度值; 《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005-2010 采用的混凝土强度等级是指56天龄期强度值, 《铁路混凝土强度检验评定标准》TB 10425-2019规定钢筋混凝土、素混凝土的强度评定龄期宜采用56天或更长龄期。故设计文件应明确混凝土强度等级对应的龄期。

**5.2.2** 规定海底隧道工程混凝土使用按现行国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175) 规定的硅酸盐水泥或者普通硅酸盐水泥。我国的水泥按《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007) 的分类有: 硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥等。其中矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥等四种硅酸盐水泥允许掺入 20% 以上的不同矿物混合物等量取代熟料, 掺入后其性能随之产生变化。为了有效控制混凝土的质量, 当采用掺入外加剂与掺合料来配制混凝土时, 适用的水泥一般为硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。配制高性能混凝土的主要措施是使用优质活性矿物掺合料。矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥及复合硅酸盐水泥在生产过程中已掺入了各种掺合材料, 而掺合材料的质量、掺入量和掺入方式难以被需方所掌握, 且不同厂家、不同批次的水泥会有不同或是波动, 用这些水泥拌制高性能混凝土质量风险比较大。

粉煤灰或矿渣等矿物掺和料中的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生反应, 使混凝土碱性降低, 抗碳化性能下降。因此, 长期处于干燥 I -A 环境中, 当混凝土保护层厚度低于 20mm, 且水胶比大于 0.5 时, 采用矿物掺和料会加速混凝土碳化, 致使其内部钢筋锈蚀。而长期湿润 I -A 环境中的混凝土构件不易碳化, 可采用矿物掺和料。

水泥中的 C3A 含量过高, 会加快水泥的水化反应进程, 水化热集中于水化早期释放, 导致混凝土收缩增大、抗裂性能下降。同时, 化学腐蚀环

境中的硫酸根离子与 C3A 发生反应，形成具有膨胀性的腐蚀产物钙矾石，从而引起混凝土结构破坏。本规范针对不同环境作用对水泥中的 C3A 含量加以限制，一方面有效控制混凝土凝结硬化过程中温度裂缝的产生，另一方面减少 C3A 含量，抑制硫酸盐腐蚀反应。

对于作用等级较高的化学腐蚀环境下的混凝土，可选用硫铝酸盐水泥和铁铝酸盐水泥。但当环境年平均温度超过 25℃ 时，为减少延迟钙矾石反应破坏，保证混凝土的施工性能，不应采用上述水泥。对于低温硫酸盐腐蚀环境下的混凝土，为防止混凝土碳硫硅钙石腐蚀破坏，不应采用含有石灰石粉的水泥。

**5.2.3** 粉煤灰质量指标要求主要参照《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT 3310）、《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）和《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）标准制定。参照《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT 3310），I 级粉煤灰的 45 μm 方孔筛筛余量不宜大于 12%，II 级粉煤灰的筛余量不宜大于 20%。

氧化钙 CaO 与硫酸盐、C3A 反应生成钙矾石，从而导致混凝土内部产生膨胀应力，控制粉煤灰中的 CaO 含量（不宜大于 10%）可避免钙矾石体积膨胀引起的混凝土结构破坏。

粉煤灰的烧失量直接影响其减水效应和火山灰效应，烧失量越大，需水量越大，从而导致混凝土水胶比增加，严重影响粉煤灰的活性效应和混凝土的性能。因此，针对不同强度等级的混凝土，粉煤灰烧失量及其需水量的控制范围不同。考虑 C50 及以上混凝土强度较高，新拌混凝土对用水量比较敏感，因此对混凝土使用粉煤灰进行了要求。

**5.2.4** 粒化高炉矿渣粉的质量指标要求主要参照《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT 3310）和《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》（GB/T 18046）标准制定。粒化高炉矿渣粉越细，水化活性越高，随之而来的混凝土水化温升、收缩也越大，因此从减少混凝土收缩开裂的角度考虑，粒化高炉矿渣粉的比表面积不宜超过 450m<sup>2</sup>/kg。

**5.2.5** 要求主要参照《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTGT 3310 和《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690 标准制定。硅灰的掺入会增加混凝土的自收缩，同时不利于降低混凝土的温升，通常在工程中与其他矿物掺合料复合使用。硅灰与大量粉煤灰复合使用时，能显著提高混凝土的强度、抗氯离子侵入性能和抗腐蚀性能。

**5.2.7** 本条规定了混凝土用砂的基本要求，为保证混凝土强度、耐久性和体积稳定性等，必须严格控制含泥量和泥块含量等关键指标。考虑海底隧道结构特殊的服役环境，从结构安全性考虑，对细骨料的含泥量和泥块含量做出了特别的规定。细骨料中的云母和轻物质含量高会增大混凝土的用水量，降低骨料与水泥浆体的粘结力，降低混凝土强度。因此，严格控制砂中的云母和轻物质含量，避免其导致混凝土拌合物和易性下降、耐久性降低等问题。

石粉含量波动对机制砂混凝土性能，尤其是施工性能影响较大，机制砂生产过程中应控制石粉含量的稳定性，石粉含量波动宜控制在 2%以内，高石粉含量会增加混凝土中粉体用量，影响混凝土的施工性能。高石粉含量的机制砂适用于制备低强度等级的混凝土。

**5.2.8** 本条规定了混凝土用粗骨料的基本要求，为保证混凝土强度、耐久性和体积稳定性等，必须严格控制含泥量和泥块含量等关键指标。考虑海底隧道结构特殊的服役环境，从结构安全性考虑，对粗骨料的含泥量和泥块含量做出了特别的规定。

具有碱活性的粗骨料，有可能与来自水泥或其他来源的碱（ $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$ ）发生反应，反应产物会使混凝土膨胀引起混凝土开裂和破裂，因此，为保证海水环境混凝土结构的耐久性，严禁使用碱活粗骨料。

骨料吸水率直接影响混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能，尤其对处于严重冻融破坏环境下的混凝土，骨料的吸水率越高，发生冻胀破坏的几率越高，其与浆体界面越容易遭受破坏。

**5.2.9** 本条规定了结构混凝土拌合用水的基本要求，海水中含有大量的氯盐、硫酸盐、镁盐等化学物质，掺入混凝土中后，会对钢筋产生锈蚀，对混凝土造成腐蚀，严重影响混凝土结构的安全性和耐久性，因此严禁直接采用海水拌制和养护钢筋混凝土结构。

**5.2.10** 参照《混凝土外加剂》GB 8076 对外加剂的品质进行规定，并限制外加剂中的氯离子不大于 0.02%，主要是控制混凝土拌合物中总的氯离子含量不超过规定要求。

**5.3.1** 混凝土强度直接关系到结构的耐久性，参考国内外相关规范规定，将混凝土最低强度指标与环境类型和环境作用等级关联；在满足混凝土强度等级的前提下，限制混凝土的最大水胶比可以控制混凝土中游离水量，从而有效地改善其抗渗性、密实性等耐久性能。

**5.3.2** 本条对混凝土强度等级及最小保护层厚度进行了规定，其取值规定参考了《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)、《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01)和《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)，对比不同标准中对混凝土强度等级、水胶比以及保护层厚度，同时由于海底隧道特殊性，选取最严苛值作为设计取值范围。

**5.3.3** 对于冻融环境下混凝土材料与钢筋的保护层最小厚度的规定，《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)、《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)和《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)中的规定均有所不同。《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)中按照引气混凝土对混凝土强度等级进行了规定，《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)和《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)中仅规定了普通混凝土强度等级要求。本标准中参照《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)中的要求，规定混凝土结构相关要求，若采用普通混凝土应适当提高混凝土强度等级。

**5.3.4** 冻融耐久性指数 DF 是实验室快速冻融实验指标，可用于判断不同配合比混凝土材料的抗冻性。为了进一步保障冻融环境下混凝土结构的安全稳定，参照 GB/T50476《混凝土结构耐久性设计规范》和 JTGT-3310《公路混凝土结构耐久性设计规范》中的规定，对混凝土抗冻耐久性指数进行规定。

**5.3.5** 本条将混凝土最低强度等级与环境类别、作用等级相关联，以反映环境特点。其取值规定参考了 GB/T50476《混凝土结构耐久性设计标准》、CCES 01《混凝土结构耐久性设计与施工指南》、TB-10005《铁路混凝土结构耐久性设计规范》和 JTGT-3310《公路混凝土结构耐久性设计规范》，对比不同标准中对混凝土强度等级、水胶比以及保护层厚度，同时由于海底隧道特殊性，选取最严苛值作为设计取值范围。

**5.3.6** 在海洋环境下氯离子在混凝土中的迁移速率控制钢筋脱钝与锈蚀，因此氯离子扩散系数是控制参数，氯盐环境下的混凝土抗侵入性一般用氯离子在混凝土中的扩散系数表示。为了避免海底氯化物环境下氯离子侵蚀导致钢筋锈蚀发生，保障钢筋混凝土结构安全服役，对混凝土的抗氯离子侵入性指标提出要求。

**5.3.7** 本条将混凝土最低强度等级与环境类别、作用等级相关联，以反映环境特点。其取值规定参考了《混凝土结构耐久性设计规范》

(GB/T50476-2008)、《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01)、《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)和《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310),对比不同标准中对混凝土强度等级、水胶比以及保护层厚度,同时由于海底隧道特殊性,选取最严苛值作为设计取值范围。

**5.3.9** 对比不同标准中对混凝土强度等级、水胶比以及保护层厚度,同时由于海底隧道特殊性,选取最严苛值作为设计取值范围。

**5.3.11** 本条对于不同强度等级下混凝土胶凝材料用量范围进行了规定。为保证拌合物的工作性,需限制胶凝材料的最小用量,但当胶凝材料用量过大时,过高的水化热会增加混凝土的开裂可能性。因此,胶凝材料的用量不宜过大或过小。混凝土胶凝材料用量范围依据其取值规定在《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T50476)的基础上,参考《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)和《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)进行了规定。

**5.3.12** 本条对不同水胶比条件下混凝土的矿物掺合料用量范围进行了规定。参考《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)和《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310)进行了规定。

**5.3.13** 本条将混凝土最低强度等级与环境类别、作用等级相关联,以反映环境特点。其取值规定参考了《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)、《混凝土结构耐久性设计与施工指南》(CCES 01)、《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB-10005)和《公路混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT-3310),对比不同标准中对混凝土强度等级、水胶比以及保护层厚度,同时由于海底隧道特殊性,选取最严苛值作为设计取值范围。由于预应力筋处于高应力状态,更易产生应力腐蚀,因而对预应力混凝土的氯离子含量限值的规定更加严格。

**5.4.2** 喷射混凝土需要有足够的胶凝材料增加浆体体积来改善喷射混凝土的喷射工作性。喷射混凝土在喷射过程中,其回弹率和拌合物的均匀性对喷射混凝土的强度和耐久性具有较大影响,因而其最大水胶比和最小胶凝材料用量与普通混凝土存在一定的差别。

**5.4.3** 通过使用矿物掺合料对混凝土力学强度和耐久性能有一定提升效果,但较高的矿物掺合料用量会影响混凝土喷射性能、早期强度和回弹率,如硅灰可改善喷射混凝土的回弹和密实度,掺量小起不到改善作用,但掺

量高混凝土易产生大的收缩同时混凝土黏度增加，不利于喷射施工。因此规定喷射混凝土最大矿物掺合料用量，主要是为了保证喷射混凝土的喷射工作性和混凝土耐久性能。

**5.4.5** 砂的细度模数过细会导致喷射混凝土产生过大的收缩，细度模数过大对喷射混凝土的和易性和喷射效果产生影响。

**5.4.6** 为加速喷射混凝土的凝结、硬化，提高早期强度和减少喷射混凝土施工过程中的回弹，一般在喷射混凝土中加入速凝剂。普通有碱速凝剂使水泥在水化初期形成疏松的铝酸盐水化物结构，增加了发生混凝土碱集料反应的可能性，同时碱性速凝剂对混凝土的后期强度削减较大，一般强度损失在 20%~50%。此外有碱液体速凝剂由于其碱性较强，在混凝土的喷射过程中会给操作人员的皮肤与呼吸道等部位造成较大损害。而液体无碱速凝剂具有喷射混凝土早期强度高，后期强度损失小，喷射后回弹率小等优点，适用于早强喷射混凝土，因此规定使用无碱速凝剂。

速凝剂掺量过大，会影响喷射混凝土的喷射效果及后期强度，因此速凝剂的掺量不宜超过 10%，以便降低速凝剂对混凝土强度的影响。

**5.4.7** 海洋环境下喷射混凝土直接与岩层海水接触，海水中硫酸盐导致喷射混凝土产生侵蚀破坏，考虑初支结构承载作用，对喷射混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能做出相关规定。喷锚结构与衬砌结构同寿命，因此要求喷射混凝土抗硫酸盐侵蚀性能同样满足表5.3.10的规定。

**5.4.8** 本条参照标准 PD CEN/TR 16142: 2011 的规定，对喷射混凝土的溶蚀等级进行划分。混凝土的钙离子有效扩散系数  $pDe$  的试验步骤如下。

1) 通过测试钙离子在溶蚀 14d 后的累计释放量( $mg/m^2$ )，计算混凝土钙离子的有效扩散系数。试验温度控制为  $20 \pm 2^\circ C$ ，试件的尺寸宜为  $100 \times 100 \times 100 mm^3$ ，但不应小于  $40 \times 40 \times 40 mm^3$ 。

2) 采用浓度为  $1.40 \sim 1.42 g/cm^3$  的浓硝酸、 $1.0 \pm 0.1 mol/L$  的稀硝酸和去离子水配置电导率小于  $1 \mu S/cm$ ，pH 值 4~7 的溶蚀溶液，并注入水箱中。

3) 将试件完全浸没与溶蚀溶液中，试件表面位于溶蚀溶液液面以下至少 20mm 处。

4) 按照  $6.0 \pm 0.6h$ ， $24.0 \pm 2.4h$ ， $78.0 \pm 7.8h$ ， $168.0 \pm 16.8h$ ， $336.0 \pm 33.6h$  的溶蚀龄期更换溶蚀溶液。

5) 每次更换溶液前，采用等离子体发射光谱(ICP)仪测试溶液的钙离

子浓度。

6) 将溶蚀至规定龄期的试件置于  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  的烘箱内烘至恒重, 取出放在干燥器中冷却至室温, 并称重, 记录其干燥质量。采用式(1)和(2)计算试件的干密度和干燥状态下的溶蚀质量。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$$U = m - m_0 \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为试件干密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $U$  为试件干燥状态下的溶蚀质量,  $\text{mg}$ ;  $m$  为试件溶蚀至规定龄期的干燥质量,  $\text{mg}$ ;  $m_0$  为试件未溶蚀前的干燥质量,  $\text{mg}$ 。

7) 采用式(3)和(4)计算试件的钙离子有效扩散系数  $pD_{e,i}$ 。

$$D_{e,i} = \frac{\pi(E_i)^2}{4(M_i\rho)^2(\sqrt{t_i} - \sqrt{t_{i-1}})^2} \quad (3)$$

$$pD_{e,i} = -\log_{10} D_{e,i} \quad (4)$$

式中,  $pD_{e,i}$  为第  $i$  次测量的混凝土溶蚀系数;  $E_i$  为第  $i$  次测得的钙离子溶出量,  $\text{mg}/\text{m}^2$ ;  $M_i$  为第  $i$  次溶蚀质量占烘干试件的质量比,  $\text{mg}/\text{kg}$ ;  $\rho$  为试件干密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t_i$  为第  $i$  次溶蚀龄期,  $\text{h}$ ;  $t_{i-1}$ ——第  $i-1$  次溶蚀龄期,  $\text{h}$ 。

**5.6.1 海底隧道防排水材料的选用**必须遵循《建筑与市政工程防水通用规范》GB 55030—2022中提出的基本原则, 并结合工程的特点和功能要求进行妥善的考虑。

1 海底交通隧道的常见工程使用环境条件包括: 长期受到地下水的渗流冲刷和水压作用、水中存在浓度较高的各种盐类离子、全年一定的温度差、交通荷载及振动、围岩及衬砌结构产生的挤压变形及压力, 应综合分析防排水材料所处的使用环境条件, 选用性能指标与之适应的防排水材料。

2 一道防水层指具有独立防水功能的构造层, 每道防水层均应具备一定的厚度要求, 以满足防水功能要求。防水材料的厚度是构成一道防水层的最低要求和耐久性的重要基础, 其与材料特性、施工方式、基层状况等相关, 可根据工程需要参照《建筑与市政工程防水通用规范》GB 55030—2022、《地下工程防水技术规范》GB 50108 等标准确定厚度。

3 在选择海底隧道防排水材料时, 必须考虑其安全和环保特性, 应符合国家现行相关安全标准, 确保使用过程中不会对海洋生态环境造成危害,

以确保隧道的安全、可靠和环保运营。在明确其有害物质限量时，可参考国家现行标准《建筑胶粘剂有害物质限量》GB 30982、《建筑防水材料有害物质试验方法》GB/T 41078 及《建筑防水涂料中有害物质限量》JC 1066 等标准的规定。

**5.6.2** 目前在隧道工程中所使用的防排水材料，包括防水板、防水涂料、密封材料、排水管道等几个大类，主要采用高分子类原料制成（包括沥青、橡胶、合成高分子、聚合物基复合材料等）。虽然材料种类繁多，但高分子材料及聚合物基复合材料来说，其“腐蚀”或“老化”的机理大致相同，主要来源包括紫外线辐射、氧、臭氧、水、温湿度、化学介质、应力、微生物等因素。但是在不同的工程使用环境和工作条件下，所存在影响因素也有较大区别，对应的老化机理也有较大差异，因此，需要根据海底交通隧道中各防排水材料所处的实际使用环境和工作条件进行合理分析，选择适用的老化测试指标和方法进行耐久性的评定。本条专指高分子类防排水材料，是为与后续条文中的灌浆材料（无机材料为主）进行区分。

考虑到高分子类材料在老化性评定方面的复杂性，以及现行《建筑防水材料老化试验方法》GB/T 18244 的测试要求，本条文中规定各类防排水材料至少应满足各单项影响因素条件下的耐久性评定，其结果不应低于设计使用工作年限的要求。常用的材料老化测试方法，主要包括自然老化和人工加速老化两大类。其中自然老化的试验周期长、影响因素多、结果分析方法复杂，虽然其结果相对准确，但是在工程实践中主要是以积累各类材料的自然老化数据库为主，为室内人工加速老化的结果评定提供一定的指导。目前较为常用的高分子材料老化性能评定方法仍然是以人工加速老化测试为主，包括热空气老化、臭氧老化、湿热老化、氙弧灯照射老化、紫外荧光灯照射老化等，不同的老化测试方法对应于不同的工程使用环境和工作条件，在选用时不应混淆，造成对材料性能的误判。本条只规定了各单项影响因素作用下的材料耐久性评定，最差的单项评定结果也应满足海底交通隧道对防排水材料的耐久性要求（与隧道主体结构的设计工作年限同步）。一般来说，各类高分子材料的某项性能指标（拉伸强度、断裂伸长率、粘结强度等）保持率降低到 50%时，认为其达到了使用寿命期限。但由于高分子类防排水材料品类众多、材料成分和特性差异也很大，老化评定方法和依据也有差别，因此在条文中并未明确相应的评定标准，在开展相应的耐久性测试和评定时，应根据材料的种类和失效机理选择可靠的

测试方法和使用寿命计算依据，对材料的耐久性进行合理评定。

1 耐水性是指防水材料在浸水后保持其完整性的能力，是防水材料的核心性能之一。根据《建筑与市政工程防水通用规范》GB 55030—2022 第 3.3.1 条的规定，当防水材料在不低于 23℃ ×7d 试验条件下进行浸水试验，如防水卷材吸水率≤4%，防水涂料与基层的粘结强度浸水后保持率≥80%时，可以不再检测 23℃ ×14d 条件下浸水的外观。高分子类排水管材的浸水性能测试可以参照高分子防水卷材的试验条件和方法进行。密封胶应进行浸水后定伸粘结性和断裂伸长率的测定；遇水膨胀类密封材料，应进行长期浸水后体积膨胀倍率保持率的测定。

2 本条源自《建筑与市政工程防水通用规范》GB 55030—2022 第 3.3.2 条的规定。目前在高分子材料领域，用热老化测试表征高分子类材料的热老化性能是一种常见的方法，因此规定必须要进行热老化性能的测试和评定。但也应注意到不同类别材料在不同温度下的老化失效机理的差异，避免与材料耐热性指标混淆，因此规定了沥青及橡胶类材料的热老化测试试验温度为不低于 70℃。此外，由于海底交通隧道的防排水基本不涉及外露的使用场景，因此未对外露使用的防水材料人工气候加速老化试验进行规定。

3 由于海底隧道长期处于海水渗流和冲刷的影响中，防排水材料在海水环境条件下的耐腐蚀性介质的性能必须满足要求。海水中主要含有氯离子、硫酸根离子等腐蚀介质，因根据工程所处的地理位置、海水离子种类及浓度变化，并参照国家现行有关标准及各类材料的产品规范，选择含有对应腐蚀性离子的溶液和选用合理的离子浓度，开展耐腐蚀性介质环境条件下的耐久性测试。

4 本条源自《建筑与市政工程防水通用规范》GB 55030—2022 第 3.5.1 条的规定。目前常用的密封胶也主要是高分子产品。大量的工程应用经验表明，密封胶开裂失效主要是其中填充的低聚物挥发迁移所致。本条根据材料特性规定了质量损失率要求，以控制低聚物的加入量，延长密封胶的使用寿命。

5 目前在海底隧道中常用的定型密封材料包括止水条、止水带、弹性密封垫、密封圈等，大部分为橡胶类制品。对此类预制定型橡胶类制品，还需考虑存放时间造成的物理老化。因此，如果在隧道建设期间对此类材料成品存放时间过长时，还宜按照国家现行有关标准及各类材料的产品规

范的要求，增加压缩永久变形测试试验。

**5.6.3** 细部节点部位是防水层中容易出现渗漏的地方，比如防水卷材搭接缝、不同材质防水材料叠合或搭接、施工缝和变形缝、管口孔口止水等部位，一般需要手工处理，受到材料特性、施工空间、基层状况的变化等影响，现场实施的质量可能存在波动，也需要重视对细部节点的防水处理措施的耐久性测试和评定。在进行影响因素的确定及测试方法选用时，需要考虑细部节点部位处在长期运营条件下的工作状况，如长期浸水及腐蚀性介质环境等，确定各单项影响因素及有针对性的老化测试试验条件和方法，并以性能保持率为评价指标，对细部节点处理措施在单项影响因素作用下的耐久性进行评定。本条只规定了各单项影响因素作用下的材料耐久性评定，最差的单项评定结果也应满足海底交通隧道对防排水材料的耐久性要求（与隧道主体结构的设计工作年限同步）。

**5.6.4** 海底交通隧道建设期间，在通过风化槽、断层破碎带等不良地质区域的时候，通常需要进行帷幕注浆或超前注浆，以减少地下水的入渗和保证隧道施工安全。目前常选用水泥为基材的灌浆材料，辅以各种外加剂或与高分子化学浆液部分复合，以满足快速、安全灌浆作业及保持长期工作性能的要求。因此，本条条文以无机类灌浆材料为对象，确定其耐久性的测试和评定方法。如果工程中采用化学类灌浆材料，应根据材料特性和老化机理，经过相关责任主体论证，选用适宜、可靠的测试和评定方法，对其耐久性进行评定。

目前针对海底隧道的注浆材料耐久性问题，尚未得到较为深入和系统的研究，相关规范中也暂时未见专门的试验方法和评定要求。此处参考涂鹏的博士毕业论文《注浆结石体耐久性试验及评估理论研究》（2012年，中南大学）中的研究成果，初步提出了一些适用的测试指标和方法，供开展海底隧道灌浆材料耐久性评定时参考。可参照《水泥胶砂强度检验方法（ISO法）》GB/T 17671的要求进行试块的制样，并按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082的方法开展抗氯离子渗透、抗硫酸盐侵蚀、碱-骨料反应、收缩试验（接触法）等试验。

对以上测试项目的选择是基于如下考虑：（1）海水中通常存在大量的氯离子和硫酸根离子，对无机类灌浆材料的结石体造成膨胀、酥松，或者部分水化产物的溶蚀流失；（2）当隧道穿过地层中存在带有碱活性的围岩时，灌浆材料也可能会出现碱-骨料反应，造成围岩膨胀和结石体破碎，

抗渗性能降低；（3）在长期的流动地下水环境下，灌浆结石体中的水化产物也可能出现溶蚀，造成体积收缩、渗漏水通道增多。但总体上，由于对海底隧道围岩注浆材料的耐久性研究和认识尚不足，因此还应不断积累经验和深入探索，以提出更为合理、可靠的耐久性评定方法。

**5.6.5** 目前针对高分子材料的耐久性综合评定是一个技术性难题。针对单一因素影响条件下的材料失效机理和耐久性评定尚取得了一定的进展，部分人工加速测试方法与自然环境老化之间的关联已经初步得到了明确。但是，由于工程环境条件的复杂性，防排水材料在实际工作环境与条件下会受到众多因素的影响，如大气环境、腐蚀性介质、应力环境乃至材料中的助剂迁移等，使得材料的老化机理和性能衰退的评定成为了一个极其困难的工作。此外，室内的人工加速老化与材料在工作环境条件下的老化时间对应关系，在综合因素作用下也难以进行合理的评定，这些都为防排水材料以及防排水系统的耐久性评定制造了障碍。一方面，还需要通过工程数据统计和实验室模拟，建立防排水材料和系统耐久性和可靠性的评价方式，最终实现防排水系统耐久性和可靠性的定性定量分析。另外一方面，还需要继续加强对防排水材料和系统失效机理的深入研究，以探寻更为合理的材料和系统耐久性评定方法和标准。

在瑞士阿尔卑斯山的Gotthard铁路隧道中开展了一些相关的综合因素影响下的耐久性评定试验，也许可以提供一定的参考和借鉴。这座隧道埋深最大达到2500m，岩层温度45° C，地下水为强碱但也会出现酸性水，地质条件恶劣，因此对防排水系统的要求也高，需要进行长期的实验对防排水系统的耐久性进行评估。实验包括如下内容：（1）材料实验：决定防水材料在化学和物理应力作用下的防水和排水能力；（2）压剪实验：测定防排水系统在岩石压力和温度作用下的行为，检查防排水材料的功能；（3）现场实验：决定现场施工的标准，包括基面、铺挂和连接工艺，检查防排水材料的铺设属性和密封状态。一共4家实验单位和14种防水系统进行了测试。该试验进行了长达两年的时间，考虑了不同的地温条件、水质条件、喷射混凝土基面条件、压力条件，对防排水材料进行了长期的测试和观察。对于此类重要的隧道，有必要开展较为复杂和综合的实验测试工作，但耗时较长、成本也较高。不过该隧道的做法也为我国海底交通隧道提供了一些借鉴：有条件时，也应结合具体工程的特点和要求，开展时间跨度较长的模拟和现场实验，以具体探明隧道防排水材料和系统的耐久

性和可靠性，为防排水材料的选用提供较为可靠的依据。

此外，随着近年来国家标准体系的转变，不久将出台《建筑防水卷材安全和通用技术规范》和《建筑防水涂料安全技术规范》，其中会针对常用防水材料的耐久性能也进一步梳理和明确，并重视工程使用环境条件与应用场合对材料进行耐久性评定的区分。因此，随着技术的发展进步和认识的不断深入，对海底交通隧道防排水材料和系统的耐久性评定也将会逐步进入一个新的高度。还应注意到，由防排水“材料”所组成的“系统”，才是最终发挥工作效能的设施，对隧道防排水的功能和运营安全提供保障，因此我们的注意力也应逐步从单一的各类“材料”，转向对“系统”的关注，对“系统”的总体耐久性和可靠性的评定也还需要得到重视和进一步研究。

## 6 盾构法隧道

**6.1.1** 盾构法隧道断面形状一般为圆形，也有类矩形、马蹄形等断面形式，海底隧道承受水压一般较大，异形断面受力条件较差，故规定海底盾构隧道断面宜为圆形。

**6.1.2** 《混凝土结构耐久性标准》（GB/T 50476-2019）6.4.6 条规定“重要配筋混凝土结构的构件，当氯化物环境作用等级为 E、F 级时，应采用防腐蚀附加措施”，海底盾构隧道衬砌管片外弧面直接接触海水，环境作用等级为严重或非常严重，故应采取防腐蚀附加措施。

**6.1.3** 盾构隧道内管线支架如果大量采用植筋和后锚固方式安装，经常发生钻孔打断钢筋、钻孔距离接缝防水密封垫太近等现象，影响结构耐久性。

**6.1.4** 目前盾构隧道多为单层衬砌结构，结构外侧无全包的防水措施，外侧渗水通过管片接缝进入隧道内部后，若未设置完善的排水系统，渗漏海水在隧道内滞排，对隧道内附属构件的耐久性的影响较大。

若为大直径多层的盾构隧道，各层之间的排水系统的连接和通畅也需要着重考虑。

**6.2.1** 盾构隧道衬砌管片类型有混凝土平板型管片、混凝土箱型管片、钢管片、铸铁管片等多种类型，海底隧道处于氯盐腐蚀环境，从保证衬砌结构耐久性考虑，宜采用混凝土平板型管片。根据《建筑与市政工程通用防水规范》的规定，混凝土抗压强度等级不应低于 C50。

**6.2.2** 裂缝不仅会使工程的整体结构和受力状态发生变化，而且还会影响工程的耐久性，提高管片混凝土的抗裂性在海底隧道中显得尤为重要。可采取加强管片养护、掺加纤维等措施。

**6.2.5** 目前横通道处盾构隧道特殊衬砌环有三种做法：混凝土管片（后期切割）、全环钢管片、钢管片与混凝土管片组合。氯盐环境中普通碳素钢的防腐问题很难解决，故海底盾构隧道横通道处宜选用混凝土管片，如果采用钢管片，应选用 316 不锈钢、双相不锈钢等具有良好耐腐蚀性的钢材。

**6.3.1** 盾构隧道连接螺栓一般采用碳素钢，并在表面采用粉末渗锌、锌基铬酸盐涂层等措施进行防腐处理。但海洋环境中，上述措施很难保证螺栓的耐久性，故建议选用不锈钢螺栓，当采用耐候钢或普通碳素钢螺栓时，

表面应采用多元合金共渗等可靠的防腐措施。

**6.3.4** 防腐层的检验标准和方法应满足《钢结构件渗锌耐蚀作业质量控制评定技术规范》（GB/T 35505）的相关要求。

**6.4.2** 《盾构隧道工程设计标准》GB/T 51438 规定单块检漏试验标准为：管片外表在设计抗渗压力下，恒压 2h，最大渗水深度不得超过主筋保护层厚度。但是实际工程中，随着隧道埋深增大，检漏试验水压值随着增大，试验时安全性较差，故可在试验用水压一定时，通过增加恒压时间的方式进行等效。建议：①P12 等级按照管片外表在 0.8Mpa 水压力下，恒压 3h，最大渗水深度不超过 50mm；②P15 等级按照管片外表在 0.8Mpa 水压力下，恒压 4h，最大渗水深度不超过 50mm。

**6.4.3** 接缝采用密封垫进行防水，接缝总长度是隧道长度的20余倍，确保接缝防水材料防水性能的耐久性至关重要。

密封垫按功能可分为三类：弹性密封垫、遇水膨胀橡胶密封垫、弹性密封垫与遇水膨胀橡胶复合密封垫。密封垫设计除了要满足防水性能外，还应提出耐久性指标。根据国内设计规范，密封垫材料的一般以硬度、拉伸强度、伸长率等拉伸力学指标来评价防水材料的耐久性。上海长江隧道工程对密封垫进行了专题研究，提出以接触应力松弛的时变特性来表征防水密封垫防水性能的耐久性。

**6.4.4** 嵌缝作业时间根据施工方法、隧道稳定性、施工进度以及现场测试资料等确定，且在无明显渗水后进行。嵌填防水材料时，先刷涂基层处理剂，嵌塞应表面平整，密实、连续、饱满、牢固。

**6.4.6** 嵌缝内一般设置 PE 泡沫条，可起到引排接缝渗漏水的作用，因此可在内衬施工时，将 PE 泡沫条在排水沟位置引出，将运营期可能出现的渗漏水引排至排水沟中，防止渗漏水堆积在内衬和管片的界面，导致内衬破坏。

**6.5.1** 防腐涂层设置范围为管片外弧面至接缝密封沟槽上部，宜为环氧或改性环氧类封闭型材料、水泥基渗透结晶型或硅氧烷类材料。防腐蚀涂层应具有良好的耐化学腐蚀性、抗微生物侵蚀性、耐水性、耐磨性，并应无毒或低毒。防腐蚀涂层应满足在盾尾刷挤压和摩擦下不损伤、不渗水。

各种附加防腐措施的材料品质与具体技术要求可参照《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的规定。

**6.5.2** 由于明挖法隧道、钻爆法隧道和盾构法隧道中混凝土用表面涂层的

工作环境不同，对表面涂层的性能指标要求也不尽相同，因此本部分未对表面涂层的具体性能指标进行规定。

**6.5.3** 硅烷、硅氧烷类憎水剂浸渍混凝土表面,即是这种憎水剂渗入混凝土毛细管中的深度只有数毫米，但由于它与水泥的水化产物发生化学反应，反应物使毛细孔壁憎水化，使水分和水分所携带的氯化物难以渗入到混凝土内部腐蚀钢筋。

每个工程的混凝土构件所处环境、材料、施工工艺等不尽相同,在室内材料及性能检测的基础上，现场混凝土表面涂层和硅烷浸渍大面积施工前，需在实体工程典型构件上选择一定面积，采用设计的材料进行试验,验证能满足保护效果的材料用量、施涂遍数、施涂时间间隔等后，方能正式施工。

**6.5.4** 行业标准《钢筋混凝土阻锈剂》（JT/T 537）中，钢筋混凝土阻锈剂按照作用效果分为以无机盐为主的阳极型阻锈剂（I 型），以有机醇胺为主的复合型阻锈剂(II 型和 III 型)。目前阳极型阻锈剂主要为亚硝酸盐，在海洋环境下或氯盐较高的条件下，亚硝酸盐阻锈剂应保证足够的用量，否则可能引起加速腐蚀的问题。但亚硝酸盐具有一定的致癌性，对人体有害，目前在德国、瑞士已禁止使用亚硝酸盐阻锈剂。在国内也逐步限制了亚硝酸盐阻锈剂的应用，广东省于 2018 年发布《广东省公路水运工程拟淘汰的落后施工工艺、设备、材料目录》，目录中指出“应禁止使用亚硝酸盐类钢筋阻锈剂采用不含亚硝酸盐类成分的钢筋阻锈剂替代”；福建省于 2021 年发布《福建省公路水运工程拟淘汰危及生产安全施工工艺、设备和材料目录》，目录中指出“应禁止使用亚硝酸盐类钢筋阻锈剂采用不含亚硝酸盐类成分的钢筋阻锈剂替代” 目录中同样指出“禁止使用亚硝酸盐类钢筋阻锈剂采用醇胺类有机阻锈剂、复合类阻锈剂等替代”。考虑亚硝酸盐类阻锈剂对环境 and 工人的影响，目前逐渐被淘汰并采用醇胺类有机阻锈剂、复合类阻锈剂等替代，因此本标准中限制了无机盐阳极型阻锈剂的应用，推荐以有机醇胺为主的复合型阻锈剂(II 型和 III 型)。

**6.5.5** 为了避免阻锈剂本身对混凝土内碱含量、氯离子含量和硫酸根含量的影响，对阻锈剂的匀质性指标进行规定，同时为了保障阻锈剂效果的稳定、防止由于分层导致的效果差异和性能影响，增加了均匀性的要求。根据钢筋混凝土阻锈剂试验研究及其工程实践发现，钢筋混凝土阻锈剂对混凝土或砂浆的初终凝时间、抗压强度和坍落度等会有一定程度的影响，为

了控制阻锈剂对混凝土性能的影响，因此提出相应指标要求。此外为了保证阻锈剂作用效果，对阻锈剂阻锈性能指标进行规定。

**6.5.7** 目前阻锈剂市场鱼龙混杂，为了保证阻锈剂性能的可靠性和真实性增加此条规定。重点在于快速评判阻锈剂效果，便于筛选具有阻锈效果的阻锈剂产品。参照《钢筋混凝土阻锈剂》（JT/T 537）中针对盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比的要求，通过钢筋锈蚀面积比对比钢筋阻锈剂阻锈效果的优劣，为了更加有效筛选阻锈效果优异的阻锈剂，本标准中规定阻锈性能应满足钢筋阻锈剂快速评价方法锈蚀面积百分率比不大于20%。

**6.5.8** 目前内掺型阻锈剂种类很多，可能和常用的减水剂、矿物掺合料之间发生不良反应，需经试验确定，预防上述情况发生。

**6.5.9** 阻锈剂的加入提高了钢筋锈蚀发生时的氯离子阈值，无论是初始混凝土中的氯离子含量、还是外部侵入的氯离子，应相加计算氯离子总量，由此来作为选择阻锈剂用量的根据。目前有些标准中给出了某种阻锈剂的用量范围,但不能涵盖所有种类阻锈剂。在实际工程中,除参考产品说明书、相关标准外,对重要工程建议通过试验确定掺量。

**6.5.11** 纤维在土木工程材料含有提高性能、抗阻裂功效，向一般混凝土中掺加纤维，能够阻拦混凝土初期的容积收缩，抵御混凝土内部结构造成微裂缝能力，提升抗裂性能。纤维的抗裂原理通常是避免开裂的拓展及其阻拦缝隙与裂缝间的全线贯通的功效，其临界值间隔值 10mm。掺入多种纤维的混凝土抗裂性能好于掺入单一纤维的混凝土。

**6.6.1** 精度检测要求应符合《预制混凝土衬砌管片生产工艺技术规范》（JC/T 2030）的要求，同时钢模精度应满足管片制作精度的需要，若不合标准需进行校正。

当成品管片测量结果超标时需再次对模具进行三维激光扫描检测并调整。

**6.6.2** 衬砌环整环水平拼装允许误差参照《盾构法隧道施工及验收规范》（GB 50446）和《盾构隧道工程设计标准》（GB/T 51438）的相关要求，考虑到海底隧道的服役环境更加恶劣，对管片水平拼装的误差的要求更为严格。

**6.6.3** 钢筋混凝土衬砌管片需在高精度钢模内制作成型，所用管片应进行三维激光扫描检验，检测频率为 100 环检测一次。此外每生产 15 环管片应抽检 1 环管片进行几何尺寸和注浆保护层厚度检验,检测方法可参照《预

制混凝土衬砌管片》（GB/T 22082）的相关要求执行。

**6.6.4** 管片拼装后的同步注浆分布，能否有效形成管片背后的保护圈，对管片耐久性至关重要。

物探测点布置建议：环向物探测线布置于管片中部，一般段建议30m一处，风险点地段建议6m一处；纵向物探测线应布置于相邻预留注浆管的中间位置。纵环向测线的布设应结合后配套空间及口子件、浆液流动等情况综合确定。

对于物探异常部位，必要时可采用钻孔验证。

**6.6.5** 暴露在混凝土外的钢构件容易锈蚀，若这些构件和混凝土构件内钢筋相接触，易形成电化学腐蚀的阴阳极，加速混凝土内钢筋的锈蚀。

## 7 钻爆法隧道

**7.1.3** 喷锚衬砌具有施工灵活简便、工序少、进度快、工程造价低等优势，在隧道及地下洞室中应用广泛。但喷锚衬砌表面渗漏水问题很难彻底解决，尤其是海底交通隧道工程，渗漏水对运营安全性、舒适性和设施设备耐久性均有影响，故规定交通隧道应采用复合式衬砌，对不影响正常运营的辅助坑道，根据具体情况，可采用喷锚衬砌。从对喷锚衬砌的耐久性研究成果来看，海洋氯化物环境下实现设计工作年限 100 年的目标，在喷射混凝土原材料、防腐剂、锚杆材质和防腐措施方面均需特殊考虑，实现难度较大。考虑到兼做运营服务使用的辅助坑道在运营期间维修养护难度较小，故规定设计工作年限不应低于 50 年（铁路隧道设计规范要求设计使用年限为 60 年）。

**7.1.4** 海底隧道纵断面呈“V”形坡，渗漏水需通过机械抽排至隧道外，渗漏水量是排水系统设计的基础，对隧道结构和防排水系统的耐久性也有影响。国内外海底隧道均对渗漏水量进行控制，如日本青函海底隧道允许排放量  $0.27\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ；挪威海底隧道规定的允许渗漏水量一般为  $10\sim 30\text{L}/(\text{min}\cdot 100\text{m})$ ，即  $0.144\sim 0.432\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ；香港规定的允许渗漏水量一般为  $5\sim 50\text{L}/(\text{min}\cdot 100\text{m})$ ，即  $0.072\sim 0.72\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ；青岛胶州湾隧道每条主线隧道平均渗漏水量约  $0.25\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ 。允许的渗漏水量指标越低，意味着建设期用于预注浆和径向注浆的堵水费用越高，因此有必要针对不同项目的具体建设条件，通过研究分析确定合理的渗漏水量控制标准，条件允许时也可采用全包防水。

**7.2.1** 建议加强喷射混凝土早期强度的原位检测频次，每  $10\text{m}\sim 12\text{m}$  施工单位和监理单位均应分别进行原位检测，其中隧道左右边墙和拱部分别检测，检测时间分别为喷射混凝土完成后 8 小时、24 小时，并进行强度试验，喷射混凝土早期强度可参照《铁路隧道设计规范》（TB 10003-2016）。

**7.2.2** 我国钻爆法隧道喷锚衬砌多用网喷衬砌，喷射混凝土中钢筋网容易造成喷射混凝土局部不密实，海底隧道钢筋锈蚀严重，故推荐采用喷射纤维混凝土。

**7.2.4** 《混凝土结构耐久性标准》（GB/T 50476-2019）6.4.8 条规定“氯

化物环境中，用于稳定周围岩土的混凝土初期支护，作为永久结构考虑则应满足相应的耐久性要求；否则不应考虑其中的钢筋和型钢在永久承载中的作用”。

**7.3.1** 海底交通隧道二次衬砌可掺入纤维提高混凝土的极限拉伸应变和断裂能，从而提高混凝土的抗裂韧性，改善混凝土脆性破坏特性。

**7.4.4** 隧道内集水池有效容积需满足一定时间内对应排水分区的渗漏水总量，主要是考虑发生停电、水泵故障等突发事件时，为隧道运营维护预留充分的应对时间，避免造成安全事故。《公路水下隧道设计规范》12.2.2条规定：洞内清水集水池有效容积可取排水分区内 24~48h 结构渗漏水总量总和。但从国内几座海底隧道建设和运营管理实践来看，如果隧道洞口附近有管理中心，并配置应急发电装置、备用水泵，应急排水所需的时间可缩短，故本标准规定渗漏水集水池有效容积不宜小于排水分区内 8 小时的隧道渗漏水总量。

**7.5.5** 普通钢筋、普通钢筋+阻锈剂方案未必满足工程耐久性要求，需结合理论和试验进行验证。

## 8 沉管法隧道

**8.1.1** 据调研，目前国内外建成的 150 多座沉管隧道绝大部分为钢筋混凝土结构，工程设计与建设经验丰富。另有约 30%的沉管隧道采用钢壳混凝土组合结构，且主要集中在日本、美国等国家。近年来，我国已经建成的 10 余座沉管隧道均采用钢筋混凝土结构。港珠澳大桥沉管隧道采用节段式钢筋混凝土管节，最终接头采用钢壳-混凝土组合结构形式。在建的深中通道海底隧道 32 个管节全部采用钢壳-混凝土组合结构形式，系国内首次采用、世界上目前最大规模的钢壳混凝土组合结构的沉管隧道。

**8.1.2** 国外第一条沉管隧道采用的是整体式管节，整体式管节也是目前沉管隧道应用最多的管节纵向结构形式，例如我国建成通车的珠江、常洪、外环、仑头-生物岛-大学城等沉管隧道均采用整体式钢筋混凝土结构，在建深中通道沉管隧道采用整体式钢壳混凝土组合结构。

为控制混凝土浇筑的早期裂缝，同时降低管节纵向受力、加大管节长度，荷兰科恩隧道首次成功应用节段式管节，后续在欧洲，尤其是荷兰有较多采用，厄勒海峡隧道、韩国釜山巨济海底隧道等 10 余座隧道采用了这类结构。

管节采用半刚性纵向结构形式，既能降低结构纵向受力，又能增强节段接头刚度和防水性能，港珠澳大桥沉管隧道在国内外首次采用这种形式。

**8.2.2** 钢筋混凝土整体式管节通常采用环向施工缝分段、水平施工缝分块来浇筑混凝土。施工缝容易成为薄弱环节，钢筋混凝土整体式管节的工艺发展呈现减少施工缝的趋势，如襄阳鱼梁洲沉管隧道采用顺次全断面浇筑工艺，广州车陂路沉管隧道采用分段跳仓全断面浇筑工艺，均取消了水平施工缝。

钢壳混凝土管节通过钢材焊接质量来保证结构整体性和防水性能，水密性要求针对迎水面钢材的焊缝。

**8.2.3** 节段长度取 18~25m，能够较好平衡混凝土浇筑质量、总体施工工效、管节受力等要求。一个管节的所有节段预制完成后进行纵向临时预应力张拉；完成管节平移或转运、浮运、安装后，在确保工程安全的前提下选择时机对临时预应力进行剪断，并对管节上预留的剪断手孔进行封堵处理。

**8.2.4** 半刚性管节的节段预制工艺与节段式管节相同，纵向预应力的防水与耐久性要求远高于节段式管节。

**8.3.1** 管节接头、节段接头及最终接头是沉管隧道结构及防水的薄弱环节，应具有抵抗各种变形的能力及水密性要求，以保障接头施工期和运营期安全性。通过纵向结构计算可确定接头设计荷载及张开量，据此开展接头构造设计。纵向计算时，应综合考虑基础地基刚度差异、混凝土收缩徐变、温度变化、地震产生的变形和应力等因素。

**8.3.3** 管节接头可分为柔性接头和刚性接头，主要包括防水构造、剪力键等。

**8.3.4** 钢端壳作为 GINA 的安装构件及对接构件，一般分为 A 型钢端壳（安装 GINA 止水带）及 B 型钢端壳（提供 GINA 的对接端），分别设置于管节接头两侧，沿顶板、底板和侧墙形成环状。钢端壳的主要功能包括：作为安装 GINA 橡胶止水带和 OMEGA 橡胶止水带的基座；由钢端壳面板与管段纵轴线间的夹角根据沉管隧道纵坡来拟合钢端壳；在水力压接过程中，将水压力传递至相邻管节。

**8.3.5** 管节接头的水密性是通过水力压缩 GINA 止水带实现的。在管节对接完成之后，OMEGA 止水带作为第二道止水措施被安装在管节接头内侧，应根据各管节接头的水深条件，结合纵向静力计算和抗震计算结果，选用合适的止水带型号。

管节接头钢端壳可预埋水管作为 OMEGA 止水带检漏装置，具体检测方法为：通过控制预埋水管的开启和封闭，向 GINA 止水带和 OMEGA 止水带之间的空隙注满水，逐级加压，检查是否漏水。检漏工作结束，应将空隙内试验用水抽走。

**8.3.6** 一般情况下，节段接头防水体系中，可注浆中埋式止水带作为首道防水措施，OMEGA 止水带作为第二道防水措施。止水带除了耐久、可靠之外，还应“可检修、可维护、可更换”。可注浆中埋钢边止水带宜避免布置在受拉区，尤其避免布置在外侧受拉区；同时应考虑和 OMEGA 止水带之间预留足够的空间，满足可能的抗震缓冲功能等内置构造要求。节段接头端面预留槽孔应与 OMEGA 止水带吻合，不应出现受扭和影响压件固定等情况。

管节“入水”前，对节段接头可注浆中埋式止水带及 OMEGA 止水带水密性进行检测，检测装置及检测方法同管节接头。

**8.3.8** 常规最终接头通常采用水下止水板法，其施工周期长且需要大量水下作业。对于外海沉管隧道其最终接头所处工程地质条件和环境条件复杂，处于外海环境，受潮流中大、中、小潮变化，深槽紊流、冬季寒潮等复杂天气影响，因此水下可作业的时间短，施工工期长，潜水作业风险大。日本在多摩川、大阪南港、新若户等沉管隧道应用过岸上端部块体工法、V型块体工法、key 管节法等最终接头型式，港珠澳大桥沉管隧道开发应用了主动止水式最终接头的型式。港珠澳大桥沉管隧道所处外海条件特殊，且最终接头如果长时间在水下施工则可能会带来超标的回淤，清淤作业将影响施工进度，因此，结合港珠澳大桥沉管隧道所处环境及工期要求，提出并研制完成可逆式主动止水最终接头，并实现一天内快速安装、毫米级精准对接。对于外海沉管隧道，当条件允许时，应优先选用陆上干环境下预制，整体吊装安装的最终接头。

**8.4.3** 整体式管节结构采用底钢板作为管节底部外包防水时，钢板应沿侧墙上翻至适当高度，与侧墙及管顶的防水卷材或涂料、两侧钢端壳连接，形成完整防水体系；钢板厚度、材质等应结合防腐需求确定，并选择防腐涂层或牺牲阳极等保护措施。管节侧墙与顶板可采用喷涂型聚脲、聚氨酯、渗透环氧、聚合物水泥等涂料或防水卷材，不同材质防水层的搭接、管节结构与预埋钢构件交界部位等应进行防水加强处理。

**8.4.9** GINA 止水带选型的决定因素是相应水压条件下的最小水密压缩量，管节对接后靠水压得到的初始压缩量减去由于温度下降、混凝土收缩、不均匀沉降、地震位移、施工偏差等造成的最大接头张开量后得到的最不利压缩量，应大于相应水压条件下所需的最小水密压缩量并留有一定富余。同时，最小水密压缩量还应考虑止水带橡胶产品在设计使用年限中的应力松弛等因素。

对于 GINA 止水带压件，耐久性保护措施包括：1.重涂装防腐蚀涂层；2.底板背水侧钢结构附加牺牲阳极保护；3.设置 5mm 预留腐蚀厚度。

对于 GINA 止水带紧固件，耐久性保护措施包括：1.采用不锈钢材质；2.GINA 压块内螺纹采用冷镀锌，厚度 50  $\mu$  m。

**8.4.10** OMEGA 止水带及其紧固装置应在管节安装完成后进行现场水密性测试，所施加的检漏水压力应与该接头处的水压力相匹配。根据经验，检漏水压可按接头底面最大水压加 5m 的水头压力或以底板处最大水压乘以测试系数 1.2。

**8.4.11** 可注浆中埋止水带的中间部位为橡胶，两侧为金属条。金属条上附着海绵，注入的树脂等浆液可沿着金属条进入混凝土中的空洞或裂缝，实现灌浆密实、防水的功能。一般在干坞完成管节预制后，根据检查情况，通过预留的注浆管可实施注浆，直到满足设计要求为止。

**8.5.3** 暴露在混凝土构件外的预埋钢筋或钢结构（如吊环、紧固件、连接件等）容易锈蚀，若这些构件与混凝土构件中的钢筋相接触，易形成电化腐蚀的阴阳极，加速混凝土内部钢筋的锈蚀。

**8.5.6** 处于海水环境的混凝土构件防腐蚀措施可参照现行《水运工程结构防腐蚀施工规范》（JTS/T 209）的规定执行。

**8.5.7** 牺牲阳极防腐具有稳定性好、经济效益好、易维修和保养等优点。

**8.5.10** 处于海水环境的桩基结构防腐蚀措施可参照现行《水运工程结构防腐蚀施工规范》（JTS/T 209）的规定执行。

**8.5.12** 维护制度应结合构件在具体环境条件下的实际劣化过程以及相关的耐久性检测与监测数据，合理安排构件维护强度和维持时间与频次，以最优的维护成本保证混凝土结构和构件的耐久性可靠指标满足设计要求。在主体结构遭遇自然灾害（地震、异常潮位）、发生火灾、爆炸、车辆事故或船舶沉没、隧道上方的海底疏浚等异常事件后，对遭受影响的结构立即进行的详细检查，及时掌握结构受损情况，进行有针对性的抢修，并提出相应对策。

港珠澳大桥沉管隧道主体结构按 1 次/年对混凝土结构状况等进行人工巡检，检测内容包括：混凝土腐蚀、混凝土裂缝状况、混凝土表面损伤、混凝土强度、混凝土碳化深度、混凝土氯离子含量、混凝土电阻率、混凝土保护层厚度；检测仪器包括：智能测宽仪、智能裂缝监测仪、数字回弹仪、碳化深度测量仪、氯离子含量快速测定仪、混凝土电阻率测试仪。

**8.6.2** 整体式管节一般按照底板、外墙、中墙和顶板先后浇筑混凝土，通过在墙体设置冷却水管、后浇带等方式控制混凝土开裂。节段式管节长度划分要考虑实际施工能力和工艺控制水平，实现一次性匹配浇筑完全部混凝土，确保节段混凝土浇筑的整体质量。

## 9 明挖法隧道

**9.1.2** 不参与主体结构受力的基坑支护结构，其设计使用年限应满足开挖至基坑底，完成主体结构施工，直至实现隧道正常使用功能。我国各主要省份和城市有当地基坑规范或标准，各地地质、气候和工程经验、发展水平不同，相关规定也不完全一致，建议以当地标准规定的使用年限为准。

支护结构作为主体结构或主体结构的一部分时，如地下连续墙与主体地下结构外墙相结合时（如单一墙、叠合墙和复合墙）；支护结构的水平支撑与主体地下结构水平构件相结合，如围檩、支撑作为楼板梁等；支护结构的竖向支承立柱与主体地下结构竖向构件相结合，如立柱基础桩作为主体结构抗浮和承载桩基础等；支护结构通过其他构件与主体结构相结合，如依托支护结构设置的抗浮压顶梁、防沉牛腿等。以上作为主体结构一部分的结构和构件如先于主体结构失效，将严重影响主体结构的工作性能。因此，规定作为主体结构一部分的支护结构设计使用年限与主体结构保持一致，耐久性措施也应有相应的要求。

**9.2.2** 国标和不同行业耐久性标准对钢筋混凝土结构裂缝开展宽度的要求有所区别。《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 中 3.5.4 条规定：根据耐久性要求，在荷载作用下配筋混凝土构件的表面裂缝最大宽度计算值不应超过表 3.5.4 中的限值。

表 3.5.4 表面裂缝计算宽度限值 (mm)

环境作用等级	钢筋混凝土构件	有粘结预应力混凝土构件
A	0.40	0.20
B	0.30	0.20 (0.15)
C	0.20	0.10

环境作用等级	钢筋混凝土构件	有粘结预应力混凝土构件
D	0.20	按二级裂缝控制或按部分预应力 A 类构件控制
E, F	0.15	按一级裂缝控制或按全预应力类构件控制

注：1 括号中的宽度适用于采用钢丝或钢绞线的先张预应力构件；

2 裂缝控制等级为二级或一级时，按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的计算裂缝宽度；部分预应力 A 类构件或全预应力构件按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362 的计算裂缝宽度。

《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310 中 7.3 条规定：隧道衬砌结构，其计算的最大裂缝宽度不应超过表 7.3.1 规定的限值。

### 7.3 裂缝控制

7.3.1 隧道衬砌结构，其计算的最大裂缝宽度不应超过表 7.3.1 规定的限值。

表 7.3.1 隧道衬砌结构的最大裂缝宽度限值

环境类别	环境作用等级	最大裂缝宽度限值 (mm)
一般环境	I-A、I-B	0.20
	I-C	0.15
冻融环境	II-C	0.20
	II-D	0.15

43

7 隧 道

	II-E	0.10
近海或海洋氯化物环境	III-C、III-D	0.15
	III-E、III-F	0.10
除冰盐等其他氯化物环境	IV-C、IV-D	0.15
	IV-E	0.10
盐结晶环境	V-D	0.15
	V-E、V-F	0.10
化学腐蚀环境	VI-C	0.15
	VI-D、VI-E、VI-F	0.10

《铁路混凝土结构耐久性设计规范》TB 10005 中 6.1.1 条规定：铁路钢筋混凝土结构表面裂缝计算宽度限值除应遵守现行铁路工程有关专业设计规范的相关要求外，还应符合表 6.1.1 的规定。

表 6.1.1 钢筋混凝土结构表面裂缝计算宽度限值 (mm)

环境类别	环境等级	表面裂缝计算宽度最大限值
碳化环境	T1	0.2
	T2	0.2
	T3	0.2
氯盐环境	L1	0.2
	L2	0.2
	L3	0.15
化学侵蚀环境	H1	0.2
	H2	0.2
	H3	0.15
	H4	0.15
盐类结晶破坏环境	Y1	0.2
	Y2	0.2
	Y3	0.15
	Y4	0.15
冻融破坏环境	D1	0.2
	D2	0.2
	D3	0.15
	D4	0.15

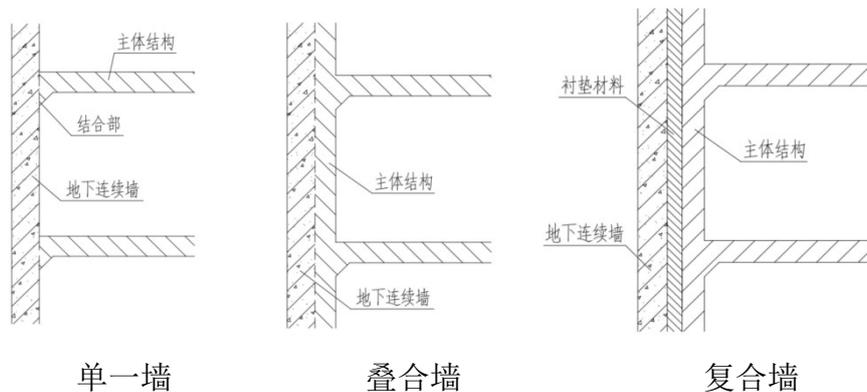
可以看出，《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》针对隧道钢筋混凝土结构裂缝开展宽度的要求更加详细和严格。对于海底隧道，以氯盐环

境为主，以III-E和III-F环境等级为例，相应的裂缝控制宽度国标和铁路行业标准为0.15mm，公路行业标准为0.10mm。

从工程设计案例来看，青岛胶州湾海底隧道混凝土服役环境类别为：海域段隧道衬砌混凝土接触空气一侧的环境作用等级：III-E(非常严重)，海域段隧道砌混凝土接触围岩一侧的环境作用等级：III-D(严重)。海底隧道采用钻爆法施工，要达到100年服役寿命，混凝土靠近空气一侧保护层厚度应大于60mm，靠近土体一侧应大于50mm。氯离子扩散系数应小于 $4 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ，水胶比w/b应小于0.34，混凝土强度等级应高于C50，裂缝控制宽度不大于0.2mm，不允许出现贯穿性裂缝。佛莞城际铁路狮子洋隧道，氯盐环境作用等级为L3的近海明挖隧道段，隧道外包防水板，并在钢筋混凝土内添加阻锈剂，以提高结构耐久性。混凝土的抗渗等级根据埋深不同确定，限制裂缝开展宽度 $\leq 0.2\text{mm}$ ，局部段落受到地下水侵蚀影响，要求裂缝宽度不得大于0.15mm。大连湾海底隧道，岸边段隧道外表面环境为氯化物环境下的水下区和土中区III-C，与敞开段相接100m之外的暗埋段内表面的环境为氯化物环境下的大气区（轻度盐雾）III-D，敞开段及与敞开段相接100m之内的暗埋段内表面环境为氯化物环境下的大气区（重度盐雾）III-E，主体结构迎水面设置防水卷材与防水涂料形成全包防水构造，要求岸边明挖段隧道结构裂缝宽度不得大于0.2mm。

**9.2.3** 《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476-2019）3.5.4条规定：“根据耐久性要求，在荷载作用下配筋混凝土构件的表面裂缝最大宽度计算值不应超过表3.5.4中的限值。对裂缝宽度无特殊外观要求的，当保护层设计厚度超过30mm时，可将厚度取为30mm计算裂缝的最大宽度”。

**9.2.4** 根据明挖隧道围护结构和主体结构侧墙的关系，可分为单一墙、叠合墙和复合墙三种型式：



单一墙为围护墙独立作为主体结构的侧墙，不另作参与结构受力的内

衬墙，多采用现浇地下连续墙。使用阶段应按地下连续墙承担全部外墙荷载进行设计。一般在防水要求不高的常规浅层地下工程中应用。

叠合墙为围护墙作为主体结构侧墙的一部分，与内衬墙组合成叠合式结构，围护结构与内衬结构之间通过结构或施工措施，保证叠合面的剪力传递，但叠合面难以形成连续密封防水层。使用阶段地下连续墙与衬墙应按整体考虑，外墙厚度应取地下连续墙与衬墙厚度之和。一般在透水性较差地层的中采用。

复合墙为围护墙作为主体结构侧墙的一部分，与内衬墙组合成复合式结构，墙面之间不传递剪力和弯矩，只传递法向压力。围护结构与内衬结构之间设置防水隔离层，与结构的顶、底板防水层形成整体密封体系。永久使用阶段水平荷载作用下的墙体内力宜按地下连续墙与衬墙的刚度比例进行分配。一般在结构重要性较高的地下工程中采用。

海底隧道结构重要性高，仅采用围护墙作为隧道主体结构侧墙的单一墙，结构防水和耐久性难以满足使用年限要求，且侧墙结构难以维修和更换，运营隐患大。因此，本标准明确海底隧道不应采用单一墙，应采用复合墙，在环境作用等级 C 级以下且主体结构所处地层为粘性土等透水性较差地层中也可采用叠合墙。

**9.3.1** 地下连续墙为钢筋混凝土连续墙体，将各槽段之间的接头进行加强防水处理后，可以作为主体结构构件使用。由于灌注桩各柱列之间无构造上的联系，整体性差，防水性能也不可靠，故不宜单独作为主体结构的侧墙使用，但作为立柱基础的钻孔桩可以兼做抗拔或承载桩。其余型钢水泥土搅拌桩、钢板桩、咬合桩、钢管桩等耐久性与钢筋混凝土主体结构差别大，均不适宜作为海底隧道主体结构构件使用。

**9.3.2** 根据国内外关于隧道耐久性调研的相关文献，隧道渗漏水是较为普遍的隧道病害，有报道隧道发生渗漏水病害的比例接近 80%，而且渗漏水会加速隧道材料劣化和结构老化，是隧道耐久性问题的“催化剂”。因此，围护结构要作为隧道主体，首先要保证其抗渗性能。

混凝土隧道衬砌结构的耐久性设计需要考虑地质、环境、材料和结构四个层次的各种因素。根据耐久性环境区划和所处的具体环境条件确定的各项指标，如抗渗、抗裂、抗氯离子侵入等，隔绝或减轻环境因素对混凝土和钢筋的作用。

海底隧道衬砌混凝土一侧接触空气，另一侧接触周围岩土及地下水，

除遭受 Cl<sup>-</sup>侵入、洞口附近的冻融、干湿交替和碳化作用外，还可能因地下水含 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等离子发生碱骨料反应，硫酸盐、镁盐、软水和生物腐蚀、高压渗水、积水、火灾、感应电流、高温、尾气等影响也加速了混凝土的老化。

**9.3.5** 将基坑钢筋混凝土支撑构件用作隧道主体结构，在明挖隧道工程中有一定的应用。实践中发现该技术存在两方面的耐久性问题，一是支撑构件支撑于围护墙上，与隧道主体结构防水体系无法密封；二是支撑上一般需预埋大量钢筋接驳器或进行植筋，施工冷缝多，渗漏水隐患大。考虑到海底隧道耐久性要求高，因此，本标准规定基坑钢筋混凝土支撑不宜作为隧道主体结构构件使用。

**9.4.5** 参考《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310 中 7.4.2 条，框架混凝土结构的表面形状应有利于排水，对于可能受雨淋或积水的部位宜设置倾斜面。对可能产生蓄水的部位，宜设置排水通道。排水管的出口不得紧贴混凝土构件表面，宜离开混凝土构件表面一定距离。

**9.5.3** 本条参考了《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 中 3.5.9 条，暴露在混凝土结构构件外的吊环、紧固件、连接件等金属部件，表面应采用防腐措施，具体措施可按现行行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275 的规定执行；当环境类别为 III、IV 时，其防腐范围应为从伸入混凝土内 100mm 处起至露出混凝土外的所有表面。

《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》JTJ 275 中 4.2.10 条，浇筑在混凝土中并暴露在外的临时或永久性的吊环、紧固件、预埋件等，应与混凝土中的任何配筋绝缘。否则，应采用牺牲阳极保护。

对于明挖法施工的海底隧道，一般不需要在主体结构外表面留设吊环、紧固件，连接件一般设置于结构缝中，且在结构缝的防水保护下。暴露于隧道结构表面的吊环、紧固件、连接件、穿墙管等构件也会严重影响结构外防水的密封。因此，本标准将外露铁件分为施工临时使用和运营长期使用两类分别进行规定，要求外露临时铁件应在做外防水前进行切除。

**9.5.5** 建筑与市政工程防水通用规范（GB55030）3.3.9 条提出“长期处于腐蚀性环境中的防水卷材或防水涂料，应通过腐蚀性介质耐久性试验”，海底隧道排水沟长期接触的结构渗漏水、雨水及冲洗水等存在一定腐蚀性的介质，有必要对排水沟表面采取防止腐蚀介质下渗措施，避免腐蚀主体结构底板尤其接缝处钢筋。

**9.5.7** 明挖法隧道结构变形缝常用的抗剪措施一般包括凹凸榫、剪力杆、剪力销等，结构厚度不小于 800mm 时宜采用与主体结构整体浇筑的钢筋混凝土凹凸榫。结构厚度小于 800mm 时，宜设置与主体结构有一定变形协调能力的剪力杆或剪力销抗剪件，并对抗剪件采取防腐蚀、防锈蚀等保护措施。

该规定是基于不同环境下大量明挖隧道工程设计、施工经验和运营情况调研提出的。

**9.5.9** 本条文根据《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 中 3.5.11 条拟定。防腐蚀附加措施可以分为针对混凝土的措施和针对钢筋的措施。混凝土的防腐蚀附加措施主要包括表面涂层和硅烷浸渍，两类措施都起到隔离混凝土表面与周围环境的作用，因此能够阻止和延缓环境中侵蚀性介质进入混凝土内部。海底隧道主要处于海洋环境、除冰盐及其他氯化物环境，腐蚀特征主要是环境中氯离子从混凝土表面迁移到混凝土内部，当到达钢筋表面的氯离子积累到一定浓度(临界浓度)后，引发钢筋锈蚀破坏。研究和工程均证明，混凝土表面涂层和硅烷浸渍是最经济有效的防腐蚀措施之一，如我国华南湛江港海洋环境暴露实验站于 20 世纪 80 年代开展的环氧树脂、丙烯酸、氯化橡胶、聚氨酯等混凝土表面涂层七二期暴露试验，5 年~20 年暴露试验结果表明涂层阻止氯离子渗透效果明显；我同深圳盐回港集装箱码头二期工程是国内最早使用硅烷浸渍防腐蚀的工程，2012 年工程调查和实体构件氯离子渗透检测情况表明，氯离子很难渗透进混凝土表层 3cm 以上的深度。

表 C.0.2 混凝土结构防腐蚀附加措施

环境类别	名称	防腐蚀附加措施	
		混凝土	钢筋
I	一般环境	表面涂层，硅烷浸渍	—
II	冻融环境	表面涂层，硅烷浸渍	—
III	海洋氯化物环境	表面涂层，硅烷浸渍	环氧涂层钢筋，阻锈剂，阴极保护
IV	除冰盐与其他氯化物环境	表面涂层，硅烷浸渍	环氧涂层钢筋，阻锈剂，阴极保护
V	化学腐蚀环境	表面涂层，硅烷浸渍	—

钢筋的防腐蚀附加措施针对钢筋的防锈过程，其中环氧涂层钢筋在钢筋表面通过涂刷环氧有机涂层形成对钢筋表面的直接防护膜，隔绝钢筋混凝土周围介质，延迟钢筋锈蚀过程；阻锈剂为化学试剂(如磷氟酸铀)，能

够有效提高钢筋锈蚀的临界氯离子浓度，延缓氯盐环境中钢筋锈蚀进程；阴极保护直接对钢筋进行电化学保护，使钢筋处于被保护状态；外加电流阴极保护即在钢筋混凝土构件上外加电场，给钢筋施加阴极电流，一方面使钢筋的电位负向增高，使其位于钝化区内，即使氯离子浓度较高也不会发生钝化膜破坏，保证钢筋本体避免腐蚀；另一方面，钢筋和辅助阳极之间产生的电场使氯离子向辅助阳极移动，避免向钢筋积聚而破坏钝化膜，因此，外加电流阴极保护是氯盐环境下最有效可靠的防腐蚀措施。

表 C.0.3 混凝土结构防腐蚀附加措施的保护年限

防腐蚀附加措施	最低保护年限 (年)
表面涂层	10
硅烷浸渍	15
环氧涂层钢筋	20
阴极保护 (外加电流)	30

9.6.2 现行《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 中 3.6.1 条，根据结构所处的环境类别与环境作用等级，混凝土的施工养护应符合下表的规定。

表 3.6.1 施工养护制度要求

环境作用等级	混凝土类型	养护制度
I - A	一般混凝土	至少养护 1d
	矿物掺和料混凝土	浇筑后立即覆盖、加湿养护，不少于 3d
I - B, I - C, II - C, III - C, IV - C, V - C, II - D, V - D, II - E, V - E	一般混凝土	养护至现场混凝土强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 3d
	矿物掺和料混凝土	浇筑后立即覆盖、加湿养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 7d
III - D, IV - D, III - E, IV - E, III - F	矿物掺和料混凝土	浇筑后立即覆盖、加湿养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 50%，且不少于 7d；继续保湿养护至现场混凝土的强度不低于 28d 标准强度的 70%

注：1 表中要求适用于混凝土表面大气温度不低于 10℃ 的情况，否则应延长养护时间；

2 有盐的冻融环境中混凝土施工养护应按 III、IV 类环境的规定执行；

3 矿物掺和料混凝土在 I - A 环境中用于永久浸没于水中的构件。

在影响混凝土的耐久性的诸多因素中，保护层的密实度不高是重要因素之一，因而改善混凝土的密实性是重要的。混凝土中没有毛细孔道和保护层没有裂缝，则水分、氧气、酸碱盐溶液、氯离子等就不会进入结构内部致使钢筋生锈、混凝土碳化和腐蚀性介质的腐蚀。

**9.6.3** 保护层厚度是混凝土耐久性失效的主要影响因素之一，试验证明当保护层达到某一厚度极限时，碳化残量将不再变化，试验还发现保护层厚度在 35mm，水灰比在 0.5，裂缝宽度 0.1mm 时钢筋没有锈蚀。此情况说明，在一定的环境中选择适当的参数可以有效地提高混凝土的耐久性。在设计时根据规范要求适当加厚保护层的厚度能够有效的提高结构的耐久性，如加拿大安大略省的公路桥梁为应对侵蚀和冻融损害，保护层最小厚度从 50 年的 25mm 逐渐增加到 40mm、60mm 到 80 年的 70mm，在提高耐久性方面取得了较好的效果。

相对结构厚度，保护层厚度的尺寸较小，而钢筋出现锈蚀的年限大体与保护层厚度的平方成正比，保护层厚度的施工偏差会对耐久性造成很大的影响。以保护层厚度为 20mm 的钢筋混凝土板为例，如果施工允许偏差为 $\pm 5\text{mm}$ ，则 5mm 的允许负偏差就可使钢筋出现锈蚀的年限缩短约 40%。因此在耐久性设计所要求的保护层厚度中，施工控制非常重要，必须计入施工允许负偏差。1990 年颁布的 CEB-FIP 模式规范、2004 年正式生效的欧盟规范以及英国历届 BS 标准等标准中，都将用于设计计算和标注于施工图上的保护层设计厚度称为“名义厚度”，并规定其数值不得小于耐久性要求的最小厚度与施工允许负偏差的绝对值之和。欧盟规范建议的施工允许偏差对现浇混凝土为 5mm~15mm，一般取 10mm。美国 ACI 规范和加拿大规范规定保护层的最小设计厚应已经包含了约 12mm 的施工允许偏差，与欧盟规范名义厚度的规定实际上相同。我国现行《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 对梁、柱类构件的受力钢筋保护层厚度允差规定为 $\pm 5\text{mm}$ 、墙、板、壳类构件的受力钢筋保护层厚度允差规定为 $\pm 3\text{mm}$ 。

表 5.5.3 钢筋安装允许偏差和检验方法

项 目		允许偏差 (mm)	检 验 方 法
绑扎钢筋网	长、宽	±10	尺量
	网眼尺寸	±20	尺量连续三档， 取最大偏差值
绑扎钢筋骨架	长	±10	尺量
	宽、高	±5	尺量
纵向受力钢筋	锚固长度	-20	尺量
	间距	±10	尺量两端、中间各一点， 取最大偏差值
	排距	±5	
纵向受力钢筋、箍筋的 混凝土保护层厚度	基础	±10	尺量
	柱、梁	±5	尺量
	板、墙、壳	±3	尺量
绑扎箍筋、横向钢筋间距		±20	尺量连续三档， 取最大偏差值
钢筋弯起点位置		20	尺量
预埋件	中心线位置	5	尺量
	水平高差	+3, 0	塞尺量测

注：检查中心线位置时，沿纵、横两个方向量测，并取其中偏差的较大值。

现行《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T 50476 中 3.6.1 条，环境作用等级为 C、D、E、F 的混凝土结构构件，保护层厚度的施工质量验收应符合下列规定：

1 对选定的每一配筋构件，选择有代表性的最外侧钢筋 8 根~16 根进行混凝土保护层厚度的无损检测；对每根钢筋，应选取 3 个代表性部位测量；

2 当同一构件所有测点有 95%或以上的实测保护层厚度  $c_1$  满足下式要求时，则应认为合格：

$$c_1 \geq c - \Delta$$

式中： $c$ ——保护层设计厚度；

$\Delta$ ——保护层施工允许负偏差的绝对值，对梁、柱等条形构件取 10mm，板、墙等面形构件取 5mm。

3 不能满足第 2 款的要求时，可增加同样数量的测点进行检测，按两次测点的全部数据进行统计；仍不能满足第 2 款要求的，则判定为不合格，并应要求采取相应的补救措施。

考虑保护层厚度对结构的安全性、耐久性的重要影响，本条参考《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 相关规定将钢筋保护层厚度的合格率提高为 90%及以上。

本标准规定保护层设计厚度的最低值仍称为最小厚度，但在耐久性所要求最小厚度的取值中已考虑了施工允许负偏差的影响。

## 10 隧道内部结构及附属构件

**10.1.1** 易更换构件中钢构件设计工作年限可取 50 年，混凝土构件设计工作年限建议取 100 年。隧道内装饰板等附属设施设计工作年限目前规范中无明确规定，参考房屋建筑物中易于替换结构构件的设计使用年限为 25 年。

连接节点密封处理：①使用高性能的密封材料，如遇水膨胀止水条、橡胶止水带、聚氨酯密封剂等，确保连接处无缝隙，防止地下水和湿气从接口渗入。②在混凝土浇筑前，对接口部位进行精细化处理，确保预埋件、锚固件等固定牢固，且与混凝土紧密结合，不留空隙。③对于预制管片拼接、二次衬砌与初期支护间的连接，进行严格的灌浆作业，灌注密实度高、耐久性强的灌浆材料，形成有效的防水屏障。

外露部件防腐处理：①对于隧道内部的钢结构、金属支架、电缆桥架等外露部件，采用热浸镀锌、喷塑、涂刷防腐漆等方式进行防腐处理，提高其耐腐蚀性能。②对于隧道内部的电气设备、消防设施等金属外壳，也需要做好防腐和防水处理，确保其在潮湿环境中依然能保持良好的运行状态。

防渗漏系统设计：①设置连续的防水层，如喷涂防水涂料、铺设防水卷材或安装防水板，形成全方位的内衬防护。②安装有效的排水设施，如泄水管、盲沟等，将可能渗入的水分迅速排出隧道之外，减轻对结构的压力和侵蚀。

**10.1.2** 隧道内的灯具、风机、消防设施、监控设备等附属构件，应设计为易于拆卸和更换的形式，例如采用模块化设计，使零部件可以在不影响隧道整体结构的情况下快速拆装。对于需要固定的附属构件，应在结构施工阶段预埋相应的固定件，并确保其位置准确、固定牢固，同时便于后期的调整和更换。

**10.1.3** 常见的隧道内部装饰材料包括防火涂料、陶瓷铝装饰防火板、搪瓷钢板、耐候性好的金属材料、特种混凝土制品、耐高温和抗冲击的玻璃材料等。

具体来说，隧道内部装饰材料应满足以下特点：①耐磨损性：隧道装饰材料需定期进行机械或人工清洗，所以装饰材料必须具有良好的耐磨性

能，能够抵御长时间的物理磨损。②耐腐蚀性：隧道内部环境相对封闭，可能会存在湿度较大、有害气体排放、盐分侵蚀（特别是沿海或靠近矿产资源丰富的地区）等情况，因此装饰材料应具备优良的耐化学腐蚀性能，尤其对酸碱物质和水分的抵抗力要强。③易清洁性：隧道内部清洁维护有一定的困难，所以装饰材料应具备易清洁的特点，能够抵抗污渍吸附，方便快速清理，同时也能经受住高压冲洗或化学清洁剂的清洗。④防火性：鉴于隧道空间狭长，一旦发生火灾，极易造成严重后果，因此隧道装饰材料必须具备优异的防火性能，能够在火灾中抑制火势蔓延，延迟燃烧，提供更多的疏散和灭火时间。⑤环保性：随着现代社会对环保的重视，隧道装饰材料应尽量选用无毒、低 VOC（挥发性有机化合物）、可再生或可回收利用的材料，以减少环境污染。

**10.1.4 检查通道与平台：**在隧道设计中，应预设必要的检查通道、检修口及检修平台，方便工作人员对隧道内部各种设施进行日常巡检和故障排查。

**10.1.5 隧道内预制构件的尺寸误差和安装偏差可参照《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ 1-2014）的相关要求执行。**

**10.1.6 隧道内内部结构拼缝处理完成后，在浇筑路面垫层前，隧道内进行浇水，检验车道板拼缝、结构缝的防水能力，对渗漏位置进行处理后，再浇筑垫层、路面层。**

## 11 检测与维修

**11.1.2** 维护制度应结合构件在具体环境条件下的实际劣化过程以及相关的耐久性检测与监测数据，合理安排构件维护强度和维持时间与频次，以最优的维护成本保证混凝土结构和构件的耐久性可靠指标满足设计要求。在主体结构遭遇自然灾害（地震、异常潮位）、发生火灾、爆炸、车辆事故或船舶沉没、隧道上方的海底疏浚等异常事件后，对遭受影响的结构立即进行的详细检查，及时掌握结构受损情况，进行有针对性的抢修，并提出相应对策。

港珠澳大桥沉管隧道主体结构按 1 次/年对混凝土结构状况等进行人工巡检，检测内容包括：混凝土腐蚀、混凝土裂缝状况、混凝土表面损伤、混凝土强度、混凝土碳化深度、混凝土氯离子含量、混凝土电阻率、混凝土保护层厚度；检测仪器包括：智能测宽仪、智能裂缝监测仪、数字回弹仪、碳化深度测量仪、氯离子含量快速测定仪、混凝土电阻率测试仪。

**11.1.3** 隧道耐久性设计中的维修阈值是指结构性能指标降至某个预先设定的标准值时，必须进行维修或干预的临界点。这个阈值是为了确保隧道结构在服役期间能够保持安全、稳定的运行状态，并尽可能延长其使用寿命而设立的。

维修阈值通常涉及以下几个方面的指标：①结构损伤程度：当隧道衬砌裂缝宽度超过一定限值，或者混凝土剥离、破损面积达到一定程度，表明结构受到严重损伤，需要进行修补或加固。②材料性能退化：例如，混凝土的强度、耐久性指标显著降低，或者钢筋发生明显锈蚀，影响结构承载能力时，应启动维修程序。③渗漏水状况：当隧道出现大面积渗漏水或滴水频率超过规定值时，表示防排水系统失效，应及时查明原因并进行维修，防止水患引发更大范围的结构问题。④环境因素影响：如地下水位变化、酸碱盐环境等导致隧道结构快速劣化时，需要基于监测数据判断是否达到维修阈值。⑤监测数据预警：通过定期的隧道健康监测，包括变形监测、环境监测等，当监测数值超出正常范围或达到预设报警阈值时，应当及时评估结构健康状况并决定是否实施维修。

制定维修阈值时，工程师需要结合相关规范、工程实践经验、风险评

估以及成本效益分析，确保在隧道结构安全前提下合理安排维护计划，从而保障隧道工程的整体耐久性。

**11.1.4** 隧道内混凝土构件的维护应符合《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367）的要求。

**11.1.5** 相关检测与鉴定标准可参考：《城市交通隧道工程结构检测与鉴定标准》（2023年版）、《轨道交通及隧道工程混凝土结构耐久性设计施工技术规范》（DG/TJ 08-2128-2021）等，这些标准规定了隧道检测的项目、频率、方法、评判标准以及结构安全等级划分等具体内容。或参照中国土木工程学会、中国公路学会等行业协会发布的相关技术指南，为隧道检测提供专业指导。

①混凝土中钢筋锈蚀状况的检测可根据测试条件和测试要求选择剔凿检测方法、电化学测试方法和综合分析判定法。电化学测试方法可按《建筑结构检测技术标准》（GB/T 50344）相关要求执行。

②混凝土保护层厚度可按《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204）相关要求执行。

③混凝土碳化深度可按《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T 23）相关要求执行。

④混凝土裂缝及缺陷可采用超声法，按《超声法检测混凝土缺陷技术规程》（CECS 21）相关要求执行。

⑤混凝土氯离子含量按《水运工程混凝土试验规程》（JGJ 270）相关要求执行。

## 附录 A 阻锈剂快速评价方法

**A.0.2** 《钢筋混凝土阻锈剂》（JT/T 537）“盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比试验方法”中阻锈剂盐溶液要求是“玻璃烧杯中加入3g氢氧化钙、17.5g氯化钠和推荐用量的钢筋混凝土阻锈剂,用蒸馏水稀释至500g,制得阻锈剂盐溶液”其中配置的阻锈剂盐溶液为在饱和氢氧化钙的基础上进行配置,溶液pH值约为12.5。本方法中考虑尽可能体现阻锈剂本身的锈蚀抑制效果,减弱溶液中高pH值对钢筋的钝化效应,结合已有文献中对不同pH条件下钢筋锈蚀规律的影响,确定溶液中pH值在 $9 \pm 1$ 的范围内。

**A.0.5** 参照行业标准《钢筋混凝土阻锈剂》（JT/T 537）中“盐水干湿循环环境中钢筋锈蚀面积百分率比试验方法”做出要求。为了加速钢筋锈蚀便于快速得到结果,选择浸泡时间为24h,并且尽可能与混凝土中钢筋服役环境接近,钢筋采取全浸泡的方式。通过钢筋锈蚀面积百分率比确定阻锈剂效果的优劣。

## 附录 B 钢筋混凝土保护层厚度计算方法

**B.1.2** 考虑氯盐侵蚀的混凝土结构寿命预测模型，均在Fick第二扩散定律的基础上，考虑环境、材料、配合比、氯离子结合能力以及裂缝等因素的影响，通过改变系数的方式，修正基础模型所得。

本标准中钢筋混凝土保护层厚度计算方法部分主要参考《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT3310-2019）中的相关内容，其中采用“CECS评定标准方法”和“欧洲Duracrete方法”。相比于“多因素耦合方法”和“西部课题方法”，“CECS评定标准方法”和“欧洲Duracrete方法”中对环境因素的影响较为全面，充分考虑了近海大气区、浪溅区和水下区以及距海岸距离的影响，能比较全面的覆盖不同服役环境下钢筋混凝土保护层厚度计算的需求，因此标准中仅采用“CECS评定标准方法”和“欧洲Duracrete方法”。

**B.2.4** 《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT3310-2019）中该章节为2.5，但根据公示推导，在2.4章节钢筋开始锈蚀时间 $t_i$ 的计算过程中已用到本章节中相关内容。因此为了便于工程人员理解和应用，将此章节顺序提前。

**B.2.5** 该公式由公式 A.2.3-1 和公式 A.2.3-2 推导得到，《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTGT3310-2019）中该公式如下所示：

$$t_i = \left\{ \frac{c^2 \times 10^{-6}}{4D_0 \left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{M_{cr}}{M_s} \right) \right]} \right\}^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

该公式中扩散系数D的表达式未书写完整，同时误差函数的指数缺失，因此对公示进行修正。