

ICS: 93.060

CCS: P20/29

团 体 标 准

T/CCTAS XX—2022

城市道路水下隧道设计规范

Code for design of urban road underwater tunnel

征求意见稿

本稿完成日期：2022 年 9 月 26 日

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

202X—XX—XX 发布

202X—XX—XX 实施

中国交通运输协会

发布

目次

- 前 言..... 111
- 1 范围..... 1
- 2 规范性引用文件..... 1
- 3 术语和定义..... 1
- 4 基本规定..... 3
- 5 工程条件调查..... 5
 - 5.1 一般规定..... 5
 - 5.2 基础资料收集与调查..... 6
 - 5.3 工程勘测..... 6
- 6 总体设计..... 8
 - 6.1 一般规定..... 8
 - 6.2 隧道位置选择..... 9
 - 6.3 隧道线形设计..... 10
 - 6.4 隧道横断面设计..... 11
 - 6.5 隧道建筑布置..... 12
- 7 结构设计..... 13
 - 7.1 一般规定..... 13
 - 7.2 荷载分类及荷载效应组合..... 14
 - 7.3 结构计算..... 17
 - 7.4 构造要求..... 21
- 8 盾构法隧道..... 22
 - 8.1 一般规定..... 22
 - 8.2 盾构机选型..... 23
 - 8.3 管片结构..... 24
 - 8.4 防水设计..... 26
 - 8.5 盾构井设计..... 28
- 9 沉管法隧道..... 29
 - 9.1 一般规定..... 29
 - 9.2 管节结构..... 30
 - 9.3 管节接头与防水..... 30
 - 9.4 干坞设计..... 31
 - 9.5 管节浮运、沉放..... 32
 - 9.6 基槽、垫层及回填..... 33
 - 9.7 其他设计..... 34
- 10 钻爆法隧道..... 34
 - 10.1 一般规定..... 35
 - 10.2 衬砌结构及构造..... 35
 - 10.3 衬砌防排水..... 38
 - 10.4 辅助措施及开挖方法..... 40

10.5	超前地质预报及监控量测	44
11	围堰法隧道	45
11.1	一般规定	46
11.2	围堰设计	46
11.3	地基处理	50
11.4	隧道结构	51
11.5	结构防水及回填	52
11.6	构造要求	53
12	机电系统	53
12.1	一般规定	53
12.2	通风系统	54
12.3	给水系统	56
12.4	排水系统	56
12.5	照明系统	58
12.6	供配电系统	59
12.7	弱电系统	60
13	消防安全与应急疏散	62
13.1	一般规定	62
13.2	隧道及其附属设施防火	62
13.3	疏散通道	64
13.4	消防给水和灭火设施	65
13.5	隧道火灾防排烟	67
13.6	防灾通信及火灾报警	69
13.7	应急供电及照明	70
14	耐久性设计	71
14.1	一般规定	71
14.2	材料耐久性	71
14.3	结构耐久性	73
15	施工监测与运营监测	77
15.1	一般规定	77
15.2	监测项目和方法	77
15.3	监测点布置	79
15.4	监测要求	79
15.5	安全预警与状态评估	80
附录 A	场地复杂程度分级	81
附录 B	车辆有害气体基准排放量	82

前 言

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

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会新技术促进分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：中铁第六勘察设计院集团有限公司、北京交通大学、天津大学、中南大学、天津市政工程设计研究总院有限公司、上海交大海科检测技术有限公司、中铁隧道局集团有限公司、中铁隧道勘测设计院有限公司、中交第一公路勘察设计院有限公司、中铁隧道集团二处有限公司。

本文件主要起草人：贺维国、周华贵、谭忠盛、王东伟、张稳军、费曼利、王艳宁、沈永芳、于勇、徐志胜、宋超业、赵宝锋、王兆卫、范国刚、吕洋、戴新、厉红星、王倩、吕书清、周振梁、张高乐、陈翰、郑少华、奚笑舟、马长军、曹校勇、田峰、吴金刚、刘邱林、张鹏、褚凯、李兆龙、李勇、唐健、曹威、吕游等。

城市道路水下隧道设计规范

1 范围

本文件规定了城市道路水下隧道基本规定、工程条件调查、总体设计、结构设计、盾构法隧道、沉管法隧道、钻爆法隧道、围堰法隧道、机电系统、消防安全与应急疏散、耐久性设计、施工监测与运营监测等。

本文件适用于采用盾构法、沉管法、矿山法及围堰法新建的城市道路水下隧道。

2 规范性引用文件

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

GB8306 中国地震动参数区划图
GB50007 建筑地基基础设计规范
GB50009 建筑结构荷载规范
GB 50010 混凝土结构设计规范
GB50011 建筑抗震设计规范
GB50017 钢结构设计规范
GB50108 地下工程防水技术规范
GB50153 工程结构可靠度设计统一标准
GB50223 建筑工程抗震设防分类标准
GB50446 盾构法隧道施工及验收规范
GB 50497 建筑基坑工程监测技术规范
GB/T50476 混凝土结构耐久性设计规范
GB/T 51318 沉管法隧道设计标准
CJJ37 城市道路工程设计规范
CJJ 56 市政工程勘察规范
CJJ193 城市道路路线设计规范
JTG D70 公路隧道设计规范
JTG/TD71 公路隧道交通工程设计规范
SL645 水利水电工程围堰设计规范
TB10003 铁路隧道设计规范

3 术语和定义

3.1

水下隧道 underwater tunnel

下穿河流、湖泊、海湾等水域的隧道。

3.2

盾构法隧道 shield tunnel

用盾构机械防止土体坍塌，同时进行开挖、掘进，并在盾壳内进行管片拼装而建成的

隧道。

3.3

沉管法隧道 immersed tunnel

在水域中主要由若干预制完成的基本结构单元，将其通过浮运、沉放、水下对接贯通形成的隧道。

3.4

钻爆法隧道 drilling and blasting tunnel

在地层中通过人工或爆破方式开挖的隧道。

3.5

围堰法隧道 cofferdam tunnel

设置临时或永久挡水围堰，在围堰内采用明挖法修建的隧道。

3.6

场地条件 site conditions

建设场地内地形、地质、水文条件及临近建筑物与拟建隧道间关系等实际条件。

3.7

建筑限界 building clearance

限定车辆通行的空间，即为隧道内任何设施设置不得侵入的轮廓线。

3.8

承载能力极限状态 ultimate limit states

结构或构件达到最大承载能力或达到不适于继续承载的较大变形的极限状态。

3.9

正常使用极限状态 service-ability limit states

结构或构件达到使用功能上允许的某一限值的极限状态。

3.10

管片衬砌 segment lining

承受盾构法隧道周围的土压力、水压力，以确保隧道净空的结构，由分成数块的管片组装而成的圆环形。

3.11

二次衬砌 secondary lining

在钻爆法隧道初期支护结构内部的第二层永久性结构。

3.12

盾构工作井 working shaft

用于盾构机组装、拆卸、调头、吊运管片和出渣土等使用的工作竖井，根据使用功能可分为盾构始发工作井、接收工作井两类。

3.13

管节 element

一次或分次预制完成，可实施浮运、沉放、水下对接组成沉管结构的基本单元。

3.14

干坞 dry dock

用于预制沉管法隧道管节的专用场地。

3.15

干舷 freeboard

管节漂浮状态下，吃水线至管节顶面的垂直距离。

3.16

最终接头 final joint

用于连接最后一节管节与相邻管节或接口段间,实现沉管法隧道最终贯通的连接结构。

3.17

剪切键 shear key

设于管节或节段接头,限制管节与管节或接口段间,或节段间水平、竖向位移的抗剪构件。

3.18

GINA 止水带 GINA gasket

安装于管节接头处,通过水力压接形成接头第一道防水线的外贴压缩式防水专用橡胶制品。

3.19

全封闭复合衬砌 fully-enclosed composite lining(FECL)

衬砌结构体系具有良好的排防水性能,隧道围岩渗水不能排入隧道内侧的复合衬砌。

3.20

限排复合衬砌 controlled drainage composite lining(CDCL)

限制隧道围岩渗水排入隧道内的流量,二次衬砌承受一定水压力的复合衬砌。

3.21

排放复合衬砌 drainage composite lining(DCL)

隧道围岩渗水能顺畅地排入隧道内,二次衬砌基本不承担水压力的复合衬砌。

3.22

仰拱 invert

为改善隧道整体支护结构受力条件而设置的隧道底部拱形结构。

3.24

围岩压力 surrounding rock pressure

隧道开挖后,因围岩变形或松散等原因,作用于洞室周边岩体或支护结构上的压力。

3.25

加强照明 intensive lighting

为了降低车辆进出隧道时所产生的“黑洞效应”、“白洞效应”的洞口一定长度范围设置的附加照明。

3.26

临界风速 critical velocity

当采用纵向排烟时,控制烟雾沿隧道坡度逆向流动的最小风速称为临界风速。

3.27

结构耐久性 structure durability

在预定的环境作用和预期的维修与使用条件下,结构及其构件在规定期限内维持其所需最基本适用性和安全性的能力。

3.28

耐火极限 fire resistance range

在隧道耐火试验条件下,建筑构件、配件或结构从受到火的作用时起,到失去稳定性、完整性或隔热性的这段时间。

4 基本规定

4.1 隧道应根据道路等级和功能,结合建设条件、工程地质、环境条件、施工工法、工程

筹划等因素开展设计，应符合下列规定：

- a) 隧道安全性应满足施工阶段和使用阶段的要求;
- b) 隧道主体结构 and 运营设施应满足设计使用年限的耐久性要求;
- c) 隧道行车环境应满足安全性、舒适性要求;
- d) 隧道设计应满足节能环保要求;
- e) 隧道设计应满足防灾要求。

4.2 隧道可按其长度 L 划分为 4 类, 划分标准应符合表 1 的规定。

表 1 城市道路水下隧道按长度分类

分类	特长隧道	长隧道	中隧道	短隧道
长度 (m)	$L > 3000$	$3000 \geq L > 1000$	$1000 \geq L > 500$	$L \leq 500$

注：隧道长度指主线两洞口端面与隧道轴线在路面顶交点间的距离。

注：

本条参照了现行《城市地下道路工程设计规范》的规定。隧道长度指主线隧道洞口端头墙垂直线开始计算。

4.3 隧道主线的设计速度应符合表 2 的规定。

表 2 主线设计速度

道路等级	快速路			主干道			次干道		
设计速度 (km/h)	100	80	60	60	50	40	50	40	30

注：

本条参照了现行《城市地下道路工程设计规范》的规定。鉴于我国目前城市支路尚无水下隧道，且水下隧道投资较大及重要性，本规范不考虑城市支路采用水下隧道可能性。

4.4 隧道匝道的設計速度宜取主線 0.4 倍~0.7 倍。

4.5 隧道建筑限界（如图 1 所示）符合下列规定：

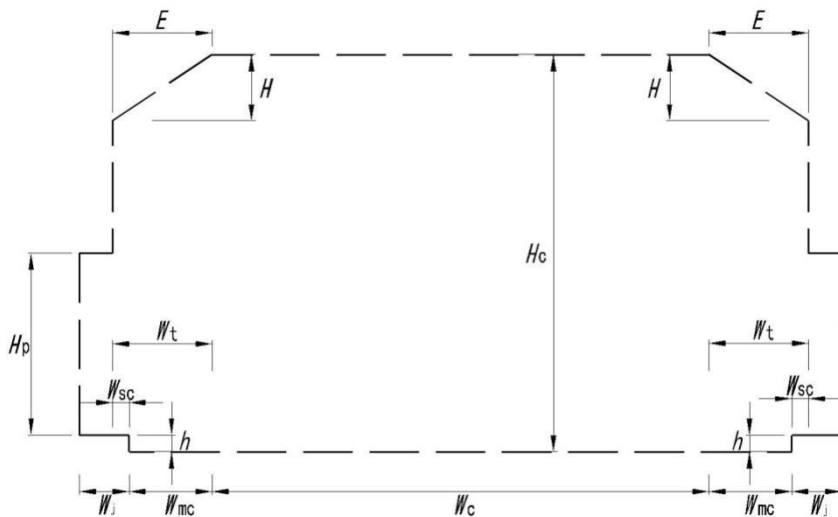


图 1 隧道建筑限界

- a) 单层隧道建筑限界高度 H_c 不应小于 4.5m; 双层隧道建筑限界高度 H_c 不应小于 3.2m;
- b) 盾构法隧道可不设检修道, 钻爆法隧道、围堰法隧道宜设置双侧检修道, 沉管法隧道根据项目需求, 可设置单侧检修道;
- c) 建筑限界组成最小值应不小于表 3 的规定;

d) 任何构件均不应侵入建筑限界。

表 3 建筑限界最小值

建筑限界 组成	路缘带宽度 (W_{mc})		安全带宽度 (W_{sc})	检修道 宽度 (W_j)	缘石外露 高度 (h)	建筑限界顶角高度 (H)	
	设计速度 $\geq 60\text{km/h}$	设计速度 $< 60\text{km/h}$				$H_c < 3.5\text{m}$	$H_c \geq 3.5\text{m}$
取值 (m)	0.50	0.25	0.25	0.75	0.25~0.40	0.20	0.50

注：当两侧设置检修道时，可不设安全带宽度。

注：

本条参照了现行《城市地下道路工程设计规范》的规定。水下隧道建筑限界宽度、高度直接与投资有密切关系。盾构法隧道是圆形隧道，设置检修通道对隧道投资影响较大，且目前国内盾构法隧道大多不考虑设置检修道；钻爆法隧道、围堰法隧道方便设置检修道，宜设置双侧检修道；沉管法隧道投资较大，可根据项目需求，一般单侧设置检修道。

4.6 隧道主要结构和设施的设计使用年限应符合表 4 的规定。

表 4 设计使用年限

类别	主体结构	次要结构	路面	运营设施
设计使用年限（年）	100	20~50	15	5~20

注：

本条参照了现行《铁路隧道设计规范》（TB10003）、《沉管法隧道设计标准》（GB/T51318）的规定。考虑隧道主体结构的重要性、运营期可更换性和可修复性，确定结构设计使用年限。

4.7 隧道的防水标准应符合表 5 的规定。

表 5 不同防水等级的防水标准

防水等级	防水标准
一级	不允许渗水，结构表面无湿渍。
二级	顶部不允许滴漏，其他部位不允许漏水，结构表面可有少量湿渍，总湿渍面积不大于总防水面积的 2/1000，任意 100m ² 防水面积上的湿渍不超过 3 处，单个湿渍的最大面积不大于 0.2m ² ；隧道工程中漏水的平均渗漏量不应大于 0.05L/m ² ·d，任意 100m ² 防水面积渗漏量不应大于 0.15L/m ² ·d。

4.8 隧道的防水等级应符合下列规定：

- a) 设备用房、设备箱孔符合一级防水标准。
- b) 车行横通道、人行横通道符合二级防水标准。
- c) 车行隧道不低于二级防水标准。

4.9 隧道应加强施工期间环境条件、施工状况的监测工作，实施信息化设计。

4.10 隧道工法的选择宜符合下列规定：

- a) 工程地质为均匀土质地层，且两岸接线较长，可选择盾构法方案。
- b) 工程两岸无重要的码头，且两岸接线要求短、阻水率要求高，可选择沉管法方案。
- c) 工程地质为岩石地层，且两岸接线长，可选择钻爆法方案。
- d) 工程范围水域较浅，航运不繁忙，且两岸接线要求短，可选择围堰法方案。

5 工程条件调查

5.1 一般规定

5.1.1 工程条件调查应结合各设计阶段任务、目的、编制深度要求，分阶段进行。

注：

可行性研究阶段的工程调查为隧道选址、路线比选提供基础资料；初步设计阶段的工程调查为隧道推荐的建设方案（隧道施工方法、隧道推荐线路）比选提供基础资料；施工图阶段的工程调查为隧道施工图设计提供基础资料。各阶段对调查资料的侧重点和深度需求都不一样，故本条明确工程条件分阶段调查。

5.1.2 工程条件调查范围应根据隧址所在区域条件和隧道工程规模等确定。

注：

工程调查范围主要指工程调查覆盖的区域，应满足隧道各方案同深度比选需求。

5.1.3 工程条件调查内容应包括基础资料收集与调查，工程地质、水文地质勘测等。

5.2 基础资料收集与调查

5.2.1 水下隧道环境及场地资料收集应包括：

a) 自然地理条件资料，包括气温、湿度、降水、雾况、风向、风速等，其中气温、降水量、风速应调查其极端值；

b) 地质资料，应包括地形、地貌、区域地质、地震历史、抗震设防烈度、设计地震分组、设计基本地震加速度等；

c) 水文资料，应包括水位、波浪、流速、流向、流量、水温、重度、水质、含泥（砂）量、内涝水位、防洪水位、潮汐，以及水底地形、河（湖）床冲刷和淤积、河（湖）床稳定性及演变分析等资料；

注：

水下隧道施工方法有盾构法、钻爆法、沉管法和明挖围堰法等。沉管法隧道存在大量水中作业工序，对水位、波浪、流速等资料主要服务于沉管法隧道方案。

d) 现状及规划资料，包括道路交通、城市建设、港口码头、航道运输、堤岸防护等；

e) 环境资料，包括隧址区附近大气环境现状、车辆废气排放要求、噪声要求、水域生态保护要求以及隧道口外部环境亮度等；

f) 现场施工条件资料，包括场地、供水供电、建筑材料来源、装备和机械等。

5.2.2 基础资料收集应包括隧址附近的已建或在建工程，尤其是隧道和城市轨道交通等地下工程的地质和水文资料。

注：

5.2.1~5.2.2 前期资料收集主要是针对既有资料的收集，自然地理条件、现状及规划、环境、施工条件等可通过相关部门收集。在初勘和详勘开展前，可通过对隧址附近的已建或在建工程的地质和水文资料收集，间接了解隧道周边的地质情况。

5.2.3 基础资料应与拟建工程有关的法律法规、方针政策要求及各级政府出台的相关文件纳入收集范围。

5.3 工程勘测

5.3.1 工程地质和水文地质勘测根据不同的设计阶段可分为可行性研究勘察、初步勘察和详细勘察，必要时进行补充勘测。

5.3.2 水下地形测绘应符合下列规定：

a) 水下地形测量应与陆上地形测量互相衔接；

b) 可行性研究阶段，水下地形应以搜集既有资料和现场调查为主，工程地质测绘比例应满足相关审批部门的要求；

c) 初步设计阶段测绘比例宜采用 1:1000~1:2000，测绘范围宜取隧道轴线两侧各

2km~3km；施工图设计阶段，测绘比例宜采用 1:500~1:1000，测绘范围宜取隧道轴线两侧各 0.5km~1km；

d) 各阶段测绘范围应涵盖隧道大型临时工程所需地形资料。

注：

可行性研究及初步设计阶段水下地形测绘范围应满足不同线位方案比选的要求，当线位方案较为明确时可适当缩窄测绘范围。对于沉管法隧道，测绘范围应涵盖干坞场地和管节浮运路线的地形，管节浮运区域地形应沿河床断面方向全断面测绘。

5.3.3 隧道勘察应结合不同的施工工法，根据隧道所处地形、地质、临近建（构）筑物及隧道位置关系对场地条件进行分级后分阶段进行，场地复杂程度按附录 A 分为简单、中等及复杂三级。

注：

水下隧道陆域段勘察与常规陆上隧道无区别，本规范主要针对水域段勘察工作进行规定。

5.3.4 可行性研究勘察以搜集资料、现场踏勘为主，辅以必要的物探、钻探与测试工作，对拟建场地稳定性和工程建设适宜性做出评价，勘察工作应符合下列规定：

a) 物探宽度应根据路线比选范围及结构特点确定，不应小于结构边线外侧 150m；且物探纵断面测线每轴线不少于 1 条，场地复杂程度为复杂的应增加间距不小于 500m 的横断面测线；

b) 钻探点平面布置孔距宜为 400m~500m，钻探点总数量不宜少于 2 个，且对沿线每一地貌单元及工法分段不应少于 1 孔；

c) 在松散地层中，钻探孔深度应达到拟建隧道结构底板下 2.5 倍隧道高度，且不应小于 20m；

d) 在微风化及中等风化岩石中，钻探孔深度应达到结构底板下，且不应小于 8m，遇岩溶、土洞、暗河时应穿透并根据需要加深钻孔。

注：

水下隧道勘察物探的重点在于查明岩土分界面，因此对于沉管法隧道及围岩隧道，可不必要进行物探工作。

5.3.5 初步勘察阶段，勘察工作按下列规定：

a) 物探测线以纵断面测线单座隧道不少于 1 条，场地复杂程度为复杂处纵断面测线单座隧道不少于 2 条，且应增加间距不小于 150m 的横断面测线；

b) 场地复杂程度判定为复杂的隧道，钻探点总数不应少于 5 个，且控制性钻孔不应低于总钻孔数的 25%；

c) 根据施工工法，结合场地复杂程度，盾构法隧道钻孔间距宜为 50~100m，沉管法隧道钻孔间距宜为 75~100m，钻爆法隧道钻孔间距宜为 100~150m，围堰法隧道钻孔间距宜为 50~75m；

d) 盾构法隧道及钻爆法隧道，钻孔布置应在隧道洞壁外侧 6~8m 处，且盾构法隧道工作井位置应布设钻孔；沉管法隧道及围岩隧道钻孔应沿基坑两侧布置，基坑宽度大于 30m 时，基坑中部宜布设钻孔；

e) 在松散地层中，盾构法隧道、沉管法隧道及钻爆法隧道，一般性钻孔进入隧道底板以下不应小于 1.5 倍隧道高度，控制性钻孔进入隧道底板以下不应小于 2.5 倍隧道高度；围堰法隧道，钻孔进入基坑底一下中风化或微风化岩层不应小于 5~10m，遇软土或降水设计需要，宜穿过软土层或透水层（含水层）；

f) 在微风化及中等风化岩石中，钻孔进入隧道底板以下，不应小于 1 倍隧道高度，遇岩溶、土洞、暗河时应穿透并根据需要加深钻孔。

注：

钻孔的布置、间距以及深度要求在参考各类规范的基础上，根据各种施工工法的侧重点，依据类似工

程经验确定。钻孔终孔后，应按照相关规定进行封孔，尤其对于盾构法隧道及钻爆法隧道，应严格执行。

5.3.6 详细勘察阶段，勘探应符合下列规定：

- a) 物探测线以纵断面测线每洞室不少于 2 条，地质条件复杂处纵断面测线每 2 洞室不少于 3 条，且增加间距不少于 100m 的横断面测线；
- b) 根据施工工法，盾构法隧道钻孔间距宜为 30~50m，沉管法隧道钻孔间距宜为 30~35m，钻爆法隧道钻孔间距宜为 50~75m，围堰法隧道钻孔间距宜为 20~25m；
- c) 钻孔深度参考初 4.3.5 第 3 条第 5 款；
- d) 在微风化及中等风化岩石中勘探孔深度应进入隧道底板以下 0.5 倍隧道高度且不应小于 5m，遇岩溶、土洞、暗河时应穿透并根据需要加深钻孔。

注：

详勘阶段钻孔深度可参照初勘执行；详勘阶段控制性钻孔不应少于总钻孔数的 1/3。

5.3.7 隧道勘察的取样与试验需考虑施工工法的差异，进行与隧道设计施工要求相关的非常规试验，并符合下列规定：

- a) 盾构法隧道及钻爆法隧道宜进行土体的渗透破坏测试；
- b) 盾构法隧道宜进行岩土体的石英含量及岩石磨蚀强度测试；
- c) 采用冻结法施工时，应现场取样对土体热物理力学指标及冻结体强度进行测试；
- d) 沉管法隧道宜进行不同季节、不同温度及不同浑浊度条件下水的重度测试；
- e) 围堰法隧道宜进行标准贯入或十字板剪切等原位测试。

5.3.8 沉管法隧道应在河底实测淤泥层厚度及各分层浮泥密度，管节疏浚范围内布设勘探孔，勘探孔深度应满足疏浚工程量计算需要，勘探孔间距根据区域地质环境具体确定。

5.3.9 盾构法隧道、钻爆法隧道以及围堰法隧道，在钻探工作完成后，应使用特定材料和方法，对钻探孔及时进行封孔回填。

注：

根据施工工法差异，对岩土试验的侧重进行了相关要求：土体的渗透性对钻爆法隧道和盾构法隧道设计施工影响较大，除进行常规岩土物理参数试验外，宜进行土体渗透破坏比测试；沉管法隧道一节管段的规模非常大，水的重度对其安全影响较大；石英含量对盾构机机具和刀盘的磨损和冲击影响较大，因此需进行石英含量和磨蚀强度的测试；土体热物理参数是保障冻结法安全合理的重要指标。

6 总体设计

6.1 一般规定

6.1.1 隧道应根据周边环境、技术条件及使用功能，对隧道平纵横布置、防排水及防灾疏散等内容开展总体设计。

6.1.2 隧道总体设计应包括下列内容：

- a) 隧道轴线和洞口位置选择；
- b) 隧道施工工法选择；
- c) 隧道平面、纵断面线形设计；
- d) 隧道横断面设计；
- e) 隧道运营通风、防灾疏散方案设计。

6.1.3 隧道总体设计应符合下列规定：

- a) 隧道设计应满足城市总体发展规划、城市道路网规划、道路功能、航道规划、堤岸规划、水利规划、防洪防涝、自然环境及可持续发展等方面的要求；
- b) 隧道设计应与既有地面建（构）筑物、地下构筑物、地下管线、堤岸等设施相协调，减少拆迁；

- c) 隧道设计应根据前期工程条件调查,对轴线位置、平纵线形、洞口位置、断面大小及形状、施工工法等进行综合比选;
- d) 隧道设计速度应与接线道路设计速度匹配;
- e) 隧道内应按禁止装载易燃、易爆及其他危险品的车辆通行条件进行设计。

注:

水下隧道是一个封闭空间,易燃易爆及危险物品发生爆炸后隧道危害性大、修复难度大,国内外既有工程案例均不推荐运输易燃易爆及危险物品的车辆通过水下隧道。

6.1.4 隧道设计应满足隧道正常运营、防灾疏散及管理维护等方面的要求。

6.1.5 城市水下隧道施工工法应综合技术可行性、施工安全性、经济合理性等影响因素确定。

注:

不同水下隧道施工工法各有其适用范围,各有优缺点,与施工安全和运营安全联系紧密,是整个方案合理性的基础,必须经过多方面科学比选和充分论证后方可确定。

6.1.6 隧道建筑限界、横断面布置及结构尺寸应根据城市道路等级、设计速度、设备空间及施工工法等确定,满足隧道功能、结构受力、运营维护等要求。

6.1.7 隧道结构设计应符合使用条件、结构类型、施工工艺、机械设备的要求,并满足设计使用年限、使用功能等要求。

6.1.8 隧道通风、防灾疏散设计应根据隧道长度、平面位置、辅助通道、交通组成、环境保护、运营安全等要求确定。

注:

长大隧道通风方式、防灾疏散方案对工程规模、隧道方案影响很大,因此隧道总体设计时应对其进行研究有利于确保技术方案的可行性及控制工程投资。

6.1.9 隧道应开展施工期监控量测设计与运营期健康监测设计。

注:

随着社会的发展,人们越来越关注隧道施工期的风险管理和运营期的结构安全,开展施工期监控量测设计与运营期健康监测设计是目前国内比较常用的解决上述难题的有效措施。

6.2 隧道位置选择

6.2.1 隧道位置应选择在稳定的地层中,并选择抗震有利地段,避免穿越工程地质和水文地质极为复杂的地区,避免穿越水域内深槽及地势变化较大的区域,当必须通过时,应采取切实可靠的工程措施。

注:

在复杂地区隧道的施工难度将大大增加,施工中的风险、工期及造价等均不可控,建成后的隧道也可能处于不稳定的地质体中,这给隧道的施工及运营安全带来了极大的挑战。当无法避免通过地质较差的区域时,应经过分析论证,采取专项设计方案,保证隧道在设计年限内满足安全性、适用性及耐久性的要求。

6.2.2 盾构法隧道宜选在相对均质的地层中,避免穿越地层信息不明、不稳定的区段。

注:

盾构法适用于比较均匀的地层,有利于选择有针对性设计的盾构机设备。当地质条件不明时,可能会出现盾构机设备适应性差、机器故障频繁等现象,从而导致施工成本、工期及风险大大增加。

6.2.3 沉管法隧道宜选择在土质地层,避免水流速度大、河势不稳定、水深过大的地段。

注:

沉管法隧道选择在土质地层,基槽开挖难度低、工程投资少,当遇到大量的岩石开挖时会大大增加工程投资。河势不稳定会加大隧道的埋深,不能充分发挥沉管法隧道埋深浅的优势。

6.2.4 钻爆法隧道宜选在完整稳定的岩石地层中,避免穿越大型断层破碎带、风化槽及软弱夹层地带,避开有困难时,宜调整平面线位,使隧道轴线以垂直或大角度通过。

6.2.5 围堰法隧道宜选择在不通航、水深浅、流速小的水域。

6.2.6 隧道洞口位置应与周围自然环境相协调，避开环保敏感点。

6.3 隧道线形设计

6.3.1 隧道的平纵线形应根据隧道用途及特点，综合考虑工程地质条件、水文条件、洞口接线、防洪防涝以及施工工法等因素确定。隧道内外平纵线形应相互协调，与两岸路网连接顺畅。

注：

水下隧道的线形十分重要，合理的线形不但能保证施工安全，而且能节约工程造价。水下隧道工程对地质条件比较敏感，始终要把地质条件作为确定路线方案的第一要素，尽量避开水域风化槽和不良地质地段，降低工程风险及造价；两端接线方案也是决定路线走向的重要控制因素，接线方案重点研究两岸的交通疏解及与现有道路的交通组织；充分考虑项目建设条件对工程实施可行性和经济合理性的影响。

6.3.2 隧道的线形设计应符合现行行业标准《城市道路路线设计规范》（CJJ 193）的规定。

6.3.3 隧道宜采用直线或不设超高的较大半径平曲线，沉管法隧道平曲线半径不宜小于 800m，盾构法隧道平曲线半径不宜小于 600m。

注：

根据国内外盾构法隧道经验，一般平曲线最小半径按 50D（D 为盾构法隧道外径）控制，双洞四车道盾构隧道外径约为 12m，故盾构隧道平曲线最小半径按 600m 控制；沉管法隧道采用平曲线时，要考虑曲线管节对管节浮运沉放的影响，以及偏压对水下对接的稳定性和接头密封性的影响。国内已建的上海外环隧道、深中通道工程等项目平曲线最小控制半径均为 800m，参考《沉管法隧道设计标准》5.3.1 条文说明。

6.3.4 隧道纵断面线形设计应符合下列规定：

- a) 根据隧道两端接线、河（海）床地形、地质等条件按“U”形、“V”形、“W”形进行设计；
- b) 最小纵坡不宜小于 0.3%，最大纵坡不宜大于表 6 的取值；

表 6 城市道路水下隧道最大纵坡

设计速度（km/h）	80	60	50	40	30	20
一般值（%）	3	4	4.5	5	7	8
最大值（%）	5		6		8	

- c) 当采用大纵坡时，应对行车安全、运营通风、工程造价等进行技术经济论证。

注：

水下隧道地质条件复杂、投资巨大、风险较高，纵断面线形直接影响整个工程的规模、造价及安全，纵坡的取值中不仅要考虑施工工法、工程风险等因素，还应考虑到建成后行车安全、隧道排水等方面的问题。最小纵坡以隧道建成后洞内水（包括渗漏水、涌水、雨污水、消防用水）能自然排泄为原则，要求不小于 0.3%。通常为使隧道进出口与两岸路线连接顺畅，需在隧道两端设置较大坡度，但过大的坡度将导致道路通行能力急剧下降，同时还会带来汽车排污量增加等一系列问题。根据国内外隧道建设经验和我国国情，规定最大纵坡不宜大于 8.0%。

6.3.5 沉管法隧道变坡点应结合管节分节方案综合考虑。

注：

沉管法隧道道路路面的竖曲线拟合是通过调整管底压重层厚度来实现的，将变坡点设置在管节接头附近有利于减小压重层厚度的影响。

6.3.6 隧道最小埋深应根据地质条件、航道条件、河床稳定性、施工工法等因素确定，并应符合下列规定：

- a) 盾构法隧道在盾构始发段处的覆土厚度不宜小于 0.6D，在正常段覆土厚度不宜小于 0.8D，覆土厚度还应满足运营期隧道抗浮及结构稳定的要求；

b) 沉管法隧道和围堰法隧道回填覆土顶部高程不宜高于河（海）床，隧道结构顶不宜高于河（海）床最大冲刷线；

c) 钻爆法隧道在硬质岩埋置深度不宜小于 $1.0B$ ，软质岩埋置深度不宜小于 $1.5B$ 。

6.3.7 盾构法隧道平面、纵断面设计应符合下列规定：

a) 隧道线路平面宜为直线或大半径曲线，确定隧道线路平面最小曲线半径时宜计及盾构设备的转弯能力；

b) 隧道确定最大坡度时宜计及盾构机及后配套运输设备的爬坡能力。

6.3.8 盾构法隧道不宜穿越下列地层，确需穿越时，应采取针对性的工程措施：

a) 长区段的软硬不均地层、孤石或漂石地层；

b) 岩溶发育、富含可燃气体等不良地质体；

c) 长区段且深厚的欠固结软土或液化地层；

d) 地质断裂带。

6.3.9 双洞的盾构法隧道及钻爆法隧道净距应符合下列要求：

a) 盾构法双洞隧道净距不宜小于 $1.0D$ ，工作井处净距不宜小于 $0.5D$ ；

b) 钻爆法隧道净距在岩石段不宜小于 $1.0B$ ，土质段净距不宜小于 $2.0B$ ；

c) 设置有横向联络通道的并行双洞隧道，其净距不宜大于开挖跨度或直径的 3 倍。

6.3.10 城市道路水下隧道洞口内外各 $3s$ 设计速度行程长度范围内的平纵线形应一致。

注：

由于隧道洞口内外光线急剧变化以及行车宽度和环境的改变，隧道进出口是事故多发地段，因此提出了隧道洞口内外 $3s$ 设计速度行程长度距离内平纵线形一致，有利于保证行车安全。

6.3.11 隧道接地段处应设置反向坡，形成排水“驼峰”，“驼峰”高度应综合考虑内涝、设计洪水位、周边地形以及道路等级等因素确定。

注：

当受道路线形限制，排水驼峰高度无法满足要求时，应在道路两侧采取截水措施，同时提高道路周边的排水能力，防止水汇入坡底。

6.3.12 隧道设置平曲线及凹型竖曲线路段，必须进行停车视距验算。

注：

相比正常地面道路的行驶条件，水下隧道内的空间视觉感观相对更狭小，特别是在弯道行驶中，内侧的侧墙往往阻碍了驾驶员的视线，在视距验算不满足的地方还应设置一定的视距平台，以保证通行安全。

6.4 隧道横断面设计

6.4.1 隧道横断面应满足建筑限界、行车安全、事故疏散迅速、日常维护维修等要求。

注：

对隧道空间的充分利用一般集中体现在横断面设计中：一是在保证行车与疏散安全的基础上，提高空间利用的合理性，适应功能使用要求；二是提高空间利用率，增加车辆通行能力和预留设备布置余量，为可持续发展提供条件。

6.4.2 隧道横断面应根据使用功能进行分区设计。

注：

隧道内空间进行功能分区设计，有利于提高隧道管理水平与服务能力。盾构法隧道可进行上中下分区，上层通风区、中层行车区、下层设备、管线或逃生区，其他隧道可以水平分区，分行车区以及设备、管线或逃生区。

6.4.3 隧道应根据采用的施工工法确定不同的断面形状：

a) 盾构法隧道宜采用圆形断面，单洞双线（单层或双层）、双洞单线（单层）方案；

b) 单洞双线盾构法隧道一般直径较大，适用于两岸陆域接线狭窄，无法布置双洞隧道的情况；

c) 沉管法隧道和围堰法隧道宜采用双孔一管廊或多孔多管廊的矩形或折板多边形断面的整体式结构；钻爆法隧道宜采用单心圆或三心圆，双洞单线方案。

6.4.4 隧道内轮廓设计除应满足建筑限界要求，还应满足运营设备布置及内部装修需要，尚应为结构变形、施工误差预留富裕量。

6.4.5 对长度大于 1000 米、行驶机动车的隧道，严禁在同一孔内设置非机动车道或人行道。
注：

水下隧道内汽车排放的尾气比较集中，堵车、交通事故、火灾等特殊工况下，行人及非机动车在隧道内容易缺氧窒息或一氧化碳、硫化物中毒，隐患极大。

6.4.6 对通行无轨电车、有轨电车、双层客车等其他特种车辆的道路，最小净高应满足车辆通行的要求。

6.4.7 城市道路水下隧道设备布置应遵循以下原则：

- a) 不得侵入建筑限界；
- b) 满足工艺要求，方便维修保养；
- c) 电缆、管线应设置专用廊道，集中布置。

6.4.8 服务隧道、紧急逃生通道、车行横通道、人行横通道等附属通道的建筑限界应根据使用要求确定。

6.4.9 隧道宜根据施工工法、地质条件等因素确定横通道的设置。

注：

根据现行国家标准《建筑设计防火规范》（GB50016），城市道路水下隧道宜设置车行横通道或车行疏散通道。车行横通道的间距和隧道通向车行疏散通道入口的间隔宜为 1000m~1500m。人行横通道的间隔和隧道通向人行疏散通道入口的间隔，宜为 250~300m。一般而言，当采用单一疏散方式时，横通道的间距宜短一些；当采用组合疏散方式时，在隧道消防设施齐全的情况下，间距可适当加大。鉴于水下隧道施工风险较大，盾构法隧道横通道间距可适当加大，同时有的隧道取消了横向通道，改为纵向疏散，如武汉长江隧道、汕头海湾隧道等。

6.4.10 隧道横断面布置宜符合下列规定：

- a) 长度大于 5km 的钻爆法隧道宜设置独立服务隧道，并利用人行及车行横通道与行车隧道连接，方便维护管理及紧急逃生；
- b) 钻爆法隧道的服务隧道应考虑便于与横通道交叉段处理、检修人员逃生等因素，净空断面应满足通行专用救援车辆的要求；
- c) 盾构法隧道宜利用断面下部空间设置独立逃生通道；
- d) 沉管法隧道及围堰法隧道宜利用两侧行车道互为逃生通道。

6.4.11 隧道内的路面横坡应根据隧道长度和平、纵线形等因素，并结合路面排水方案综合分析确定，坡度宜采用 1.0%~2.0%。

6.5 隧道建筑布置

6.5.1 隧道建筑总平面布置应符合城市的总体规划、环境保护和城市景观要求，满足交通功能，方便运营管理，注意节约用地和资源共享。

注：

隧道建筑总平面布置应根据主体隧道的走向及功能要求，结合地面规划，合理布置隧道运营管理中心、泵房、变电所、通风机房、地面风井、出入口、应急车辆停车场、检查亭、收费口等附属设备用房。

6.5.2 隧道的建筑设计应满足隧道道路交通的需要，并满足施工、运营、管理、防灾疏散要求，为乘行人员提供安全舒适的通行环境。

6.5.3 附属用房及设施宜集中布置，多座水下隧道宜共用管理中心。

6.5.4 在满足设备工艺要求的前提下，隧道运营设备应采用模数化、分段集中的布置方式。

- 6.5.5 隧道设备箱孔不应骑跨变形缝布置。
- 6.5.6 盾构工作井内净尺寸应满足盾构机吊运、安装及进、出洞的施工要求，并宜利用工作井内空间布置消防楼梯（电梯）及管线、通风机房、变电所、泵房等隧道附属用房。
- 6.5.7 工作井留作永久结构时，井内应设置直通地面的消防疏散楼梯，当工作井内车道层至地面高差大于等于 20m 时宜设置消防电梯。
- 6.5.8 通风机房应根据通风工艺要求布置，宜靠近主体隧道。
- 6.5.9 城市道路水下隧道通风竖井应布置在岸上，确需布置在水域时，应具备良好的维护条件。
- 6.5.10 风亭、风塔应根据通风工艺及城市景观的要求合理设置，排风塔高度应满足环境保护要求。
- 6.5.11 变配电所、消防泵房、雨水泵房、废水泵房、管理楼应根据工艺要求选址，建筑设计应满足国家和地方现行相关规范的规定。
- 6.5.12 变配电所应具备可靠的排水条件，不应设置在隧道最低点。
- 6.5.13 隧道出入口附近宜设置应急、事故车辆停车场，停车位不宜少于 3 个。

7 结构设计

7.1 一般规定

- 7.1.1 隧道结构设计应结合横断面布置、施工工法、地质条件、使用条件等因素，通过工程类比和结构分析计算确定结构参数。
- 7.1.2 隧道结构设计应减少隧道施工过程中及建成后对周边环境的不利影响，应考虑隧道周边环境变化对隧道结构的作用。
- 7.1.3 隧道结构计算应采用基于极限状态的分项系数法，分别按施工阶段和使用阶段进行强度、刚度和稳定性计算，并应对使用阶段的变形及裂缝宽度进行验算。
- 7.1.4 隧道应按重点设防类（A 类）设防，宜采用两水准抗震设防。
- 7.1.5 隧道抗震计算方法应根据地层条件、隧道几何形体、输入地震动等因素确定，计算方法包括反应位移法和时称分析法。

注：

抗震设防目标是 E2 地震作用（重现期 475 年）下，隧道不损坏，应保持其正常使用，结构处于弹性工作阶段，不影响周围环境和市政设施正常使用（性能要求 I）；E3 地震作用（重现期 1600~2475 年）下，隧道工程不损坏或仅需对非重要结构部位进行一般修理，短期内能恢复其正常使用功能，结构局部进入弹塑性工作阶段，对周围环境影响轻微，不影响隧道设施正常使用（性能要求 II）。

不同的抗震计算方法有其相应的特征及适用性，计算方法的选择应根据隧道重要程度、抗震设防类别、抗震性能要求、断面形状、结构特征、隧址区工程地质条件及输入地震动参数等因素综合确定。反应位移法能较好地反映隧道随地层而振动的特性，概念明确，计算工作量较小；时程分析法可考虑地震动的峰值、频谱特性和持续时间，能较好地处理介质中的非均匀性、各向异性、非线性及复杂几何边界条件，全面揭示隧道在地震作用下的响应规律。

- 7.1.6 隧道各部分结构设计应根据其重要性等级进行安全分级。结构安全等级可按表 7 的规定进行划分。

表 7 隧道结构的重要性分级

结构安全等级		隧道结构
一级	主体结构	钻爆法隧道初期支护、行车隧道结构、洞门、车道板、地下泵房、地下风机房

		等
二级	一般结构	服务隧道结构、风道结构、遮光棚等
三级	次要结构	边水沟、电缆沟、临时衬砌等

注：

按隧道结构破坏后果的严重性，即危及人的生命、造成经济损失、对社会或环境产生影响等，划分为三个结构安全等级。

划分结构安全等级的原则是，同一工程结构内的各种结构构件一般与结构采用相同的安全等级，但允许对部分结构构件根据其重要程度和综合经济效果进行适当调整。如提高某一结构构件的安全等级所需额外费用很少，又能减轻整个隧道结构的破坏从而大大减少人员伤亡和财物损失，则可将该结构构件的安全等级比整个结构的安全等级提高一级；相反，如某一结构构件的破坏并不影响整个结构或其他结构构件，则可将其安全等级降低一级。

7.2 荷载分类及荷载效应组合

7.2.1 隧道的荷载分类应符合表 8。

表 8 荷载分类

荷载分类		荷载名称
永久荷载		结构自重
		地层压力
		外水压力
		装修或设备重量
		预加应力
		混凝土收缩及徐变影响
		地基下沉影响
		洞口附属
		可变荷载
隧道内人群荷载		
水位变化（潮汐）及波浪的影响		
风机等设备引起的动荷载		
其他可变荷载	温度作用	
	施工荷载	
	偶然荷载	
爆炸影响		
火灾影响		
人防荷载		
车辆撞击力		
沉船、抛锚或河道疏浚产生的撞击力等其他偶然荷载		

7.2.2 隧道上方覆盖层为软土或回填土石、隧道埋置较浅时，竖向土压力宜按全部覆土厚度计算；地层条件较好时，可对竖向土压力进行折减。水土压力计算应符合下列规定：

a) 水土压力采用水土合算时，地下水位以上的土体应采用天然重度，地下水位以下的土体应采用饱和重度；

b) 水土压力采用水土分算时，地下水位以下的土体应采用浮重度。

7.2.3 隧道土压力应考虑设计使用年限内河床改道、深泓变化、覆盖层冲刷及淤积的影响。

7.2.4 20 年一遇洪水位条件下的水压力可按永久荷载计算，20 年一遇洪水位至设计最高或最低水位产生的水压力可按可变荷载计算，并应按 300 年一遇洪水位条件下产生的水压力、冲刷及淤积等情况对结构强度及抗浮进行校核。

7.2.5 隧道的偶然荷载应符合下列规定：

a) 地震作用应按现行国家标准《中国地震动参数区划图》（GB18306）规定的本地区抗震设防要求确定；对进行过工程场地地震安全评价的，应采用相关主管部门批准的建设工程的抗震设防要求确定，但不应低于本地区抗震设防要求确定的地震作用；

b) 人防荷载计算应符合现行国家标准《人民防空工程设计规范》（GB50225）的规定；

c) 火灾影响应根据设计火灾规模进行计算，并应考虑隧道结构在设计火灾工况下可修复；

d) 隧道撞击荷载应根据撞击物体的质量、速度及撞击效应综合考虑其作用效果；

e) 沉船荷载应按工程水域可能通航的最大船舶类型分析确定。

7.2.6 隧道结构设计应根据使用过程中在结构上可能同时出现的荷载，按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行组合，并应取各自最不利的组合进行设计。

7.2.7 承载能力极限状态应按荷载的基本组合或偶然组合计算荷载组合的效应设计值，并按下式进行计算：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (7.2.7)$$

7.2.8 重要性系数应符合下列规定：

式中：——重要性系数；

S_d ——荷载基本组合或偶然组合的效应设计值，包括组合的弯矩、剪力和轴力设计值等；

R_d ——结构构件抗力的设计值。

a) 安全等级为一级、二级和三级的结构构件，重要性系数应分别取 1.1、1.0 和 0.9；

b) 当进行施工阶段承载力验算时，结构重要性系数应取 1.0；

c) 当进行偶然组合验算时，结构重要性系数应取 1.0。

7.2.9 荷载基本组合的效应设计值 S_d 应按下列式计算确定：

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{G_j} S_{G_{jk}} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \gamma_{L_i} S_{Q_{ik}} \quad (7.2.9)$$

式中： γ_{G_j} ——第 j 个永久荷载的分项系数；

γ_{Q_i} ——第 i 个可变荷载的分项系数，除施工荷载分项系数应取 1.2 外，其它可变荷载分项系数应取 1.5；当可变荷载效应对结构有利时应取 0；

γ_{L_i} ——第 i 个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数；

$S_{G_{jk}}$ ——按第 j 个永久荷载标准值 G_{jk} 计算的荷载效应值；

$S_{Q_{ik}}$ ——按可变荷载标准值 G_{ik} 计算的荷载效应值；

m ——参与组合的永久荷载数；

n ——参与组合的可变荷载数。

7.2.10 荷载效应偶然组合的设计值 S_d 应按下列公式计算确定：

地震组合：
$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{G_j} S_{G_{jk}} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \psi_{C_i} S_{Q_{ik}} + \gamma_{EH} S_{EHK} + \gamma_{EV} S_{EVK} \quad (7.2.10-1)$$

人防组合：
$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{G_j} S_{G_{jk}} + S_C \quad (7.2.10-2)$$

式中： ψ_{C_i} ——第 i 个可变荷载的组合值系数，应取 0.6；

γ_{EH} 、 γ_{EV} ——水平和竖向地震作用分项系数；

S_{EHK} 、 S_{EVK} ——水平和竖向地震作用效应值；

S_C ——人防荷载作用效应值。

7.2.11 永久荷载的分项系数应按表 9 采用。

表 9 永久荷载分项系数

永久荷载	结构自重、 地下水压力	其它 永久荷载
当永久荷载效应对结构不利时	1.25	1.35
当永久荷载效应对结构有利时	1.0	1.0

7.2.12 可变荷载考虑设计使用年限的调整系数应按表 10 采用。

表 10 可变荷载考虑设计使用年限的调整系数

结构设计使用年限（年）	50	100
γ_L	1.0	1.1

7.2.13 水平和竖向地震作用分项系数的确定应符合表 11 的规定。

表 11 地震作用分项系数

地震作用	水平地震作用分项系数 γ_{EH}	竖向地震作用分项系数 γ_{EV}
仅计算水平地震作用	1.3	—
同时计算水平与竖向地震作用（水平 地震为主）	1.3	0.5
同时计算水平与竖向地震作用（竖向 地震为主）	0.5	1.3

7.2.14 正常使用极限状态应根据不同的设计要求，采用荷载的标准组合和准永久组合，并

应按下式计算：

$$S_d \leq C \quad (7.2.14)$$

式中：C——结构或构件达到正常使用要求的规定限值，例如变形、裂缝等的限值。

7.2.15 荷载标准组合和准永久组合的效应设计值 S_d 应分别按下列公式计算：

$$\text{标准组合：} \quad S_d = S_{Gk} + \sum_{i=1}^n S_{QiK} \quad (7.2.15-1)$$

$$\text{准永久组合：} \quad S_d = S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad (7.2.15-2)$$

式中： ψ_{qi} ——第 i 个可变荷载的准永久值系数，应取 0.8。

7.3 结构计算

7.3.1 隧道结构计算应考虑各类作用组合、地质差异及周边条件变化对结构的不利影响，并应符合下列规定：

- a) 隧道结构计算模型应根据衬砌构造特点、施工工艺、地质条件及接头形式等确定；
- b) 内部结构需承受车辆荷载时，计算及构造应符合现行城市桥梁设计规范的相关要求；
- c) 地层与结构的相互作用应根据结构形式、地层特性、加固方法以及施工工艺等因素确定；
- d) 当城市道路水下隧道上方存在不对称竖向荷载时，或侧向水平荷载可能出现偏载时，应按荷载的实际分布情况计算；
- e) 采用地下连续墙或桩板墙围护的结构，可根据其与隧道结构的结合面处理方式，按叠合墙或复合墙计算。

注：

第 a) 款城市道路水下隧道结构计算应充分考虑以下特点：

(1) 结构的主要构件常兼有临时结构和永久结构的双重功能，其结构形式、构件组成、刚度、支承条件和荷载情况在结构形成过程中不断变化。

(2) 结构受力与施工方法、施工工序以及工程措施密切相关。

(3) 新施作的构件是在既有结构体系已产生变形和应力的情况下设置的，荷载效应有连续性。基于此，本规范强调要根据结构实际受力过程进行其内力和变形分析；其次是使用阶段分析时要考虑施工阶段在结构体系中已产生的内力和变形，即考虑受力的连续性。

第 b) 款在《公路工程技术标准》(JTG B01) 中，汽车荷载规定为公路—I 级和公路—II 级两个级别。汽车荷载组成为车道荷载和车辆荷载。对于内部结构框架体系整体计算采用车道荷载。当汽车荷载作为隧道完工后作用于衬砌内侧的内部荷载时，其结构的局部加载采用车辆荷载。

第 c) 款地层对结构的弹性抗力是表征围岩与衬砌联合工作时围岩分担荷载的能力，反映了围岩的综合物理力学性质，是隧道衬砌设计中重要的参数之一。

第 d) 款是指城市道路水下隧道上方的外部荷载是变化的，同时地层内水平荷载亦可能受地下构筑物或相邻隧道的影响，左右两侧荷载不同，因此衬砌结构计算应根据实际荷载分布情况进行计算。

第 e) 款围护结构和内衬结构组成的结构体系又大体分为单一墙、复合墙和叠合墙体系。单一墙体系是将围护结构直接作为主体结构的侧墙，不另作参与结构受力的内衬墙。复合墙体系是围护结构和内衬结构之间设置防水隔离层；叠合墙体系则是围护结构与内衬墙之间有钢筋接驳器联结，二者可视为整体墙。

7.3.2 隧道横断面结构计算应分别选取隧道顶覆土最厚和最薄、水位或地下水位最高和最低、存在偏压、隧道穿越地层条件横向突变处等不利位置进行。

7.3.3 当遇下列情况之一时，应对隧道进行纵向强度与变形计算：

- a) 隧道覆盖层厚度或地层沿隧道纵向有较大变化；
- b) 隧道穿越重要建（构）筑物或直接承受较大局部荷载；
- c) 地基沿隧道纵向产生不均匀沉降；
- d) 隧道下穿水域，河（海）势有较大变化，河（海）床有较大冲淤变化。

7.3.4 当遇下列情况之一时，宜按空间受力进行结构分析计算：

- a) 结构单元与上部建筑物或构筑物设计为整体；
- b) 结构单元基底地质条件沿纵向变化较大；
- c) 结构单元上部覆土厚度或其他荷载沿纵向变化较大；
- d) 结构单元的断面形状沿纵向变化较大；
- e) 空间受力作用明显的区段，宜按空间结构进行分析。

7.3.5 钢筋混凝土及预应力混凝土构件应进行裂缝宽度验算。裂缝宽度限值应符合表 12 的规定，并应符合下列规定：

表 12 钢筋混凝土构件表面裂缝计算宽度限值（mm）

环境作用等级	普通钢筋混凝土构件	预应力钢筋混凝土构件
I -A、I -B	0.20	0.1
I -C	0.15	0.1
II -C	0.20	0.1
II -D	0.15	0
II -E	0.10	0
III -C	0.15	0.1
III -D	0.15	0
III -E、III -F	0.10	0
IV -C	0.15	0.1
IV -D	0.15	0
IV -E	0.10	0
V -C	0.15	0.1
V -D、V -E、V -F	0.10	0

注 1：环境作用等级应符合《混凝土结构耐久性设计规范》的规定；

注 2：对裂缝宽度无特殊外观要求的，保护层设计厚度超过 30mm 时，可将保护层厚度取为 30mm 计算裂缝的最大宽度。

- a) 偏心受压构件 $e_0/h_0 < 0.55$ 时，可不验算裂缝宽度；
- b) 结构内外侧工作环境条件差别较大时，应分别确定裂缝宽度限值。

注：

裂缝宽度的限值，是指在作用（或荷载）短期效应组合并考虑长期效应组合影响下构件的垂直裂缝，不包括施工中混凝土收缩过大、养护不当及渗入氯盐过多等引起的其他非受力裂缝。混凝土裂缝宽度主要影响钢筋的锈蚀过程，通常认为，一般环境下（I 类）混凝土表面的宏观裂缝宽度不大于 0.3mm，对钢筋碳化锈蚀不会发生明显影响。预应力钢筋若发生坑蚀会加速应力腐蚀，需严格限制裂缝宽度。

7.3.6 隧道结构变形应符合表 13 及表 14 的规定。

表 13 受弯构件的容许挠度

构件类型		容许挠度 (m)
结构跨度	$B_0 \leq 5m$	$L_0/250$
	$5m < B_0 \leq 8m$	$L_0/300$
	$B_0 > 8m$	$L_0/400$

注 1: 表中 L_0 为构件净计算跨度;

注 2: 如果为悬臂构件, 则上表中的容许挠度应乘以 2.0。

表 14 盾构法隧道收敛变形和接缝张开量限制

类别	限值
收敛变形	$\leq 2\%D$ (错缝拼装) 或 $\leq 3\%D$ (通缝拼装), 且 $\leq 50mm$
接缝张开量	$\leq 2mm$ (岩质地层火周边存在重要建(构)筑物), 或 $\leq 4mm$ (大断面盾构法隧道或位于软土地层), 且小于弹性密封垫的允许张开量

注 1: 表中 D 指盾构法隧道外径;

注 2: 表中收敛变形和接缝张开量限值不含管片拼装误差造成的变形量。

注:

城市道路水下隧道结构的抗震设计应充分考虑隧道结构形式、地质条件、地形条件, 采用相应的计算方法和构造措施, 因此本条前三款要求对隧道进行纵向抗震分析。

7.3.7 设计阶段应对影响结构承载能力及运营安全的大型预留孔洞、重大设备预埋件等重要部位进行局部计算。

注:

大型预留孔洞、重大设备预埋件部位一般为结构的薄弱位置, 对结构承载能力及运营安全有一定的影响, 有必要进行局部计算, 以保证结构的安全。

7.3.8 火灾工况验算应符合以下规定:

- 火灾规模应根据隧道交通量大小及交通特性确定;
- 对于受力钢筋/钢板, 在设计火灾时间内表面温度不高于 250°C ;
- 对于不可更换的橡胶止水带, 在设计火灾时间内不高于 70°C , 或连续一小时不高于 100°C , 且最高温度不高于 150°C 。

注:

本条对沉管法隧道结构分析给予规定。

1 沉管起浮与抗浮存在矛盾, 符合浮力设计要求的最佳管节横断面, 要求使干舷高度较为适度, 沉放所需压载水量较少和钢筋混凝土用量较为经济。

2 结构纵向整体分析的目的是了解隧道纵向拉压与弯曲地震应力, 以及地震时接头处的相对位移, 需把隧道与地基土作为整体来分析。

7.3.9 隧道抗浮验算应符合以下规定:

- 抗浮验算仅考虑恒载的作用效应;
- 覆土厚度应考虑设计年限内的变化, 如疏浚、冲刷以及后期人工开挖等因素;
- 覆盖层处于地下水位以上时按天然容重的标准值计算, 处于地下水位以下时按浮重度计算;
- 当隧道基地土体在地震时可能出现液化时, 应按液化后土体的容重计算浮力;
- 施工期间应按常水位计算, 正常使用期间应按抗浮设防水位计算;
- 施工期间结构自重应按衬砌自重计算, 正常使用期间结构自重可按衬砌自重与道床自重等永久荷载之和计算;

g) 抗浮稳定安全系数, 盾构法隧道及钻爆法隧道在施工过程中不应小于 1.10, 在使用期间不应小于 1.2; 沉管法隧道及围堰法隧道在施工过程中不应小于 1.05, 在使用期间不应

小于 1.10；对地震液化及其他超设计标准工况进行抗浮校核时，不小于 1.05。

注：

本条对钻爆法隧道结构分析给予规定。

1 隧道衬砌是在围岩的主动压力和被动抗力同时作用下进行工作的。弹性抗力是指当隧道结构在荷载作用下发生变形时周边岩体或土体限制结构变形的能力，因此当围岩对隧道支护结构的变形具有约束作用时，应考虑围岩对结构的弹性抗力作用。

2 对于钻爆法隧道衬砌，水压力是影响结构安全的重要因素，而承受水压力的大小取决于防排水方式的设计：如果衬砌完全不排水，则衬砌承受的水压力为全水头；如果衬砌为全排水，则可以认为衬砌背后不承受水压。一般情况下，隧道衬砌均设计为限量排放，衬砌及仰拱背后水压力介于上述两种极端情况之间。

7.3.10 隧道抗浮稳定性应按式 7.3.10 进行验算：

$$\text{抗浮稳定安全系数：} K_f = \frac{R}{U} \quad (7.3.10-1)$$

$$\text{抗浮力：} R = W_s + W_a + F_z \quad (7.3.10-2)$$

$$\text{上浮力：} U = \gamma_w V_w \quad (7.3.10-3)$$

式中， K_f ——抗浮稳定安全系数；

R ——抗浮力（kN/m）；

U ——上浮力（kN/m）；

W_s ——隧道结构自重（kN/m）；

W_a ——隧道覆盖层的有效压重（kN/m）；

F_z ——桩基或抗浮构造的抗浮力（kN/m）；

V_w ——隧道结构排开水的体积（m³/m）；

γ_w ——地下水重度（kN/m³），可按 10kN/m³ 采用。

注：

本条对围堰法隧道结构分析给予规定。

处于高地下水位中的围堰法隧道结构，由于结构覆土浅、结构大而深，尤其是从隧道向地面过渡的敞口段，需要满足其抗浮稳定性。基坑稳定性检算的内容要求根据围护结构类型、工程地质和水文地质条件确定，同时还需考虑地基处理方式。

7.3.11 抗震分析应符合下列规定：

- 抗震分析中应考虑粉砂质土的液化及软土的震陷效应；
- 盾构法隧道应选取多个地层条件和结构形式的纵向区段进行抗震分析；
- 沉管法隧道可以管节为单元进行抗震分析；
- 钻爆法隧道及围堰法隧道宜以变形缝为单元进行抗震分析。

7.3.12 盾构法隧道结构计算应符合下列规定：

- 管片衬砌结构计算应考虑管片构造特点、接头形式、管片间的连接方式及环与环间的拼装方式（通缝或错缝）的影响；
- 应考虑内部结构对管片衬砌结构受力的影响；
- 位于地下水位以下且覆土厚度小于隧道外径的盾构法隧道应按最不利工况进行抗浮

稳定验算：

- d) 管片衬砌结构横向内力计算模型宜采用匀质圆环模型、弹性铰模型、梁-弹簧模型或梁-接头模型，管片衬砌与地层间的相互作用宜采用局部地基弹簧模型；
- e) 管片衬砌结构纵向内力计算模型可采用梁-弹簧或等效刚度模型；
- f) 管片接头内力计算可依据管片衬砌结构内力计算模型直接或间接获得；
- g) 内部设置二次衬砌时，当管片衬砌与二次衬砌之间结合面较平滑或存在防水板时，应按复合式衬砌进行计算。当管片衬砌与二次衬砌之间结合面不平整、不光滑或设有抗剪措施时，应按叠合式衬砌进行计算；
- h) 对大断面及超大断面、构造形式复杂，或承受大偏压、高水压、严重形变压力等条件的特殊盾构法隧道，应采用整体化的分析方法进行管片衬砌结构的内力和变形计算。

注：

本条对盾构法隧道结构分析给予规定。

内部结构作用于衬砌上的荷载随隧道的使用目的而不同。车辆荷载、内部支撑作用、隧道内的悬挂荷载等会对衬砌的强度和变形产生影响，应根据实际情况设定荷载大小和分布模式进行计算。未设置二次衬砌时，底板的支撑部分和其他附属设施会直接设置在管片上，需设置锚固键，根据实际设定荷载进行设计。

管片接头的存在对衬砌内力分布会产生影响。接头的处理通常有：考虑接头影响，将管片衬砌结构的刚度折减作为均匀刚度结构；将接头简化为弹性铰承受轴力和弯矩；将接头简化为弹簧（切向、回转和法向）承受轴力、弯矩和剪力。

整体化的分析方法应考虑管片接头刚度的非线性特性、衬砌结构-地层（地下水）的交互作用，并应体现施工期间的结构受荷特征，宜采用三维分析模型，分别对隧道运营期以及主要施工阶段进行结构计算。

7.3.13 沉管法隧道的结构计算应符合下列规定：

- a) 横断面结构宜采用荷载结构模型进行计算；
- b) 纵断面结构可采用弹性地基梁模型或三维模型进行计算；
- c) 受力复杂的局部结构应采用三维模型进行计算；
- d) 应进行浮运、沉放及运营等阶段的管节抗浮计算；
- e) 应进行施工期及地震条件下结构纵向分析，验算节段接头及管节接头的可靠性；
- f) 应考虑基底地质条件及地基处理方式的差异对管节沉降变形的影响；
- g) 应考虑冲淤、抛锚、沉船等对隧道的影响。

7.3.14 钻爆法隧道的结构计算应符合下列规定：

- a) 横断面结构宜采用荷载结构或地层结构模型进行计算；
- b) 应考虑周边土体对结构的弹性抗力；
- c) 采用限排复合衬砌或全封闭复合衬砌时，二次衬砌应按承担水压力设计，其大小根据分析计算确定；
- d) 仰拱未设置防水层时，仰拱应按初期支护与二次衬砌共同承担设计水压力考虑；
- e) IV～VI级围岩地段应对施工过程中初期支护结构的强度进行校核。

7.3.15 围堰法隧道的结构计算应符合下列规定：

- a) 横断面结构宜采用荷载结构模型进行计算；
- b) 应进行施工及运营阶段的隧道结构抗浮计算；
- c) 隧道结构宜进行纵向沉降计算；
- d) 应考虑基坑支护方式及地基处理方式的影响；
- e) 应对不同水位条件下围堰及基坑支护稳定性、基底隆起及渗流稳定性进行分析。

7.3.16 隧道结构设计应按 100 年洪水位计算，按 300 年一遇洪水位验算。

7.4 构造要求

7.4.1 隧道结构的钢筋保护层厚度应符合《混凝土结构耐久性设计标准》（GB/T 50476）的要求。

7.4.2 隧道衬砌结构采用防水钢筋混凝土时应符合表 15 的规定。

表 15 衬砌结构最小厚度 (mm)

外水压设计值 (MPa)	防水混凝土抗渗等级		
	P8	P10	P12
<0.2	250	—	—
0.2 ~ 0.3	350	300	—
0.3 ~ 0.4	450	400	350
0.4 ~ 0.5	—	500	450
0.5 ~ 0.6	—	—	550

7.4.3 隧道变形缝分为伸缩缝和沉降缝，设置应符合下列规定：

- a) 伸缩缝的形式和间距可根据围岩条件、施工工艺、使用要求及温度变化等，按类似工程的经验确定；
- b) 隧道水域段一般不宜设置沉降缝，当因结构、地基、基础或荷载发生变化，可能产生较大的差异沉降时，宜通过地基处理、结构措施或施工工艺等方法，将结构的纵向沉降差控制在隧道结构允许变形范围内；
- c) 在隧道工法变化、结构类型较大变化、主体与附属结构的结合部宜设置变形缝；
- d) 应采取可靠措施，确保变形缝两边的结构不产生影响行车安全和正常使用的差异沉降。

8 盾构法隧道

8.1 一般规定

8.1.1 盾构法隧道应结合地形地貌、地质水文、盾构设备等条件，合理确定隧道埋深、始发井和到达井的位置。

8.1.2 盾构法隧道的工程材料应根据隧道衬砌类型、使用要求和环境条件等确定，并应满足可靠性、耐久性和经济性的要求。

注：

盾构法隧道下程常用的工程材料有混凝土、钢筋、球墨铸铁、钢纤维或合成纤维等。根据隧道的使用功能要求及所处的环境条件应对隧道衬砌的材料类型进行慎重选择，而选用不同的衬砌材料对隧道的可靠性、耐久性和经济性影响很大。

8.1.3 盾构法隧道应结合使用功能、管片结构、环境条件等因素进行防水设计。宜按二级防水进行设计

注：

盾构法隧道防水设计原则为“以防为主、重点接缝、刚柔结合、因地制宜、综合治理”。地下工程防水规范规定的防水等级为分为四级，在进行防水设计时，可根据规定的适用范围，结合工程的实际情况合理确定工程的防水等级。铁路隧道防水等级参照了《地下工程防水技术规范》（GB 50108）的规定，同样分为四级，但考虑到隧道内机电设备、电化等环境防水要求，一般在设计时按一级考虑，而市政、公路隧道等防水标准，则通常按二级防水标准考虑，因此，本规范在未明确工程实际使用情况的前提下，建议按二级防水标准进行设计。

8.1.4 盾构法隧道工作井应结合功能需求、施工工艺、地质条件等因素进行设计。

注：

盾构井通常分为盾构始发工作井和盾构接收工作井，而盾构始发工作井又可分为整体始发工作井和分体始发工作井两种。一般情况下尽量设计为整体始发工作井。采用盾构整机始发方案时，可选择加长始发井或有一定距离的双井方案，中间井、转向井、掉头井的净空尺寸应根据盾构在工作井内始发、接收、通过或转体作业的不同空间要求，按最大尺寸要求确定。

8.2 盾构机选型

8.2.1 应根据地质条件、环境条件、设计方案、施工安全、环保和工期等要求进行盾构机选型。

注：

盾构法隧道施工时采用的盾构类型与盾构法隧道设计的相关性很大。本标准中的盾构选型是指盾构法隧道设计时，设计方根据隧道沿线地层的岩土分布、颗粒级配、渗透系数、地下水压，以及隧道施工的场地条件、环保要求、辅助工法、安全控制等因素，对盾构机的类型进行选定。盾构选型时要考虑的首要因素为地质条件，首要目标是保持开挖面的稳定。对自立性能较差的松散类地层，应尽量使用闭胸式盾构，对砂砾和软岩等强度较高自立性亦较好的地层，且地下水情况不发育，可使用敞开式盾构。闭胸式盾构类型主要有土压平衡盾构、泥水平衡盾构和复合盾构三种。

8.2.2 盾构法隧道应结合地质条件、建设环境、工程筹划和经济性等要求进行盾构设备选型，盾构设备选型宜遵循下列规定：

- a) 适应工程地质、水文地质条件；
- b) 在安全可靠的前提下，统筹考虑技术先进性和经济合理性；
- c) 满足隧道开挖直径、埋深、周围环境等条件；
- d) 满足质量、工期、造价及环保要求；
- e) 后配套设备应与主机相匹配，其生产能力应与主机掘进速度相匹配。

8.2.3 隧道宜采用泥水平衡盾构，当采用土压平衡盾构时应进行专题研究。

注：

泥水平衡盾构主要适用于软弱的淤泥质土层、松散的砂土层、砂砾层、卵石层和软土硬土互层等地层，特别适用于地层含水量大或地表有水体的水下隧道。土压平衡盾构主要适用于黏土、粉质粘土、淤泥质粘土、粉砂等细颗粒土壤的施工，由于排渣系统为螺旋输送机，如在含水量大或水压较大的地层中采用土压平衡盾构，在螺旋输送机排土闸门处易发生渣土喷涌现象，引起土仓压力下降，导致开挖面坍塌。若因特殊原因仍需采用土压平衡盾构，则应进行专题研究。表 8.2.3 为国内外典型盾构法隧道的调研表。

表 8.2.3 盾构法隧道调研表

隧道项目	隧道外径（m）	盾构掘进长度（m）	盾构类型	主要地质
长沙南湖路湘江隧道	11.3	1610	泥水盾构	砂层、卵石、砾岩
深江铁路珠江口隧道	12.8/12.9	2930/3590	泥水盾构	砂层、花岗岩
长沙湘雅路过江通道	14.5	4180	泥水盾构	圆砾、卵石、板岩
汕头苏埃通道	14.5	4950	泥水盾构	淤泥、砂层
日本东京湾外环隧道	16.1	16200	土压盾构	粘土、泥岩
美国西雅图 SR99 隧道	17.45	2800	土压盾构	粘土、粗粒砂岩
香港屯门隧道	17.63	4200	泥水盾构	粉砂、砂层

8.2.4 地质条件复杂地段盾构机可配备常压换刀、全断面超前注浆、超前探测、刀具监测等

功能。

注：

盾构在均匀软土地层中施工往往很顺利，但在孤石、漂石、硬岩的地层施工则较为困难。由于受到地层条件及刀具磨损的影响，盾构机刀具在掘进一定距离后会磨损，如果不及及时进行刀具更换处理而继续掘进，轻则无法保证掘进速度，重则盾构刀盘损坏无法掘进施工，甚至报废盾构刀盘。因此盾构在困难地层中施工中进行换刀是难以避免的。根据地质条件的不同，可采取加压和常压两种换刀方式。常压换刀需采用特制刀盘，造价成本高，且需选择在岩层稳定、无大量地下水涌出、无有毒气体存在的预定地点进行换刀处理；带压换刀则是利用压缩空气平衡盾构周围水土压力，使围岩保持稳定，施工人员通过人闸进入土仓，实现在气压状态下检查更换刀具。

全断面超前注浆设备包括盾壳和刀盘预留地质钻孔、超前钻机、注浆设备等。当盾构施工需要开仓换刀、下穿重要建筑物或穿越溶洞前，需要进行超前地层加固，可利用盾构机自身配置的盾构机超前注浆设备对盾构前方及周边一定范围的土体进行注浆加固。

超前探测设备是指盾构机在通过岩溶等无法提前探明的不良地质体前，通过超前钻孔、声波、地震波、探地雷达等手段预先探测盾构机前方地层和地下水分布情况的设备。

8.3 管片结构

8.3.1 盾构法隧道的衬砌结构可采用单层衬砌、双层衬砌或局部双层衬砌的形式。

注：

盾构法隧道衬砌一般有单层衬砌和双层衬砌两种结构形式。双层衬砌是在单层衬砌内部直接再施作一层钢、混凝土或钢筋混凝土内衬，主要作用加强隧道防渗、防火、防腐或者提高隧道承载能力等。盾构法隧道衬砌的选型，应根据工程地质和水文地质条件、功能要求、隧道大小、使用条件等因素综合确定。国内大量地铁、公路工程和国外类似工程的成功经验表明，盾构法隧道采用具有一定刚度的单层预制拼装衬砌可满足防水、防腐等要求，而对于水下的交通隧道和处于严重腐蚀性环境中的隧道，管片结构可能在隧道内部火灾或内外部腐蚀性介质下损伤且修复困难，建议考虑双层衬砌或局部双层衬砌的形式。

8.3.2 管片混凝土应符合下列规定：

- a) 强度等级不应低于 C50；
- b) 防水混凝土不应采用高水化热水泥，宜掺入高效减水剂、粉煤灰或磨细矿渣，并按现行国家标准《地下工程防水技术规范》（GB50108）的规定控制水泥用量，限制水胶比，以及控制混凝土入模温度。

注：

盾构管片为了便于运输以及提高机械拼装精度，设计时通常采用高标号混凝土，通过调研国内铁路隧道、公路隧道、市政隧道、地铁隧道管片混凝土等级在 C50~C60 之间，如表 8.3.2 所示。所以规定混凝土强度不应低于 C50 高标号混凝土，不仅能有效减少管片厚度和重量，还能提高结构抗渗性、耐久性。

表 8.3.2 盾构法隧道调研表

隧道项目	隧道外径 (m)	管片厚度(m)	管片混凝土强度	管片环宽 (m)	隧道用途
广深狮子洋隧道	10.8	0.5	C50	2.0m	铁路隧道
深江铁路珠江口隧道	12.8/12.9	0.55/0.60	C55/C60	2.0m	铁路隧道
武汉长江隧道	11.38	0.5	C50	2.0m	公路隧道

上海长江隧道	15	0.65	C55	2.0m	公路隧道
南京纬七路长江隧道	14.5	0.6	C60	2.0m	公路隧道
长沙南湖路湘江隧道	11.3	0.5	C50	2.0m	市政隧道
长沙湘雅路过江通道	14.5	0.6	C60	2.0m	市政隧道
汕头苏埃通道	14.5	0.6	C60	2.0m	市政隧道

8.3.3 盾构法隧道宜采用钢筋混凝土管片，也可采用钢管片、球墨铸铁管片、钢纤维混凝土管片和复合管片。

注：

钢筋混凝土材料来源广泛，刚度大，造价低，除特殊需要外，一般为盾构法隧道衬砌的首选材料，已获得广泛应用。

铸铁和钢管片的优点是材料强度、成型精度高，防水效果好，但同时也存在加工复杂、金属用量大、造价高等缺点，一般仅在特殊情况下采用，如隧道衬砌受力较大处、盾构法隧道与联络通道等附属结构相接处、地层冻结加固等需要在衬砌上开设较多孔洞等情形。

钢纤维混凝土是 20 世纪 90 年代发展起来的新型复合建筑材料，具有优良的物理力学性能。钢纤维混凝土盾构管片技术在欧洲各国的隧道工程中应用较多，设计和施工技术日趋成熟。

复合管片优点是承载力高、延性好、厚度薄、加工精度高，在异形大断面、近距离穿越地下密集管线和重型荷载等复杂条件的盾构隧道中应用较多。

8.3.4 管片构造应符合下列规定：

- a) 管片宜采用双面楔形通用环、错缝拼装，楔形量应满足隧道曲线半径要求；
- b) 管片宽度应根据隧道最小曲线半径、隧道直径、管片制作、运输、管片拼装工艺以及盾构千斤顶行程等因素综合确定；
- c) 盾构法隧道钢筋混凝土管片厚度宜取 $0.04D\sim0.05D$ ；
- d) 封顶块接头角和插入角应根据截面内力传递、拼装方式、盾构设备及管片生产条件等因素综合确定；
- e) 管片螺栓手孔、起吊孔、注浆孔的位置与尺寸，应根据管片连接、起吊和拼装方式，以及壁后注浆要求和结构受力等因素确定；
- f) 管片螺栓孔直径宜按表 16 选用；

表 16 管片连接螺栓及螺栓孔直径（mm）

螺栓直径	20	24	27	30	36	40
螺栓孔最小处直径	23~26	27~30	30~33	33~36	39~42	43~46

g) 在管片中央设有吊装孔，吊装孔兼二次补强注浆孔。吊装孔抗拔力不低于管片自重 7 倍；

h) 管片上宜预埋壁后注浆预埋件，注浆预埋件设计应有利于施工及运营段注浆孔外水压力的有效封堵；

i) 采用真空吸盘吊装的管片，应在内弧面预留拼装定位孔；每块管片上定位孔数量不应少于 2 个，定位孔宜为杯状结构，杯口直径不宜小于 100mm，定位孔深度不宜小于 150mm；

j) 螺栓的布置应满足隧道运营阶段受力及盾构机顶推系统布置、管片拼装的要求；

注：

高水压、深埋盾构法隧道由于顶推设备需要克服较大的外部荷载，因此油缸、轴承等设备通常较粗，而受到盾体内空间的限制，因此在进行螺栓布置设计时还应综合考虑盾构机顶推系统与螺栓拼装点位的相互匹配。

- k) 管片连接螺栓的机械性能不宜低于 8.8 级，应满足耐腐蚀性和抗冲击韧性的要求；
- m) 钢管片和球墨铸铁管片应采取防火隔热措施。

注：

本条对管片构造予以规定。

1. 管片拼装方式分为通缝拼装和错缝拼装两种。通缝拼装方式时管片拼装定位方便，纵向螺栓连接难度大，拼装应力小，但管片环面容易不平整并有较大的累计误差，从而导致衬砌环环面错台较大或环缝压密量不够。错缝拼装方式建造的隧道衬砌整体性较好，环面较平整，环向螺栓容易穿入，接头刚度分布均匀，衬砌纵向刚度较大，从而可减小接头及整体衬砌的变形。错缝拼装方式与通缝拼装方式相比，具有管片接头刚度分布均匀、衬砌整体结构刚度大，结构变形小，接头防水较易处理，且错缝拼装管片接缝张开量较小等优点，已成为目前盾构法隧道拼装方式的主流。

2. 目前国内直径大于 10m 的盾构法隧道，常用的管片环宽尺寸有 1.5m 和 2.0m，现有的施工和装备技术，可以满足管片采用较大的宽度。建议城市道路盾构法隧道在线路不受限的情况下，管片环宽不应小于 1.5m。

8.3.5 管片接头构造应符合下列规定：

- a) 管片接头构造可根据隧道变形要求、接头张开量限值、盾构千斤顶受力要求等采用平板型、凹凸榫槽型等形式；
- b) 当隧道所处地层为深厚软土地层时，管片环缝接头环面构造宜设置抗剪措施；
- c) 管片纵缝接头可采用定位棒辅助拼装定位。

8.3.6 每块管片上应清晰标注不易被磨损的标识。

8.3.7 盾构法隧道与横通道连接部位的特殊环管片可采用全环钢筋混凝土管片或钢筋混凝土管片加钢管片形式。

注：

盾构法隧道联络横通道一般设置在两条隧道中间，主要起到排水、防火及疏散救援等作用。盾构法隧道与横通道连接处可根据隧道所处地质条件以及地震环境等因素，针对性采用钢筋混凝土或弹性变形较大的钢管片形式。

8.4 防水设计

8.4.1 管片结构自防水应符合下列规定：

- a) 钢筋混凝土管片应采用防水混凝土制作，其抗渗等级不应小于 P10，氯离子扩散系数不宜大于 $3 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ；
- b) 混凝土管片的裂缝宽度不得大于 0.2mm，并不得贯通；
- c) 钢筋混凝土管片应进行单块检漏试验，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。

注：

本条对管片结构防水予以规定。

盾构法隧道处于对混凝土具有中等以上腐蚀性介质中时，为确保钢筋混凝土的耐久性，应在管片迎水面及接缝处涂抹兼具有防水和防腐蚀的涂层材料，该类材料一般宜采用高渗透改性环氧或硅烷渗透型防水涂料，可有效避免盾构掘进过程中盾尾刷对管片迎水侧防水涂料造成的破坏。

8.4.2 管片接缝防水应符合下列规定：

- a) 管片接缝至少应设置一道密封垫。当管片厚度大于 400mm 且隧道处于富含水区域

时，应设置两道密封垫；当管片厚度小于 400mm 且隧道处于富含水区域时，宜在管片密封垫表面增设遇水膨胀条等加强防水；

b) 密封垫沟槽应沿管片侧面成环设置。密封垫沟槽形式、截面尺寸应与密封垫形式和尺寸相匹配；

c) 密封垫沟槽截面应按下列公式计算：

$$A = (1 \sim 1.15) A_0 \quad (8.4.2)$$

式中， A ——密封垫沟槽截面面积（ m^2 ）；

A_0 ——弹性密封垫橡胶部分的截面面积（ m^2 ）。

d) 密封垫应符合下列规定。

1) 密封垫应在计算的接缝最大张开量和估算的错台量情况下，在 2 倍～3 倍埋深水压头的压力下不渗漏。

2) 密封垫的压缩永久变形率不应大于 25%。

3) 接缝闭合压缩力不应小于千斤顶最大顶力。

4) 当封顶块采用纵向插入方式时，密封垫表面应涂抹润滑剂。

5) 变形缝环缝密封垫表面应增设遇水膨胀橡胶片加强防水。

e) 嵌缝防水设计应符合下列规定。

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。

3) 变形缝嵌缝槽宜采用弹性密封材料进行嵌缝。

f) 螺栓孔防水应符合下列规定。

1) 螺栓孔口应设置锥形倒角的螺孔密封圈沟槽。

2) 螺栓孔密封圈的外形应与沟槽相匹配。

3) 螺孔密封圈应采用合成橡胶或遇水膨胀橡胶制品。

g) 注浆孔的注浆管密封圈和注浆管盖密封圈，应符合下列规定。

1) 注浆管密封圈应在管片混凝土浇筑前固定在注浆管四周，单道或多道设置。

2) 注浆管密封圈和注浆管盖密封圈应采用遇水膨胀橡胶制品。

注：

本条对管片接缝防水予以规定。

(1) 管片接缝防水是盾构法隧道最为重要的防水部位，需要重点解决该部位的防水问题。根据管片厚度和隧道断面尺寸，一般盾构法隧道的管片接缝部位均应设置一至两道防水密封垫。当隧道穿越江、河、湖、海等富含水区域时，为确保管片接缝防水质量，管片厚度不小于 400mm 时，有条件在管片内弧侧和外弧侧各设置一道密封垫凹槽，设置两道密封垫可确保管片接缝防水的可靠性；当管片厚度小于 400mm 时，难以设置两道密封垫凹槽，可采取在单道密封垫表面增设一层遇水膨胀橡胶片或在密封垫中部增设遇水膨胀密封条的方式加强防水。

(2) 管片拼装成型后，密封垫被压缩在密封垫沟槽内。为保证密封垫均匀变形、密封垫的弹性应力达到设计要求，密封垫沟槽形式、截面尺寸应与密封垫形式和尺寸相匹配。

(3) 为确保密封垫能够完全压入密封垫沟槽，要求密封垫沟槽的截面面积应大于或等于密封垫橡胶部分的截面面积，避免橡胶材料受到挤压破坏。同时为保证密封垫压缩后弹性应变能够抵抗埋深状态的水压，密封垫沟槽截面面积一般不宜超过密封垫截面面积的 1.15 倍。

(4) 密封垫弹性应变小于地下水压力时，会引起接缝部位渗漏水。国内一般地下盾构法隧道中，对于管片接缝张开量与密封垫的断面尺寸之间的关系是根据隧道埋深来确定的。通常情况下，为确保密封垫的耐久性，要求管片接缝张开 8mm、错缝 15mm 情况下，密封垫的耐水压力不得小于设计水压力。

(5) 封顶块采用纵向插入时，其两侧密封垫与已经拼装完成的相邻管片纵向密封垫之间的压缩摩阻力逐渐增大，该阻力会导致封顶块两侧纵向密封垫被拉长并挤出导致其防水密封效果降低。同时导致封顶块外侧角部密封垫鼓起，影响其与下一环密封垫的密封效果。这也是封顶块角部容易出现渗漏水的原因。因此要求封顶块纵向密封垫表面涂抹润滑剂，以降低其与相邻密封垫之间的摩阻力。

盾构接收和始发第一环和第二环之间的环缝由于拆除副环时管片之间的压缩应力松弛导致张开量较大，

通常作为变形缝处理。也有将盾构接收和始发加固范围内的所有环缝作为变形缝处理的例子。国内通常做法是在标准环缝密封垫表面增设一层 3mm 厚的遇水膨胀橡胶片来加强防水。

(6) 螺栓孔通常位于管片接缝中间部位,当管片外侧防水措施一旦被突破,螺栓孔则会成为结构渗漏水的薄弱点。

8.4.3 管片接缝密封垫可选用弹性橡胶密封垫、遇水膨胀性橡胶密封垫、弹性橡胶与遇水膨胀性橡胶复合型橡胶密封垫,物理性能应符合国家、行业标准的规定

8.5 盾构井设计

8.5.1 盾构井宜与隧道附属设施结合设置。

注:

盾构井作为盾构接收或始发的临时性结构,在进行空间尺寸设计时,横断面及长度方向上应各留出一定的富余空间以便盾构机组装、拆卸、运送管片等,因此,与盾构法隧道工程相比,盾构井规模一般比较大,在为节省工程投资,

可结合隧道机电工程、运营疏散等附属结构综合考虑。

8.5.2 盾构井的净空尺寸应符合下列要求:

- a) 盾构井净空尺寸应根据盾构类型及尺寸、重量、顶推力、施工工艺等因素确定,并应满足盾构起吊、安装、解体、检修、转体或整体移位等施工要求;
- b) 盾构工作井的平面内净空宽度宜大于盾构主机直径 2m;
- c) 始发井的平面内净空长度宜大于盾构主机长度 3m;
- d) 接收井的平面内净空长度宜大于盾构主机长度 1m;
- e) 靠近洞门处的始发井、接收井的底板,宜位于进出洞洞门标高应满足盾构始发、接收的需要。

注:

盾构工作井的净空尺寸,应以满足盾构工作井功能为前提。工作井平面内净空宽度,应满足工人在盾构机外侧作业要求;工作井平面内净空长度,应满足盾构机组装、洞门破除、负环拼装、反力架安装等工作要求;工作井竖向净空深度,应满足盾构机下方基座安装要求;盾构吊装孔尺寸,应满足最大配件吊装要求并预留一定安全距离。

8.5.3 盾构始发井的结构布置应满足反力架的设置要求。当利用后座墙为千斤顶提供支撑时,应利用土体抗力;当土体抗力及墙后土体变形不能满足盾构始发及墙体变形要求时,应采取地层加固措施。

注:

根据相关工程经验,盾构始发地层有效加固范围一般为纵向长度取盾构机长度+1~2 环管片,径向加固长度为盾构机壳体外 3m。地层加固措施应根据地层特点进行针对性设计,目前国内主要以深层搅拌桩法、高压旋喷桩法为主,还可采用注浆加固法、降水法、冻结法或组合处理措施等。

(1) 深层搅拌桩适用于淤泥质黏土,淤泥质黏土含水量高、地基承载力低,利用深层搅拌机械将水泥作为固化剂与地基土进行原位的强制粉碎拌合,待固化后形成不同形状的桩、墙体或块体。

(2) 高压旋喷桩有单管法、二重管法、三重管法以及近年出现的多重管法。在地基加固、提高地基承载力、改善土质,进行护壁、挡土、隔水方面具有很好的作用效果。

(3) 注浆加固的以增强地层强度或不透水为目的,把注入的浆液强制填充到地层的间隙或裂缝中。这种方法适用于砂质地层,另一种沿层面形成脉络裂缝的劈裂方法,适用于黏土地层。

(4) 地层冻结法是利用人工制冷技术对地层进行冻结的加固技术。通常,当地层含水量大于 2.5%,地下水含盐量不大于 3%,地下水流速不大于 10m/d 时,均可采用冻结法。当地层含水量大于 10%且地下水流速不大于 5m/d 时,冻结法效果最佳。

8.5.4 盾构井洞门处应设置满足盾构始发和接收要求的洞门密封装置,洞门结构内应设置洞门密封装置预埋件。

注：

洞门处设置密封装置是为了防止在始发或接收时由洞口与盾构、洞口与管片之间的地下水、泥浆、开挖面的土砂等流入工作井内，另外，待盾尾通过后当进行首次壁后注浆时以防止壁后注浆材料流入坑内为目的。目前盾构始发和接收洞门密封装置设计是在洞门钢筋混凝土上预先埋好带螺母的钢环，待组装好橡胶密封件之后，用螺栓拧紧安装压板，以及在密封件内侧设置防止密封件反转的可滑动反转钢压板，待盾尾通过后让该板滑动到管片的外围。洞门密封也有采用尼龙纤维加强的环形橡胶管，待盾构切入后在管内充气或注入泥浆使之鼓起，以该压力来防止地下水及泥浆流入工作井内。个别工程中也采用了钢尾刷这种密封形式，其原理同盾构尾部自备的钢尾刷是一个道理。从理论上来说，井壁预留洞口大小比盾构的外径略大一些即可，但考虑到井壁洞口的施工误差、隧道设计轴线与洞口轴线间的夹角、密封装置的需要，需留出足够的余量。

8.5.5 盾构井预留洞门直径应按式(8.5.5)计算确定

$$D_m = B_m \tan \alpha_m + \frac{\phi_s}{\cos \alpha_m} + \Delta_e + \Delta_s + \Delta_g \quad (8.5.5)$$

式中， D_m ——洞门直径(m)；

B_m ——洞门处井壁厚度(m)；

α_m ——隧道轴线与洞口轴线的夹角（采用平面或纵坡夹角的值）（度）；

ϕ_s ——盾构的外径(m)；

Δ_e ——始发或接收井预留洞口直径大于盾构外径的差值(m)，始发井取 0.1m，接收井取 0.2m；

Δ_s ——测量误差(m)，取 0.1m；

Δ_g ——盾构基座高程误差(m)，取 0.05m。

9 沉管法隧道

9.1 一般规定

9.1.1 沉管法城市道路隧道应根据城市总体规划、城市地下空间利用规划、环境保护和城市景观的要求开展总体设计。

注：

隧道设计应满足两岸道路规划，城市道路功能、土地资源、生态环境、可持续发展要求，平纵线形、建筑限界、净空断面、通风、照明和交通监控等设施应与道路等级相适应。

9.1.2 隧道设计应满足城市、堤防、航道、码头等远期规划实施后现状环境改变时隧道结构的安全要求。

9.1.3 隧道应埋设在规划航道底标高以下，并满足规划航道实施及隧道顶部防锚层敷设要求。

9.1.4 管节顶部宜埋置在冲刷包络线及河（海）床面以下，不满足时应进行专题研究。

9.1.5 隧道沉管段的平面线形宜采用直线。当不具备直线条件时，宜结合隧道功能、管节长度、断面宽度、净空富余量、施工工艺等因素综合确定合理的平曲线半径。

9.1.6 隧道净空尺寸除应满足建筑限界、设备布置外，尚应满足施工误差、测量误差、结构变形与工后沉降的要求。

9.1.7 沉管法隧道临时工程应根据工程规模、周边环境条件，遵循满足施工需要，减少周边干扰和破坏、便于恢复利用的原则进行布置。

9.2 管节结构

9.2.1 沉管法隧道宜采用整体式管节，宜选用左右对称的矩形断面。

注：

城市道路沉管法隧道一般受路由限制，长度有限，采用整体式管节对规模、环境、造价控制有利。

9.2.2 管节结构设计除应满足设计使用年限和使用功能外，尚应满足运营环境、施工工艺的要求。

9.2.3 沉管法隧道结构及预埋件应进行管节预制、系泊、浮运、沉放等施工工况和正常运营工况下的结构强度、变形、稳定性、抗浮和沉降等计算分析。

注：

沉管法隧道施工工况复杂，每种工况都需要进行分析，以确保结构安全。变形计算主要指管节结构变形、管节接头压缩及张开量计算等，稳定性计算主要指管节干舷高度、定倾高度、抗浮计算等。

9.2.4 管节完成舾装后的干舷高度宜控制在 100mm~200mm 间。

注：

干舷是表征管节漂浮状态的一个重要指标，干舷高度过小会增加管节浮运过程中的风险，干舷高度过大则管节沉放时需要克服的浮力很大。

9.2.5 管节在漂浮状态的定倾高度不宜小于 300mm。

注：

管节在施工过程中可能因侧向牵引、锚拉、横向水流、浪涌或风压而产生较大倾角的状态，应按船舶工程的计算方法进行稳定性验算。

9.2.6 整体式管节每节长度不宜大于 130m，节段式管节每节长度不宜大于 180m。

注：

管节长度应综合考虑抗震、纵向受力、干坞及临时存放场地尺寸、隧址水文条件及航道条件、沉放方式、工期、造价等因素，结合地基承载力综合划分。管节长度数据来源于《沉管法隧道设计标准》9.2.2 条。

9.2.7 管节结构应选取隧道埋深最深、运营期覆土最厚以及地质条件突变处等不利位置进行断面内力计算，且应对隧道进行整体纵向结构分析。

9.2.8 竖向剪切键所承受的垂直剪力应根据相邻管节基础沉降的最不利工况计算确定，水平剪切键所承受的水平剪力应根据地震工况下产生的水平剪力确定。

9.3 管节接头与防水

9.3.1 沉管法隧道管节接头结构设计宜包括下列内容：

- a) 沉管段基础差异沉降产生的变形和应力计算；
- b) 混凝土干缩、温度变化的变形和应力计算；
- c) 结构的水密性和抗震性设计；
- d) 施工和维护的便利性措施。

注：

节段式管节在每个节段间存在一个接头，和管节接头主要依靠 GINA 橡胶止水带压接实现止水不同，节段接头防水体系一般采用可注浆钢边止水带作为外道防水措施，OMEGA 橡胶止水带作为第二道防水措施。节段接头构造技术相对复杂，国内尚缺乏成熟经验，欧洲研究和应用最为成熟，如 2005 年荷兰发布的《沉管法隧道节段接头设计规程》。

9.3.2 管节接头应设置垂直、水平，宜设置纵向限位装置。

注：

管节接头剪力键是预制管节结构纵向的主要传力构件，分垂直与水平剪力键两种类型，需满足地震、温度、不均匀地基沉降、差异荷载作用下的变形与受力要求，可根据剪力分担、施工便利性等因素确定采用钢筋混凝土或钢结构的类型，但同一接头部位应尽量采用相同类型。当管节沉放到位、确认对接满足设计要求后，应对接头开展施工监测，若接头错动量或张开量区域稳定后，可按设计要求依序安装剪力键。

如果地震动力响应计算显示出接头处出现较大位移，则通常在接头内侧安装纵向限位装置。

9.3.3 最终接头应优先采用技术成熟，作业方式简单的方案。

9.3.4 最终接头位置和结构形式应根据工期筹划、隧道埋深、航道条件等因素确定。

9.3.5 水下最终接头长度应根据水下作业空间需求、累积施工误差、GINA 止水带压缩量变化等因素确定，其长度不宜小于 2.0m。

注：

水下最终接头长度数据来源于《沉管法隧道设计标准》9.3.6 条。

9.3.6 沉管法隧道应进行防水设计，防水设计宜包括下列内容：

- a) 防水使用年限、防水等级、防水技术指标；
- b) 管节防水混凝土；
- c) 管节接头防水；
- d) 管节混凝土外防水、防腐层；
- e) 管节混凝土接缝防水。

9.3.7 管节接头构造应进行水密性设计，接头应设置不少于两道柔性止水措施。

注：

沉管法隧道管节对接常规均为水力压接法，外侧设置 GINA 止水带进行第一道压接止水，内侧设置 OMEGA 止水带作为第二道止水措施。

9.3.8 沉管法隧道主体结构混凝土抗渗等级应结合隧道运营期最大水深，满足现行国家标准《地下工程防水技术规范》GB50108 的规定。

9.4 干坞设计

9.4.1 干坞位置、规模及结构设计应结合工程周边环境、地质和航道条件、施工工期、工程造价、管节预制工艺等综合确定。

注：

干坞选址应根据考虑管节数量、结构形式、预制方式、地理位置、浮运条件、工期筹划、征地拆迁、工程造价等因素综合比选确定。坞址到隧址区的距离应尽可能短，干坞选址应便于管节预制用材料运输，并便管节舾装与浮运，利于提高工程经济性。

9.4.2 干坞可选用既有船坞，新建干坞宜结合土地开发统筹建设。

9.4.3 固定干坞的防汛体系应结合既有防汛体系设计，满足现行《堤防工程设计规范》（GB50286）的规定。

9.4.4 固定干坞适用于距隧址位置适宜、周边环境空旷、与水系连通顺畅、具备大面积基坑开挖条件的工程，固定干坞设计应符合以下规定：

- a) 干坞内管节之间、管节与坞壁之间的距离应能够满足正常的生产活动需要；
- b) 干坞坞底平面尺寸应根据管节平面布置、施工工艺及灌水、排水系统等要求综合确定；
- c) 坞底基础除应满足管节预制荷载及变形的承载要求外，尚应满足管节起浮要求；
- d) 干坞坞顶宽度应根据防汛、管理、施工等要求确定，且不宜小于 3m；
- e) 管节出坞浮运宽度，单侧富余量不宜小于 2.5m；
- f) 固定干坞坞底标高 H_a 可按式确定：

$$H_a = H_0 - H_b + h_g - H_s \quad (9.4.4)$$

式中： H_0 ——管节出坞设计水位标高(m)；
 H_b ——管节外包高度(m)；
 h_g ——管节干舷高度(m)；
 H_s ——管节底部至坞底的起浮安全距离(m)，不宜小于 0.5m。

注：

沉管干坞根据场地类型可分为固定式干坞和移动式干坞，根据场地位置可分为独立干坞、旁建干坞、轴线干坞和移动干坞；固定式干坞根据生产方式不同又可分为工厂法干坞、传统干坞等。工厂法是在工厂内通过流水线作业进行管节制作的方法。

当管节数量多、预制连续性要求高、质量要求较高时，可选择工厂法干坞；当管节数量少、场地条件受限时可采用移动式干坞；

当采用旁建干坞对工程造价影响较大，工期要求相对宽松时可采用轴线干坞。

地理条件允许时宜采用较大干坞，一次能多管节预制，预制工期短，对综合成本有利。

城市内因征地拆迁等情况，可利用沉管法隧道区建造轴线干坞的方案。干坞建设应根据实际投资、工期等技术经济指标进行全面分析确定。

9.4.5 工厂化干坞适用于管节数量多，预制及沉放连续性要求高的工程，工厂化干坞设计应符合以下规定：

- a) 干坞场地分区及规模应根据管节预制生产流水线工艺方案确定，分区应包括钢筋加工区、管节预制区、浅坞区、深坞区等；
- b) 管节预制区与浅坞区间应设置防水的隔离闸门；
- c) 管节预制区与浅坞区坞底应采用相同底面标高，且不应低于水域最高水位；
- d) 坞门应采用可多次启闭的结构，深坞门应结合坞址气象条件、水文条件等因素进行抗风浪设计；
- e) 深坞区应设置灌排水系统，坞墙应构成完整的防洪系统。

9.4.6 移动干坞适用于管节数量少、码头及航道条件适宜的工程，移动干坞设计应符合以下规定：

- a) 驳船甲板面的有效使用面积除应满足最大管节外包尺寸外，还应满足管节外模板架设、外部人行楼梯安装、内模板退出空间等施工场地要求；
- b) 驳船的刚度应满足管节预制精度控制要求；
- c) 驳船应具有下潜功能，最大下潜深度应满足管节与驳船分离要求；
- d) 浮运航道的通航限界、通航宽度及水深应满足驳船拖航浮运要求；
- e) 驳船上应建立独立的测量系统用于管节预制；
- f) 码头场地应满足管节预制材料加工、运输等要求；
- g) 驳船的最大载重量不应小于最大管节重量及其它临时施工机械重量之和；
- h) 对管节预制、拖航、下潜等工况应进行驳船的稳定性验算。

9.5 管节浮运、沉放

9.5.1 管节浮运方式应根据干坞形式、航道条件、浮运距离、水文和气象、施工装备等因素确定。

9.5.2 管节浮运、沉放的作业窗口期应结合水文、气象等资料评估确定。

9.5.3 浮运之前，应对管节本体、端封墙、水密门进行检漏测试。

9.5.4 管节浮运、沉放过程中，应对管节姿态进行实时监控，严格控制横倾、纵倾。

9.5.5 管节浮运稳定性和主缆应进行受力数值模拟分析计算，水文条件复杂时应进行物理模

型试验。

9.5.6 浮运航道专项设计应结合管节的尺寸和浮运方案进行。

9.5.7 潮汐水域中的管节可采用坐底寄放，寄放基底应满足平整度、管节起浮和承载力要求，坐底时抗浮安全系数不应小于 1.05。

注：

坐底时抗浮安全系数数据来源于《沉管法隧道设计标准》10.2.11 条。

9.5.8 应结合管节沉放施工方案计算管节沉放水流阻力，计算应考虑施工期水流方向和流速的变化。

9.5.9 管节沉放过程中压载水舱加载应分阶段进行，各阶段抗浮安全系数应符合下列规定：

- a) 管节下沉阶段，抗浮安全系数不应小于 1.01；
- b) 水力压接之后水密门开启前，抗浮安全系数不应小于 1.02；
- c) 稳定压载阶段，抗浮安全系数不应小于 1.05。

注：

管节内的压载水箱宜采用轻便可拆卸结构，压载水箱常用的主要有钢木结构水箱和钢结构水箱两种，也可采用压载水袋等其他措施，宜根据管节重心对称布置。各阶段抗浮安全系数数据来源于《沉管法隧道设计标准》10.3.4 条。

9.5.10 管节沉放时下沉速率不宜大于 0.5m/min。

注：

管节沉放时下沉速率数据来源于《沉管法隧道设计标准》10.3.5 条。

9.6 基槽、垫层及回填

9.6.1 基槽断面形式应根据隧址的工程地质、水文条件、隧道断面和埋深等条件确定。

9.6.2 基槽横断面底部管节底部单侧余宽不宜小于 2.0m，地层稳定性差或曲线地段宜适当加宽。

注：

基槽横断面底部管节底部单侧余宽数据来源于《沉管法隧道设计标准》11.2.2 条。

9.6.3 基槽底部设计高程应根据隧底标高和基础垫层厚度确定。

9.6.4 基槽宜结合航道条件按纵向分段、分层开挖施工，基槽开挖方式和浚挖设备。应根据隧址的地质、水文、航道、深度和环境要求等因素综合确定。

9.6.5 水下基槽开挖不宜欠挖，最大超深不宜超过 0.5m，超深过大时应采取回填措施。

9.6.6 管节沉放前，应对基槽底回淤情况进行检查。基槽底回淤沉积物重度大于 11.0kN/m³，且厚度大于 0.3m 时应进行清淤。

9.6.7 管节基础应满足施工期、运营期的承载力、变形量及稳定性要求。

9.6.8 基础垫层可采用先铺法和后填法。后填法基础垫层应实施过程监测和效果检测评价。

注：

基础垫层可采用先铺法和后填法，其中先铺法基础常采用刮铺碎石基础，碎石以 15cm 左右的卵石和半径 1.3~1.9cm 的沙砾最佳；后填法常用三种基础形式，其中喷砂基础中砂的平均粒径在 0.5mm 砂水混合物含砂量约为 10%~20%；压砂基础为砂与水泥熟料的混合物，砂料平均粒径为 0.16~0.27mm；和压浆基础多采用 0.6m 厚碎石层和 0.4m 厚膨润土砂浆。

9.6.9 基础垫层压缩模量宜通过试验获取。

注：

对于先铺法和后填法基础垫层的压缩模量宜采用室内试验确定，对于采用桩基础的沉管隧道，可采用以 Mindlin 公式为依据的单向压缩分层总和法计算最终沉降。基槽开挖后，地基土浸泡在水中逐渐软化，其软化厚度可通过现场实测、室内试验得到，软化后地基土的压缩模量宜采用室内试验确定。

9.6.10 对有抗震设防要求的沉管法隧道，管节基础垫层应进行抗地震液化验算。

9.6.11 管节基底存在淤泥、淤泥质土、可液化土或软弱下卧层时，应进行地基处理并采用适当的结构措施。

9.6.12 管节沉放后应及时对基槽进行回填覆盖，回填选用级配良好、透水性强、不液化、对隧道耐久性无危害、环保的材料。

9.6.13 基槽回填应根据回填料和回填部位，按先低后高、分段分层、对称均衡的原则进行，施工中隧道横断面两侧回填高差应小于 500mm，最终允许偏差应小于 300mm。

9.6.14 管节顶部防护性硬质回填应根据船舶抛锚、沉船和冲刷等因素确定，厚度不宜小于 1.5m。

注：

水下基槽开挖最大超深数据来源于《沉管法隧道设计标准》11.4.3 条。

9.7 其他设计

9.7.1 端封墙、系缆桩、测量塔、拉合座、吊点、鼻托、压载水舱及临时支承系统等舾装件，应根据受力特点和使用要求进行结构强度、变形及稳定性分析。

9.7.2 管顶舾装设备应能满足管节拖运、沉放、对接施工工艺的要求。

9.7.3 管节接头钢端壳、钢底板、PC 拉索套筒、钢剪切键、GINA 止水带和 OMEGA 止水带的压板及紧固件、裸露的预留预埋钢构件等，应采取涂刷耐腐蚀性涂层或金属喷涂、牺牲阳极等措施。

9.7.4 护岸结构形式应根据工程地质、水文条件、周边建（构）筑物、堤防等级、岸壁结构承载力及稳定性要求等因素综合确定，并宜与永久性堤岸工程结合设计。

9.7.5 护岸结构的防洪、防渗及变形标准不应低于既有堤岸。当护岸结构作为永久性堤岸时，还应满足规划堤岸的要求。

9.7.6 衔接段应根据隧道结构受力及施工要求，结合护岸工程进行设计。

9.7.7 衔接段端头围护结构应便于拆除，原有防汛体系在端头围护结构拆除前后都应保持完整。

9.7.8 衔接段四周应建立可靠的防渗体系并与护岸工程的防渗体系有效衔接。

9.7.9 管节与衔接段对接范围内，衔接段两侧的护岸结构侧壁与管节之间的净距应满足管节浮运及水下对接作业空间要求，且不宜小于 2.5m。

注：

水下基槽开挖最大超深数据来源于《沉管法隧道设计标准》12.3.4 条。

9.7.10 衔接段围护结构采用临时围堰时，堰顶高程除应根据风浪爬高、雍水高度等要求确定外，尚应预留出 0.5m~1.0m 的安全加高值。

注：

水下基槽开挖最大超深数据来源于《沉管法隧道设计标准》12.3.7 条。

9.7.11 管节内压载水舱宜选用轻便可拆装的结构，根据管节重心按轴线对称分舱设置。

9.7.12 压载水舱有效容积计算应考虑管节沉放坡度影响，并应满足施工阶段管节抗浮安全系数要求。

9.7.13 端封墙宜采用易拆卸式结构，相邻管节端封墙间净距满足水密门开启要求，且应设置进排水孔和进气管等设备预留孔。

9.7.14 预留预埋设施应根据其用途按临时结构或永久结构设计。临时预留预埋设施应选用易封堵或易拆除的结构形式。永久预留预埋设施应按与主体结构同寿命原则进行耐久性设计。

10 钻爆法隧道

10.1 一般规定

10.1.1 钻爆法隧道应结合施工方法、结构形式、断面大小、工程地质、水文地质和环境条件等因素，合理确定其埋置深度及相邻隧道的距离。

10.1.2 钻爆法隧道应采用复合式衬砌，设计参数应根据使用要求、地质条件、隧道埋置深度、环境作用等级、运营期渗水量控制要求等因素综合分析确定。

10.1.3 隧道防排水设计应遵循以堵为主，限排为辅，多道设防，综合治理的原则，保证隧道结构和营运设备的正常使用。

注：

水下隧道一般为 U 形坡，无法自然排水，需采用机械排水，排水量直接影响后期运营费用，而完全限制地下水的排放又会带来建设成本的提高，故要求同时考虑水压荷载以及经济性因素。采用“以堵为主”的原则，控制地下水排放量。

10.1.4 钻爆法隧道应根据周边环境、地质条件、隧道断面大小、埋置深度、施工方法，采用相应的开挖方法及辅助工程措施。

注：

水下钻爆法隧道与山岭隧道的最大不同是水下隧道处于近乎无穷水体的下方，一旦出现坍塌、突水突泥等工程事故，其后果比山岭隧道严重得多，因此隧道一般需采取稳妥的辅助施工措施保证施工安全，并且制定完善的事故应急预案。

10.1.5 当隧道通过风化槽（囊）、断层破碎带、富水砂层等特殊地质地段时，应进行特殊设计，保证结构和施工安全。

10.1.6 超前地质预报及监控量测方案应根据地质条件、开挖跨度、环境条件以及施工组织等因素制定。

注：

隧道埋置于地下，工程地质和水文地质条件复杂多变，在勘察阶段很难准确揭露隧道所通过地层的地质条件，隧道支护设计可能产生一些偏差。为了使隧道支护设计更符合实际、防止地质灾害造成人员伤亡和经济损失。要求施工过程开展超前地质预报和监控量测工作。

10.1.7 在隧道施工过程中，应根据隧道超前地质预报和监控量测的相关信息实行动态设计和信息化施工，对开挖方法、支护参数及时进行调整。

注：

由于在隧道工程中存在地质条件的不确定性，隧道施工前的地质调查资料需要在施工过程中进一步核实和调整。因此隧道支护参数、施工方法在隧道施工过程中要根据所揭露的地质状况、围岩及支护受力和变形情况，进行及时调整，使衬砌结构设计和施工方法更适应于围岩实际情况。

10.2 衬砌结构及构造

10.2.1 钻爆法隧道衬砌结构可分为全封闭复合衬砌、限排复合衬砌及排放复合衬砌三种类型，衬砌的选用应符合下列规定：

- a) 静水头压力较小且在 V、VI 级围岩地段，宜采用全封闭复合衬砌；
- b) 在 I~III 级围岩地段，宜采用排放复合衬砌；
- c) 在渗水量较大地段，应通过地层注浆减少围岩的总渗水量，根据注浆处理后渗水量大小及地质条件可采用限排复合衬砌或排放复合衬砌。

注：

隧道工程对地下水的处理方式可以分为两大类型：防水方式和排放方式(限制排放或全排放)。其中，防水方式由于衬砌要承受同地下水水头基本相当的水压力，因此当隧道埋置较大，地下水水头较高时隧道一般都采用排放方式，结合结构安全及经济性两方面考虑，一般认为双车道隧道适用于静水头压力小于 70m 地段，三车道隧道适用于静水头压力小于 60m 地段。排导方式是在衬砌背后设置排水盲管及透水填层，对

地下水进行排放，从而减小作用在衬砌的水压力荷载，使得衬砌结构经济合理，但由于地下水排放量的增加，会造成运营期间管理难度及费用的提高，因此对于围岩渗透性较强地段，往往需通过地层注浆，减小渗水量。另外，应考虑排放系统的可检修和防堵塞设计，以保持排水能力，避免衬砌受力模式的改变。

10.2.2 全封闭复合衬砌的二次衬砌设计应符合下列规定：

- a) 采用全封闭复合衬砌隧道的最大水头一般不超过 0.6MPa；
- b) 在运营期承担全部水压力时，宜采用钢筋混凝土结构；
- c) 根据结构受力计算，水压力越大时断面形状越接近圆形；
- d) 应采用曲墙带仰拱的结构形式。

注：

全封闭复合衬砌原则上不考虑围岩水流入隧道内，因此外水压力大小为静水头高度，边墙和仰拱将是受力的最大部位，设计过程中应予以重点关注。

10.2.3 限排复合衬砌的二次衬砌设计应符合下列规定：

- a) 宜采用曲墙带仰拱的结构形式；
- b) 根据地质围岩情况，合理采取限排措施，确保衬砌背后地下水能长期稳定排放。

10.2.4 排放复合衬砌的二次衬砌设计应符合下列规定：

- a) 二次衬砌可采用无仰拱的结构形式；
- b) 应加强排水措施设计，确保衬砌背后地下水能长期、有效的疏导。

注：

排水复合衬砌需要将围岩水长期、顺畅地引入隧道内，防止围岩水过多的流入隧道内而造成运营期间的排水困难或因围岩水过多造成排导不畅引起结构水压力与设计水压力不一致，要求该类衬砌应位于地质较好且渗水量较小的地段。当排水系统不畅时，会导致二次衬砌承担过大水压力而破坏。

10.2.5 隧道支护结构应根据围岩条件和技术条件等选择合适的设计方法。可采用以工程类比为主的经验法初步拟定参数，采用荷载—结构法或地层—结构法对衬砌结构内力与变形进行分析计算。

注：

在含水围岩内开挖隧道，毛洞围岩和衬护结构在施工和运营期的稳定与安全很大程度上将受地下水渗流作用的制约，如何了解渗流导致围岩稳定条件的进一步恶化，是一项重要的工程设计问题，需对围岩渗流场与洞周围岩开挖二次应力场二者间的耦合相互作用计算分析，得出施工期和运营期的渗流场、应力场、位移场、塑性区的变化特征。

10.2.6 初期支护应能保证施工安全和控制围岩变形，并应符合下列规定：

- a) 应根据地质条件及施工开挖工序确定初期支护结构参数，并应考虑地下水渗流对初期支护及洞室稳定的影响；
- b) IV~VI 级围岩应根据施工全过程的不同工况采用增量法对初期支护的结构安全进行校核。

注：

水下隧道的初期支护参数应能确保施工期间的安全，同时初期支护结构对地表沉降的控制也十分重要，需要防止过大的沉降形成围岩的渗水通道，因此，水下隧道的初期支护参数较山岭隧道强。

10.2.7 初期支护的喷射混凝土应符合下列规定：

- a) 强度等级不低于 C25；
- b) 厚度不小于 80mm；
- c) 在自稳性差的软弱围岩、膨胀性围岩地段，宜选用纤维喷射混凝土支护。

10.2.8 锚杆设计参数应根据地质条件、隧道断面尺寸、使用部位、施工条件等合理选择，并应符合下列规定：

- a) 宜选用全长黏结型锚杆；
- b) 锚杆长度不宜短于 2.5m，间距不宜大于 1.5m；

c) 锚孔内水泥砂浆强度等级不应低于 M30，宜采用早强砂浆。

10.2.9 在围岩条件较差地段，初期支护应设置钢架，并应符合下列规定：

- a) 初期支护中的钢拱架宜选用钢筋格栅，临时仰拱或中隔壁可采用型钢拱架；钢拱架间距不宜大于 150cm，钢筋格栅的主筋直径不宜小于 18mm；
- b) 初期支护钢架各分段间应采用可靠的连接，节点位置应与施工开挖方法和步序相结合，先期施工的导洞钢架节点应考虑到与后期施工导洞钢架节点的衔接；
- c) 节点位置宜避开受力较大的部位；
- d) 每段钢架长度和重量应方便现场施工，其长度不宜小于 2.0m；
- e) 可将相邻环钢架的节点位置错开布置。

10.2.10 应严格限制支护结构的变形与收敛，预留变形量可按表 17 选用，并应根据现场监控量测结果进行调整。

表 17 预留变形量 (mm)

围岩岩级别	两车道隧道	三车道隧道
II	—	10~30
III	20~50	30~80
IV	50~80	60~120
V	80~120	100~150

注：

相对于普通山岭隧道，水下隧道的埋深一般要小得多，隧道开挖施工易引起地表变形，在海或河床位置和隧道周围分别会产生拉破坏区和塑性区，当两破坏区连通时就很容易造成隧道突水。突水通常由地层结构界面滑移、地层过渡变形和地层坍塌等 3 种方式诱发，但最终都以地层变形表现出来。因此，对于水下隧道软弱围岩地段预留变形量的要求应严格控制。

10.2.11 作用在二次衬砌上的外水压力可根据式(10.2.11)计算：

$$P_w = \beta(h_w - h_s) \left[1 - \left(\frac{Q_s}{Q_0} \right)^\alpha \right] \gamma_w \tag{10.2.11}$$

式中：P_w——地下水压力荷载(kN/m²)；
h_w——设计最高水位高程(m)；
h_s——水压力计算点高程(m)；
β——地下水压力修正系数，可根据围岩渗透情况按表 18 确定；
Q₀——未施作二衬时洞室在设计水头作用下的渗流量(m³/s)，初期支护指裸洞状态，二次衬砌指初期支护封闭完成后的状态；
Q_s——施作衬砌后洞室在设计水头作用下的渗流量(m³/s)；
α——限制地下水排放时地下水压力折减系数，可根据围岩渗透系数确定：
对于 II~III 级地质条件较好的围岩，α=0.5~1.0；
对于 IV 级围岩，α=1.0~1.5；
对于 V 级及其以下地质条件较差的围岩，α=1.5~2.0；
γ_w——地下水重度(kN/m³)

表 18 地下水压力修正系数β

地下水活动情况	修正系数β
洞壁干燥或潮湿	0~0.2
沿结构面有渗水或滴水	0.1~0.4

沿裂隙或软弱结构面有大量滴水、线状流水或喷水	0.25~0.6
严重股状流水，沿软弱结构面有小量涌水	0.4~0.8
严重滴水或流水，断层等软弱带有大量涌水	0.65~1.0

注：

在结构计算中，如何确定合理的外水压力设计荷载是非常重要的一个问题。翔安隧道作为国内的第一条海底隧道，曾通过专用的水压力试验压力容器进行了模型试验，研究了同排导系统相应的阻尼以及稳定水头排水的情况、衬砌承受水压力的水大小及分布规律，最后得出排放量大小与水压力的关系曲线。通过该模型试验，得到了以下结论：

(1) 若衬砌采用全封闭防水，无论是否采用围岩注浆减小围岩渗透性，都不能降低最终作用在衬砌上的水压力，在计算水压力时必须采用同地下水位相应的量值，不能折减。

(2) 采用排导系统能有效卸载。

①采用盲管 $\phi 10\text{cm}$ ，出水口直径为 $2\phi 10\text{cm}$ ，间距小于 10m 或局部地段 k 大的可注浆，注浆圈厚 5m ， $k < 10\text{-}3\text{cm/s}$ ，基本可以不计算水压力；

②采用 $\phi 5\text{cm}$ 盲管排水、环向布置间距 10m ，出水口 $2\phi 10\text{cm}$ ，水压力折减系数取 0.4 。

由于岩土工程的复杂性，隧道的外水压力作用一般也是很难确定的。根据围岩的渗透系数、岩层结构、地质构造、渗流类型、衬砌形式、补给水源、排水或出水点等条件，通过渗流计算来确定作用在衬砌上的外水压力可能比较准确。但是，由于计算工作量较大，计算参数确定的难度，这种计算对重要工程或重要地段是必要的，但对所有水下隧道就不现实。而用结构力学法计算就需要先确定作用在衬砌外表面上的外水压力，然后按面力计算。

10.2.12 对于全封闭复合衬砌，作用在二次衬砌上的外水压力宜按全部静水头高度计算，初期支护应考虑施工阶段的地下水渗流压力的影响。

10.2.13 对于限排复合衬砌，二次衬砌的设计外水压力不宜小于总水头的 25% ，且不应低于 200KPa 。

10.2.14 对于排放复合衬砌，二次衬砌可不考虑外水压力，但应以不小于 200KPa （拱顶）水压力按正常使用极限状态准永久组合进行结构验算。

10.2.15 钻爆法施工的结构，应向其初期支护、二次衬砌背后压注水泥砂浆或其他浆液，保证围岩与结构的共同作用。

10.2.16 隧道建筑物各部结构的截面最小厚度，应满足《地下工程防水技术规范》（GB50108）的要求。

10.2.17 隧道衬砌配筋构造应符合下列规定：

a) 受力钢筋最小直径不应小于 16mm ；

b) 衬砌内外侧应设垂直于受力主筋的分布钢筋，分布钢筋直径不宜小于 12mm ，间距不宜大于 300mm ；

c) 衬砌内外两层受力钢筋之间应设拉筋，直径不应小于 6mm 。拉筋应布置在环向受力钢筋和分布钢筋的交叉位置，间距不应大于分布钢筋间距的 2 倍，环向受力钢筋和箍筋应进行绑扎或焊接。

10.2.18 钢筋混凝土构件的表面裂缝最大宽度计算值应不大于 0.2mm ，腐蚀环境较严重时不应大于 0.15mm ，并应符合相关规范规定。

10.3 衬砌防排水

10.3.1 隧道衬砌的防排水方案应根据隧道开挖方法、结构特点、水压大小及容许渗水量等因素制定。

注：

水下隧道建成后，如果出现渗漏，轻则影响美观、使用不便，重则影响结构安全、引发交通事故。水

下隧道防排水是系统工程，在保证结构安全可靠的基础上，衬砌排水方案要充分考虑防水要求，保证二者的协调性。地下工程防水质量的优劣与设计、选材、施工、监理等环节都有关系，只有这几个环节都管理好，才能确保地下工程防水质量。

10.3.2 隧道衬砌应达到二级防水标准，配电房等特殊地段应达到一级防水标准。

10.3.3 隧道衬砌应采用防水混凝土，采取有效技术措施保证变形缝、施工缝、穿墙管、预埋件、各种结构断面接口等细部结构的防水效果。

10.3.4 允许的渗水排放量应根据隧道跨度、长度、地质条件、静水头高度分区段综合确定，平均排放量宜小于 $0.3\sim 0.4\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$ 。

注：

水下隧道的允许排放量应根据其项目特点具体情况具体分析，需在结构安全的前提下，使运营可靠、费用合理。青函隧道海底段排放量为 $0.2736\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ，挪威海底隧道规范规定允许的渗水量为 $300\text{L}/(\text{km}\cdot\text{min})$ 即 $0.432\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ，本条允许的排放量依据三车道道路隧道而定，考虑到不同隧道断面大小不一，两车道、四车道道路隧道的渗水量可根据断面面积调整。

10.3.5 隧道渗水量较大时，宜采用注浆防水。注浆防水应符合下列规定：

- a) 在软弱或破碎围岩地段，应通过超前注浆，在隧道洞室四周形成注浆堵水圈，封闭围岩裂隙和渗流通道；
- b) 隧道开挖后洞壁四周存在局部渗漏水时，可采取径向注浆堵水；
- c) 初期支护表面有较大面积的渗漏水或喷层与围岩间存在空隙时，应及时进行喷层后的回填注浆；
- d) 注浆材料宜采用纯水泥浆液等在地下水长期作用下强度不显著降低的材料。

注：

注浆主要有两个目的，一是保证隧道施工安全；二是减轻运营期间的排水压力，对于水下隧道应重视第二目的的作用。根据注浆方法、时机、作用等分为地表预注浆、洞内深孔注浆、洞内径向注浆和初期支护背后注浆等。

10.3.6 全封闭、限排、排放复合衬砌之间应采取隔水措施，防止不同防水分区之间地下水相互连通，并应符合下列规定：

- a) 对地下水封闭要求高的衬砌应向封闭要求低的衬砌延伸 $15\sim 20\text{m}$ ；
- b) 不同衬砌类型之间隔水措施的纵向长度宜为 $8\sim 12\text{m}$ ；
- c) 在地质条件较好的地段可取消初期支护与二次衬砌之间的无纺布，并在防水层与初期支护之间设置软质橡胶等防串流垫层。

注：

同一水下隧道设置了不同的防排水衬砌类型时，应参照结构上围岩较差的衬砌类型向较好的衬砌类型进行延伸的规定。同时，不同衬砌类型尤其在不同的防排水衬砌类型之间应设构造措施截断地下水在纵向上的流动，以避免实际水压力工况与计算水压力工况的不一致。隔水措施主要考虑采用不同防排水形式的结构之间水的串流和渗透系数较大围岩之间的渗流。

10.3.7 隧道防水层应符合下列规定：

- a) 应选用强度高、延性好、耐老化的合成高分子类防水卷材；
- b) 卷材外观质量、品种规格应符合现行国家标准或行业标准。

注：

本条参照《地下工程防水技术规范》（GB50108）要求制订。自粘型防水卷材的优点是浇筑的混凝土能与卷材粘结层固化反应，使卷材与结构层粘结为一体，中间无窜水隐患；即使卷材局部遭遇破坏，也会将水限定在很小范围内，提高了防水层的可靠性。

10.3.8 仰拱不设防水层时，边墙处防水板端头应采取可靠的防水封闭措施。

注：

水下隧道对二次衬砌混凝土防水性能要求较高，即使是全封闭衬砌，不设仰拱防水板也能达到要求的封闭效果。仰拱内设置有排水系统，少量的渗水也能通过排水管迅速排走，不影响路面行车安全。

从另一个角度考虑,由于钻爆法隧道仰拱部分水压力更大,较拱部更为平坦,往往也需要让其结构与初支、围岩共同受力变形以承担水压力。因此,如非特殊要求,水下钻爆法衬砌仰拱下方可不设置防水板。

拱墙部设置的防水板,需与未设防水板的仰拱之间做好封闭措施,旨在防止仰拱地下水通过防水板与二次衬砌之间的空隙回水至拱部,而降低防水板的使用效果。

10.3.9 隧道衬砌的施工缝、变形缝应采取可靠的防水措施,设置应满足《地下工程防水技术规范》(GB50108)的要求。变形缝处采取的防水措施应能满足接缝两端结构产生差异变形及纵向伸缩时的防水要求。

10.3.10 隧道排水设计应符合下列规定:

- a) 全封闭复合衬砌段衬砌外可不设置环向排水管;
- b) 排放复合衬砌及限排复合衬砌的衬砌外排水管的布置方式和管径应根据地质情况、总静水压力、衬砌抗水压能力综合确定;
- c) 结构计算计入水压力折减时,应保证排水系统的长期有效性或具有可维护性;
- d) 仰拱未设防水层时,路面基层应有有效的排水措施,防止地下水渗流至路面影响行车安全。

注:

围岩水排放率的多少与水压力的折减是成线性关系的,因此,二次衬砌背后排水管的通畅与否非常关键,排水系统需要方便检查、维修。

10.4 辅助措施及开挖方法

10.4.1 在围岩自稳能力较差、开挖可能产生坍塌的地段,可采取洞内超前管棚支护措施。超前管棚支护设计应遵循下列规定:

- a) 管棚钢管宜选用热轧无缝钢管,外径宜为 76mm~180mm,环向间距宜为 30~50cm,应有一定外插角,倾角大小应保证管棚钢管不侵入隧道结构轮廓线内;
- b) 钢管分阶段采用“V”形对焊或丝扣连接,每一接头与相邻钢管接头应错开不小于 50cm 的距离;
- c) 一次支护长度宜为 16~45m,两次管棚支护间、管棚与其他超前支护间应有不小于 3.0m 的水平搭接长度;
- d) 钢管内应填充水泥砂浆,砂浆强度等级不应低于 M20。

注:

由于管棚是在隧道开挖前施作,对掌子面前方拱顶围岩形成纵向支护,隧道开挖过程中在钢架支撑的共同作用下,对阻止围岩下沉、防止掌子面拱顶塌方和维护掌子面稳定等有显著效果,超前大管棚具有很强的超前支撑能力和控制沉降能力,在松散破碎地层、地面沉降有严格控制的浅埋段、塌方地段都可以采用。

(1) 管棚钢管环向间距视管棚支护段地质条件而定,保证两管之间不掉渣,一般为 30~50cm;在围岩为含水的砂土质地层、松散碎石层、回填地层、破碎围岩粒径较小的地层取小值。拱部管棚设 0.5~2 的外倾角,避免纵向管棚钢管侵入隧道开挖轮廓线内。

(2) 管棚钢管节段长度,根据管棚工艺确定。钢管每一接头与相邻钢管接头错开,错开距离不小于 500mm,并保证同一断面钢管接头不大于 50%。

(3) 管棚一次支护的钢管长度根据需要确定。当需采用超前支护的长度大于 40m 时,一般采用其他超前支护措施继续延伸,也可分两次施作;两次管棚支护间、管棚与其他超前支护之间要有不小于 3.0m 的水平搭接长度,以保证钢管远端的有效支撑。管棚长度小于 16m,采用管棚作为超前支护不经济。为保证开挖后管棚远端仍有足够的超前支护长度,钢管需伸入稳定地层不小于 3.0m。

(4) 为保证钢管的连续性和强度,管内需注满砂浆。管棚内注满具有一定强度的砂浆是为保证钢管强

度和刚度，受力后钢管不产生折、瘪，保证整个管棚支撑体系的支撑能力。

10.4.2 在隧道开挖后掌子面不能自稳地段、拱部易出现剥落或局部坍塌的地段；可采用超前小导管支护。超前小导管设计应符合下列规定：

- a) 宜采用直径为 42~50mm 的无缝钢管，长度宜为 3.0~5.0m；
- b) 管壁应钻注浆孔，孔径宜为 6~8mm，间距宜为 150~250mm，呈梅花形布置，尾端应有不小于 50cm 长不钻孔；
- c) 环向设置间距宜为 30~40cm，外插角宜为 5° ~ 12° ，纵向水平搭接长度不应小于 1.0m；
- d) 尾端应支承在钢架上；
- e) 应通过导管向围岩体注浆。

注：

超前小导管是沿隧道拱部开挖轮廓线布置，向纵向前方外倾 5° ~ 12° 角度打设密排注浆小导管。小导管的外露端需支承在紧邻开挖面的钢架上，与钢架组成纵横向支撑体系，通过小导管向前方围岩注浆，使浆液渗透到围岩，能加固一定范围内的围岩，又能支托围岩。超前小导管具有支护能力强、简单易行、灵活经济的特点。

10.4.3 在含水率大的淤泥质黏土、黏性土、粉土、砂性土地段，可采用超前水平旋喷桩。超前水平旋喷桩设计应符合下列规定：

- a) 根据需要可采用周边加固或全断面加固；
- b) 旋喷桩直径：单管法宜为 0.3~1.0m；二重管法宜为 0.6~1.4m；三重管法宜为 0.7~2.0m；
- c) 周边加固时，旋喷桩孔外倾角宜为 3° ~ 10° ，环向间距应以相邻孔浆液能互相搭接形成拱形结构为原则；
- d) 一次施作长度宜为 10~20m，每一循环搭接长度应不小于 2.0m；
- e) 当需要增加旋喷桩的抗拉、抗弯强度时，可在旋喷桩内插入型钢、钢筋笼、钢筋束或钢管。

注：

根据实际的地质条件确定超前水平旋喷桩布孔间距。表 10.4.3 给出了超前水平旋喷桩的直径，供参照选用。定喷和摆喷的有效直径为旋喷桩直径的 1.0~1.6 倍。

表 10.4.3 旋喷桩的设计直径(m)

土质		单管法	二重管法	三重管法
黏性土	$0 < N < 5$	0.5~0.8	0.8~1.2	1.2~1.8
	$6 < N < 10$	0.4~0.7	0.7~1.1	1.0~1.6
	$11 < N < 20$	0.3~0.6	0.6~0.9	0.7~1.2
砂性土	$0 < N < 10$	0.6~1.0	1.0~1.4	1.5~2.0
	$11 < N < 20$	0.5~0.9	0.9~1.3	1.2~1.8
	$21 < N < 30$	0.4~0.8	0.8~1.2	0.9~1.5

注：N 为标准贯入锤击数。

水平旋喷桩旋喷注浆材料一般采用水泥浆，地下水丰富地段根据情况采用速凝早强型水泥浆。水泥采用 32.5 级或 42.5 级硅酸盐水泥，浆液水灰比 1:1~1.5:1。

注浆量计算一般采用体积法或喷量法。体积法按式(10.4.3-1)计算：

$$Q_z = \frac{\pi}{4} D_e^2 k_1 h_1 (1 + \beta_1) + \frac{\pi}{4} D_0^2 k_2 h_2 \quad (10.4.3-1)$$

式中： Q_z ——需要用的浆量（ m^3 ）；

D_e ——旋喷管直径（m）；

D_0 ——注浆管直径（m）；

k_1 ——填充率，取 0.75~0.9；

h_1 ——旋喷长度，（m）；

k_2 ——未旋喷范围土的填充率，取 0.5~0.75；

h_2 ——未旋喷长度，（m）；

β_1 ——损失系数，取 0.1~0.2。

喷量法以单位时间喷浆量及喷射持续时间计算浆量，按式(10.4.3-2)计算：

$$Q_z = \frac{H_L}{v} q (1 + \beta_1) \quad (10.4.3-2)$$

式中： Q_z ——用浆量（ m^3 ）；

v ——提升速度（m/min）；

H_L ——喷射长度（m）；

q ——单位时间喷浆量，（ m^3/min ）；

β_1 ——损失系数，取 0.1~0.2。

水平旋喷桩一般在饱和软土地段使用，对地下水流速大、浆液无法在注浆管周围凝固的软土地层，不宜采用超前水平旋喷桩。

10.4.4 在软弱地层采用大断面或全断面开挖，可采用超前玻璃纤维锚杆对掌子面前方进行加固。超前玻璃纤维锚杆设计应符合下列规定：

- a) 已采用超前管棚支护时，加固范围宜在掌子面范围内；
- b) 在掌子面区域，锚杆间距宜为 1.0~3.0m；在隧道周边围岩区域、锚杆间距宜为 30~60cm；可根据围岩稳定性进行调整；
- c) 加固纵向长度宜为 10~30m，每一循环搭接长度不应小于 6.0m；
- d) 全螺纹实心锚杆直径宜为 18~32mm；全螺纹中空锚杆直径宜为 18~60mm；
- e) 地质条件较差时宜选用中空注浆锚杆，注浆材料采用水泥浆或水泥砂浆；
- f) 应做好掌子面排水，并监测掌子面纵向挤出位移。

注：

玻璃纤维锚杆主要是为前方开挖土体进行加固。玻璃纤维锚杆超前加固是隧道“新意法”施工工法的配套技术。“新意法”隧道施工工法是一种系统的全断面机械化开挖的隧道设计、施工技术，玻璃纤维锚杆超前加固掌子面，使掌子面达到一定的自稳能力采用机械化全断面开挖，高效作业“新意法”设计和施工被意大利公路及铁路领域纳入规范并且被广泛采用欧洲国家的大型项目施工也较多地采用此工法。

玻璃纤维锚杆杆体全长黏结锚固锚注结合，加固前方掌子面和围岩：玻璃纤维锚杆强度高、质量轻，抗拉强度可达到钢质锚杆的 1.5 倍，质量为同种规格钢质锚杆的 1/4~1/5；安全性好，防静电、阻燃、高度耐腐蚀、耐酸碱、耐低温。由于玻璃纤维锚杆抗剪强度较低，施工机械可直接挖除。

10.4.5 隧道围岩破碎岩体层间接合较差的地段可采用小导管径向注浆加固围岩。小导管长度不宜小于 3.5m、间距宜为 1.0~2.5m。

10.4.6 掌子面临时封闭可采用锚喷支护封闭、袋装土挡土墙封闭或现浇混凝土挡土墙封闭等措施。下列地段宜采用掌子面临时封闭措施：

- a) 地质条件较差，掌子面难以自稳的地段；
- b) 施工期间发生塌方，需对前方坍塌土体注浆的地段；
- c) 需要严格控制开挖面前方地层变形的地段。

注：

无论采用哪种临时封闭措施，均应注意方法的有效性、施工的可操作性以及后期拆除的方便性和可重复利用性。掌子面、临时仰拱及导坑喷锚加固宜尽量少用或不用钢筋拱架及钢筋网喷射混凝土，宜采用塑料锚杆及化学纤维喷射混凝土等新材料，以方便拆除。

10.4.7 地下水丰富且排水时挟带泥沙引起前方围岩失稳的破碎带、风化带，可能存在涌水

突泥隐患的地段或排水后对隧道周边地下水和地表水影响较大的地段,可采用超前围岩预注浆堵水并对围岩进行加固。超前围岩预注浆设计应符合下列规定:

- a) 应根据工程与水文地质条件等因素,超前围岩预注浆可选用超前全断面帷幕注浆、超前周边预注浆、超前局部预注浆等措施;
- b) 应根据地质条件及地下水情况,确定加固范围,选用注浆材料;
- c) 帷幕注浆、周边注浆的加固范围不宜小于开挖轮廓线外 5m,每循环加固长度不宜超过 40m,每循环需搭接 5~10m;
- d) 注浆孔底间距宜为 1.5~3.0m,或取浆液扩散半径的 1.5~1.7 倍;
- e) 浆液扩散半径宜根据地层孔隙,裂隙及连通性、注浆压力、浆液种类等在现场试验确定,或按工程类比法选定,并应在施工中不断修正。

注:

超前围岩预注浆是对掌子面前方未开挖段的围岩进行预注浆堵水并加固围岩的方式。注浆圈厚度是根据涌水量、围岩地质条件和地下水压力等因素综合确定;注浆段长度是根据掌子面前方围岩地质条件、地下水压力、止浆墙厚度和施工机械水平等因素确定。注浆孔底中心间距的确定是以各孔浆液扩散范围相互重叠为原则。注浆量和浆液扩散半径一般很难准确确定,通常是工程类比分析初步选定,在现场根据试验验证确定。

注浆材料是关系到注浆成败的关键之一,它直接影响到注浆成本、注浆工艺、注浆效果等一系列问题。现代注浆材料的品种比较繁多,隧道常用注浆可分为胶结材料、化学材料及复合材料 3 类。胶结浆材包括不稳定粒状浆材(水泥类)和稳定粒状浆材(水泥黏土等),化学浆材包括无机浆材(水玻璃类)和有机浆材(环氧树脂类、聚氨酯类)。常见注浆材料的优缺点应用范围及在铁路注浆工程中的应用见表 10.4.7-2。目前很难找到一种注浆材料能同时满足各类需求,注浆材料的选择应考虑地质条件、注浆目的、工程对象特征等,选择较合理的一种或几种浆材的联合使用使注浆既有效又经济合理。

10.4.8 开挖前方有高压地下水或有充分补给源的涌水,排放地下水对围岩稳定、周边环境影响较小的地段,可结合超前围岩预注浆堵水采用超前钻孔排水措施疏干开挖区域的地下水。超前钻孔排水设计应符合下列规定:

- a) 孔径不应小于 76mm,每断面钻孔数不应少于 3 个;
- b) 深度不宜小于 10m;
- c) 孔底位置超前掌子面距离小于 1~2 个开挖循环进尺且仍需继续超前钻孔排水时,应实施下一循环超前钻孔排水;
- d) 孔口应设置防突涌水保护装置。

注:

超前钻孔排水是为了防止承压水突然袭击而采取的措施,也是超前探水的有效方法。根据对工程地质和水文地质详细调查分析,判断地下水流向和涌水量,确定钻孔布置位置、方向、数量和每次钻进深度和钻孔孔径。隧道掌子面开挖掘进过程中,保持超前钻孔孔底位置超前掌子面 1~2 个开挖循环进尺,是为了保证前方未钻孔排水的围岩地段与掌子面有足够的岩盘厚度。

10.4.9 隧道穿越可能出现突水突泥的风化深槽或其他特殊不良地质地段时,应设置临时防水闸门。防水闸门的设计应遵循下列原则:

- a) 应选择在地质条件较好地段,门框与围岩的连接应牢固可靠;
- b) 与不良地质段距离不宜小于 50m;
- c) 防水闸门宜采用内置型钢骨架、外贴钢板的可拆卸重复利用结构;
- d) 防水闸门及门框四周应安装挤压式防水橡胶密封条;
- e) 风水电管宜布设于闸门内,且应便于拆卸。

注:

水下隧道施工中的最大威胁是掘进中的突水突泥,一旦出现此类事故,将对人员安全和工程造成极大的损失。因此,除采用各种有效的工程措施保证施工和结构的安全以外,还应对可能出现的意外提前准备

并制定应急措施，将损失减小到最小。主要应急措施包括防水闸门、排水设备、救护系统和逃生路线规划等。防水闸门是迫不得已的最后一道防线，可限制灾害范围扩大。防水闸门的设计需要本着牢靠、便捷的特点，并与周边围岩有着较好的连接。其设置位置需要与不良地质段有个安全距离，同时也可以给不良地质的处理预留施工场地。防水闸门是个应急手段，应能保证随时可启用。当初期支护封闭后，结构安全性基本能得到保证，此时，可考虑拆除防水闸门。

10.4.10 应根据地质条件、隧道开挖断面和围岩稳定情况选择开挖方法。岩石质量较好的硬岩地段可采用全断面法施工，初期支护应及时跟进；岩石质量较差地段和经注浆等地层改良措施的软弱围岩地段，宜采用台阶法施工。特殊地层和对地表沉降控制要求较高的地段，宜采用分部开挖方式施工。不同围岩条件和开挖断面适宜的开挖方法见表 19。

表 19 不同围岩条件和开挖断面适宜的开挖方法

序号	开挖方法		围岩级别	
			两车道隧道	三车道隧道
1	全断面法		I~III	I~II
2	台阶法	两台阶法	III~IV	II~III
		三台阶法	IV~V	III~IV
		三台阶七步开挖法	—	IV
3	分部开挖法	中隔壁法（CD 法）	IV~V	IV~V
		交叉中隔壁法（CRD 法）	V~VI	IV~VI
		双侧壁导坑法	—	IV~VI

- 10.4.11 开挖方法转换应符合下列规定：
- a) 转换前应进行围岩级别核对，确认开挖方法和支护参数适用于前方围岩。
 - b) 分部断面变大、支护变弱应在较好的围岩段中进行。
 - c) 转换前应进行技术交底。
 - d) 转换应逐渐过渡。
 - e) 转换过程中各开挖分部应及时支护、及时闭合。
 - f) CD、CRD 或双侧壁等工法转变时应注意临时仰拱及临时竖隔壁的合理衔接，确保施工便利性及连续性。

10.5 超前地质预报及监控量测

10.5.1 钻爆法隧道施工应将超前地质预报和监控量测纳入工序管理，建立预警机制，实时动态地掌握隧道开挖地质情况与围岩变形。

注：应重视超前地质预报和监控量测工作的开展，以进一步保证隧道施工安全和高效。加强超前地质预报、动态评价预测、施工监控量测，强化数据互通、分析与应用，科学指导施工作业。加强关键指标的监测、及时掌握施工过程中围岩稳定程度和支护受力、变形等动态信息，监控量测数据达到预警值时应进行认真核查、评估，出现危险征兆时应立即停工处置。

- 10.5.2 超前地质预报应以钻探为主，并遵循地质调查与物探相结合、物探与钻探相结合、长短探测相结合、洞内与洞外相结合、构造探测与水文探测相结合的原则，应符合下列规定：
- a) 应对拱顶岩层厚度、覆盖层厚度及地下水分布情况进行探测与分析；
 - b) 超前钻孔应配置防突水涌泥的措施。

注：超前地质预报应根据预报方法的实施难易程度，按先易后难、循序渐进的原则进行。采用物探手段时应先进行中、长距离预报，在获取地质信息基础上再采用短距离预报手段进行详细探测。

1 由于岩层厚度的不确定性，在施工爆破时，开挖面外较薄的岩层尤其是拱顶，可能被高压水击穿，发生灾难性事故，因此，地质探测应重视对岩层厚度的探测，可采用物探方法或钻探方法。施工爆破钻孔时，也可将局部钻孔适当加深，核实岩层厚度。

2 地质钻机在钻进过程中，通过液压推进钻杆，如果揭穿高压含水层，将会导致冲出钻杆，推动钻机。钻孔时要做好止浆墙及固定好孔口管，设置孔口防突装置，防止发生毁坏性事故。孔口防突原理可根据钻机特性设计，它能保证钻杆在钻进过程中不受阻碍。而一旦被高压水冲出时起夹制作用。

10.5.3 超前地质预报可分为短距离预报、中距离预报及长距离预报，预测方法的选择宜符合下列规定：

- a) 预报长度不超过 30m 时，宜采用地质调查法、地质雷达法、加深炮孔法、小于 30m 的地质超前钻探等；
- b) 预报长度为 30~100m 时，宜采用弹性波反射法、30~100m 地质超前钻探等；
- c) 预报长度为 100m 以上时，宜采用弹性波反射法、100m 以上地质超前钻探等。

10.5.4 采用激发极化法探测地下水分布情况时，应依次进行数据获取、数据反演、预报结果解释和含水构造信息综合解释。测点布置应符合下列规定：

- a) 在隧道工作上宜布置 3 条平行测线；
- b) 各测线上电极布置数量宜相等，同一测线上电极间距宜相等；
- c) 3 条平行测线宜布置在距离底部 $1/4H_G$ 、 $1/2H_G$ 、 $3/4H_G$ 高度上，其中 H_G 为拱顶距离底部的高度。

注：激发极化法利用多同性源供电的方式有效压制隧道工作面后方异常体的干扰，并抑制工作面近处异常体的敏感性，提高了工作面远处异常体的敏感性，阵列式测量电极的接收模式提高了对异常体的空间分辨率。

10.5.5 监控量测的内容、密度和频率应结合隧道地质条件、地下水渗流情况及开挖方法等因素确定；应对软弱围岩地段的周边位移、拱顶下沉和底部隆起进行监测，按开挖工序布设监测点。

10.5.6 洞室周边位移监测断面的间距宜满足按表 20 规定。

表 20 监测断面间距

围岩级别	II	III	IV	V
监测断面间距 (m)	20~100	20~50	10~20	5~10

注：水下隧道采用分部开挖时，拱顶下沉测点应设在每个开挖分块的拱部，每个分部应至少布置一条水平测线。在施工过程中应对临时支护结构的安全度以及合理的拆撑时机进行监测，根据监测数据及时评估特殊结构隧道支护结构的稳定性。提出临时支护实施与拆除的建议。

10.5.7 应对隧道周边环境风险源制定风险源专项监测方案，经建设单位、设计方、监理方等认可后，方可实施。必要时应对监测方案进行专项论证。

10.5.8 软弱围岩地段应根据静水压力大小、衬砌结构类型、围岩地质情况，对初期支护背后水压力、围岩内孔隙水压力以及地下水渗水量进行监测，及时评估初期支护及二次衬砌的安全性，并预测隧道建成后的总渗水量。

注：渗水量的监测是水下隧道施工的关键工序，需要根据全线隧道地质情况、衬砌结构形式以及施工情况划分好区段。并结合受力监测数据评估结构安全度和隧道储水、排水能力。

11 围堰法隧道

11.1 一般规定

11.1.1 围堰法隧道的埋置深度与回填设计应考虑水深、航道现状、航道规划、水利规划、水流冲刷、结构抗浮、两端接线及工程规模等因素。

11.1.2 围堰一般为临时性建筑，围堰的设计应遵循安全可靠、经济合理、结构简单、施工方便、就地取材、易于拆除、利于环保等原则。

11.1.3 围堰形式及材料应结合水深、地层特性、隧道结构、基坑支护及环保要求等因素确定。围堰可按临时结构进行设计，后续需继续利用时应按永久结构设计。

11.1.4 围堰的设计使用年限应考虑明挖隧道结构施工、基坑回填及围堰拆除等因素。

11.1.5 围堰法隧道的结构型式应根据施工导流方案、地形地质条件、水文情况、建筑材料来源、施工进度要求及施工资源配置等确定，同时应考虑技术经济、环境保护、社会效益等因素。

注：

围堰系临时建筑物，通常围堰施工安排在一个枯水期修筑至设计高程或度汛高程，以保安全度汛。因此，围堰施工工期紧；同时，围堰在围护结构的永久建筑物投入运行前，需拆除部分堰体或全部堰体。故在选择围堰型式时，需考虑堰体结构简单、施工方便，在保证围堰施工质量的前提下，有利于加快施工速度和后期拆除。在洪枯流量变化较大的河流上，可考虑采用过水围堰，混凝土过水围堰适应性较强，但造价相对较高；土石围堰造价相对有优势，但防护难度大；钢板桩围堰可重复利用，造价低，但挡水水头不宜太高，因此需综合分析比较确定。

11.1.6 围堰法隧道一般为明挖法施工，围护结构应参考现行国家行业标准《建筑基坑支护技术规程》（JGJ 120），并结合当地地方性规范进行设计。

11.2 围堰设计

11.2.1 围堰级别应根据其保护对象、环境条件、水深等按表 21 确定。

表 21 围堰级别划分

围堰级别	环境条件	水深
1 级	较大河流及远离海岸的海域	$\geq 10\text{m}$
2 级	中小河流、近岸海湾	$5\sim 10\text{m}$
3 级	湖泊、塘、水库等	$\leq 5\text{m}$

注：

从国内已建成围堰法隧道统计来看，类似工程多位于近岸海湾、中小河流、湖泊、水塘等水文条件较简单区域，水深一般不大于 10m，围堰等级一般采用 2、3 级标准。随着国民经济、基础建设及技术水平的发展，围堰法隧道的应用范围有逐渐扩大的趋势。围堰作为围堰法隧道关键工程之一，要谨慎选择设计标准，兼顾工程安全、可靠性与经济性。

11.2.2 围堰布置应符合下列规定：

- a) 满足围护建筑物布置及施工要求；
- b) 满足堰体与岸坡或其他建筑物的连接要求；
- c) 围堰背水侧坡脚与围护建筑物基础开挖边坡开口线的距离，应满足堰基和基础开挖边坡的稳定要求；
- d) 满足水力条件及防冲要求；
- e) 宜利用有利地形、地质条件，减少围堰及堰基处理工程量；
- f) 宜避开两岸溪沟水流对围堰造成危害性冲刷；无法避开时，应采取相应措施。

注：

围堰布置要满足围护建筑物的施工及围堰自身的稳定、防渗及防冲等要求，尽可能利用地形地质及工程条件，减小围堰工程量。

1. 围堰布置要满足围护的建筑物基础开挖、施工机械、施工道路及施工场地布置，基坑排水系统布置等要求。

2. 围堰与岸坡接头设计要保证堰体与岸坡结合面具有良好的防渗性能并防止岸坡附近的堰体因不均匀沉陷而开裂。土石围堰与混凝土建筑物的连接型式，要防止与防渗体接触带产生渗透变形破坏，以保证围堰稳定并使结合面具有良好的防渗性能。

3. 围堰布置要考虑围堰稳定及堰后基坑开挖边坡稳定等因素。对堰地质条件复杂及深厚覆盖层的基坑开挖边坡，围堰布置要考虑为堰后基坑边坡需要的工程处理措施留出位置；若布置有困难，可在背水坡脚处设置临时挡墙。对永久建筑物基础开挖较深时，要对围堰基础岩层和覆盖层中的软弱层面稳定进行核算。

4. 围堰布置要考虑水力条件及防冲要求：

(1) 纵向围堰布置既要考虑沿线堰体坡脚附近水流平顺，还需兼顾上、下游横向围堰坡脚附近的流态、流速情况，避免水流紊乱对横向围堰坡脚造成危害性冲刷。

(2) 围堰与导流泄水建筑物（包括临时的导流建筑物和永久）进出口的距离要考虑导流泄水建筑物泄流的流态及流速情况，必要时在导流泄水建筑物进出口修筑一定长度的导墙，以防止导流泄水建筑物泄流对围堰坡脚造成危害性冲刷。

5. 围堰位置要考虑基础覆盖层及基岩条件，围堰防渗轴线一般选择在覆盖层较薄和基岩条件较好的部位，以减少围堰基础防渗处理工程量。

6. 围堰布置尽量避开两岸溪沟进入基坑，同时堰体与岸坡接头需防止两岸溪沟的水流对围堰坡脚的冲刷。围堰布置若较难避开两岸溪沟对堰体的影响，可研究采用排水洞（沟）、撇洪沟等措施将溪沟改道引至基坑外，或采用强排水、挡墙防护等措施。

11.2.3 围堰法隧道结构设计应满足使用功能、稳定、抗渗、抗冲刷要求，并应符合下列规定：

- a) 应结构简单，施工方便，就地取材；
- b) 围堰基础应易于处理，堰体便于与岸坡或已有建筑物连接；
- c) 围堰形式及填料应结合防渗处理方案确定。

11.2.4 围堰形式可采用土石围堰、钢板（管）桩围堰、混凝土（砌石）围堰中选择，并宜符合以下原则：

- a) 挡水水头小于 5m 时，宜采用土石围堰；
- b) 挡水水头较高但不高于 15m 时，可采用钢板桩或钢管桩围堰；
- c) 围堰作为永久结构考虑且基础条件良好时，可采用混凝土或砌石围堰。

注：

目前围堰法隧道挡水水头多在 2~10m 之间，一般采用土石围堰、钢板（管）桩围堰形式。部分隧道修筑时结合堤坝、滨水道路、填海造地等工程一并实施，采用混凝土（砌石）围堰形式。

1. 采用土料防渗的土石围堰，在当地富有砂壤土、风化料或砾质土，且经试验论证能满足防渗要求时，优先用作防渗土料；防渗体土料渗透系数不宜大于 10^{-4}cm/s ；当地无防渗土料或受气候条件影响较大时，选用钢板桩心墙、混凝土心墙、混凝土防渗墙、沥青混凝土防渗墙或土工膜等型式防渗。土石围堰坡脚流速控制在 5m/s 以内，围堰坡脚流速大于 5m/s 时，需专门研究防冲结构措施。

2. 钢板（管）桩围堰可采用单层或多层复合体结构形式。水深较小且不需在围堰顶部设置施工道路时，采用单层钢板（管）桩围堰；水深较大时，一般采用多层钢板（管）桩作为内外侧壁、内部填充砂土心墙的复合围堰结构形式；围堰顶部根据需要设置施工道路。

3. 混凝土围堰一般建在岩石地基上；碾压混凝土围堰造价低，施工简便，可缩短工期，在有条件时优先采用；混凝土围堰主要受基础抗冲流速控制，设计时加强基础防冲保护措施。

11.2.5 围堰堰顶高程不应低于设计洪水静水位、波浪高度、下游支流顶托及堰顶安全加高

之和，堰顶安全加高值不应低于表 22 规定值。

表 22 围堰堰顶安全加高下限值（m）

围堰形式	围堰级别		
	1 级	2 级	3 级
土石围堰	1.0	0.7	0.5
混凝土（砌石）围堰、钢板（管）桩围堰	0.5	0.4	0.3

注：

在水深较浅时，一般选用土石围堰，堰体的防渗材料可选用土工膜、土料、混凝土防渗墙、高喷防渗墙、沥青混凝土防渗墙、钢板桩心墙、混凝土心墙，主要根据材料来源、水文条件、工期、造价等要求进行确定。在沙土地基上修建围堰，围堰的最大挡水头不大于 5m。否则，防渗地基基脚处理难度增大。在岩石地基上修建围堰，受外界影响较小（如风浪等），可采用防渗心墙的结构型式，这种形式挡水头的限制高度可适当增大。

钢板（管）桩围堰多用在深水中，流速较大的砂类土、黏性土、碎石土及风化岩等坚硬河（海）床，防水性能好，整体刚度强。

混凝土（砌石）围堰具有抗冲刷、防渗性能好、安全可靠等优点，但造价较高。

11.2.6 围堰堰顶宽度应满足施工和防汛抢险要求，土石围堰堰顶宽度宜为 7~10m，混凝土（砌石）围堰、钢板（管）桩围堰堰顶宽度宜为 3~6m。

- 11.2.7 围堰水力计算应符合下列规定：
- a) 围堰应按束窄河床进行各期导流水力计算，确定各束窄断面的设计洪水水位和流速、流态，确定围堰防冲措施及通航条件；
 - b) 土石围堰应进行渗流计算，根据浸润线分析堰体、堰基渗透稳定并计算其渗流量；
 - c) 混凝土或砌石围堰，应分析堰基渗透稳定并计算渗流量；
 - d) 围堰渗流计算应考虑围堰运行中各种条件，选择最不利工况核算堰体及堰坡稳定；
 - e) 围堰防渗体及堰基的安全渗透比降宜根据试验成果经论证后取用。

注：

- 本条对围堰的水力计算予以规定。
1. 束窄河床的壅水高度（实际为最大收缩断面与上游水位之差）计算可利用能量方程推导出的近似公式计算；通过束窄河床的水力计算，求出壅水高度和束窄段最大收缩断面的平均流速，以便确定上游横向围堰及纵向围堰沿线的水面线，横向围堰及纵向围堰堰顶高程和研究围堰及河床的防冲保护方案。对 1 级、2 级围堰束窄河床的水位及流速分布和壅水高度还有赖于水工模型试验验证。
 2. 需要通过土石围堰渗流计算确定堰体浸润线位置及堰体内渗流压力分布，以验算围堰边坡稳定，拟定堰基防渗铺盖及堰体斜墙或基础防渗墙和堰体心墙的厚度及长度；确定渗流坡降（引起堰体及堰基管涌和流土的渗透坡降），以便核算堰体及堰基的渗透稳定和防渗体的抗渗强度；确定墙体及堰基的渗流量，作为堰内排水设计的依据。
 3. 对于建在含有软弱夹层的基岩或软岩上的混凝土围堰，除计算渗流量外，还需验算堰基是否会发生因渗透变形（管涌、流土等）而引起堰基渗透破坏。
 4. 围堰渗流计算一般按迎水侧设计水位、背水侧无水或迎水侧设计水位、背水侧最高水位（即堰内抽水前水位）两种水位组合条件计算即可。但对 1 级围堰，尚需核算迎水侧最高洪水位、背水侧无水或迎水侧最高洪水位、背水侧最高水位两种水位组合条件计算。
 5. 围堰防渗体及堰基的安全渗透比降，可结合工程具体情况按下列参数初步拟定：黏土为 5~10，壤土为 4~6，轻壤土 3~4。

11.2.8 围堰稳定性计算应结合围堰形式、围堰布置、围堰材料、围堰工作条件进行，并符合下列规定：

- a) 围堰计算应考虑以下荷载：堰体自重、静水压力、扬压力、浪压力、动水压力、泥沙压力、冰压力、孔隙水压力等；
- b) 土石围堰宜按极限平衡法计算边坡稳定，均质土石围堰可采用不计条间作用力的瑞典圆弧法，黏土斜墙和心墙土石围堰可采用折线滑动静力计算法或滑楔法；
- c) 混凝土（砌石）围堰稳定性在堰基岩体条件较好时，应按抗剪断强度公式计算；在堰基岩体条件较差时，应按抗剪强度公式。同时应验算围堰基面、岸坡断面、堰基岩体内软弱结构面、缓倾角裂隙等不利结构面（如有）的抗滑稳定；
- d) 围堰稳定安全系数应按表 23 取值。

表 23 围堰稳定安全系数

围堰形式	级别	抗滑	备注
土石围堰	1 级、2 级	≥ 1.2	边坡稳定
	3 级	≥ 1.05	
混凝土（砌石）围堰	1 级、2 级	≥ 1.05	按抗剪强度公式计算
		≥ 3	按抗剪断强度公式计算
		≥ 2.5	按抗剪断强度公式计算，考虑排水失效
钢板（管）桩围堰	1 级、2 级	≥ 1.1	按抗剪强度公式计算

注：

土石围堰和混凝土或砌石围堰的抗滑稳定系数参照水利行业标准《水利水电工程施工组织设计规范》（SL303）拟定，钢板（管）桩围堰稳定计算内容及安全系数为参照国外钢板桩围堰设计计算公式及安全系数拟定。

11.2.9 围堰应力及变形计算应符合下列规定：

- a) 应力及变形计算宜采用非线性弹性应力应变关系进行分析，也可采用弹塑性应力应变关系分析。若堰体及堰基为黏性土，宜考虑固结对堰体应力及变形的影响；
- b) 土石围堰的沉降计算可采用土工试验得出的孔隙比及压缩曲线，根据堰基上的自重应力及堰顶附加应力，采用分层总和法计算堰体及堰基竣工时的沉降量和最终沉降量；
- c) 混凝土（砌石）围堰使用期迎水面允许有 0.15MPa 以下的主拉应力，堰体允许有 0.2MPa 以下的主拉应力；
- d) 1 级围堰及建在复杂和软弱地基上的围堰的应力和应变除按常规方法计算外，宜采用有限元法进行数值计算。

注：

土石围堰具体应力及应变计算可参考现行《碾压式土石坝设计规范》（SL 274），混凝土（砌石）围堰建基面和堰体垂直正应力可按现行《水利水电工程围堰设计规范》（SL 645）进行计算。

11.2.10 土石围堰迎水面应进行坡面和坡脚防冲保护设计，并符合下列规定：

- a) 应做好溢流面、堰趾下游基础和两岸接头的消能防冲设计，消能防冲设计宜通过施工导流水力模型试验论证；
- b) 围堰迎水面流速宜控制在 5m/s 以内；若流速大于 5m/s，应专项研究防冲措施。迎水面流速小于 3m/s 时，其坡面和坡脚可采用一般石渣防护；流速在 4m/s～5m/s 时，可采用抛块石防护；流速在 5m/s～7m/s 时，可采用钢筋石笼或混凝土防冲板防护；流速大于 8m/s 时，不宜采用土石纵向围堰。

注：

防冲措施是土石纵向围堰的重要设计内容和结构措施。纵向土石围堰迎水面流速小于 3m/s 时，其坡面

和坡脚可采用一般石渣防护；流速在 4m/s~5m/s 时，可采用抛块石防冲体保护，控制块石粒径 0.3m~0.7m，质量 90kg~500kg，面层 3~4 层粒径大于 0.8m，质量大于 700kg 的大块石保护。若围堰坡面和坡脚流速大于 5m/s 时，采用块石防冲体保护尚不能保证安全运行，需研究专门的防冲措施，可采用钢筋石笼或混凝土防冲板保护，坡脚部位保护宽度视该部位的覆盖层情况而定，钢筋石笼及混凝土防冲板均要考虑适应基础冲塌变形，以防止围堰坡脚基础覆盖层被水流淘刷。由于纵向围堰一般比较长，如迎水面流速较大，其坡面和坡脚防护工程量将增加较大，因此，坡面和坡脚流速宜控制在 5m/s 以内，当迎水面流速超过 8m/s 时，防护难度非常大，一般不宜采用土石纵向围堰。选用土石围堰用作纵向围堰时，可在围堰结构布置上采取工程措施，改善水流条件，降低防护难度。

11.2.11 围堰防渗处理应根据地质条件，结合隧道基坑支护防渗方案，比选水泥或黏土水泥灌浆、高压喷射灌浆、钢板（管）桩墙、防渗土工膜等处理方式。

注：

结合工程实际情况，在单一防渗方案不满足要求时，围堰堰基防渗可采用组合防渗方案。

11.2.12 临时围堰应进行拆除设计，包括围堰拆除范围、拆除宽度和高程、拆除工序和拆除方法等内容。

注：

围堰拆除一般是围堰法隧道最后一道施工工序，拆除方案须综合考虑对工程安全、施工进度等各方面的影响。土石围堰拆除方法比较灵活，混凝土围堰一般用爆破法或凿除法拆除，多层钢板（管）围堰宜优先拆除心墙再拆除桩体结构。当围堰较高时，为保证拆除过程中的施工安全，在拆除围堰前宜先往围堰内侧灌水，以平衡围堰两侧的水头差。

11.3 地基处理

11.3.1 围堰法隧道应根据基坑底部地质条件、水文条件、承载力要求、抗浮要求及不均匀沉降要求等，选用换填垫层（包括加筋垫层）、复合地基、桩基等地基处理方式。

注：

隧道结构的沉降主要是由于结构地基土的再压缩变形与基础层的压缩变形造成的，同时受到隧道施工、河（海）床的淤积与冲刷、区域地下水位的下降、车辆周期性动荷载、地震荷载等其他因素的影响。对于正常固结的砂土和硬黏土来说，由于地基开挖、结构施工及覆土荷载的作用造成的卸载及加载产生的地基残余沉降较小。但对于厚度较大的饱和软黏土地基，残余沉降量较大，设计时需加以考虑。

11.3.2 围堰法隧道位于淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土或其他高压缩性土层等软弱地基上时，可根据软弱地基分布特点和厚度选择不同的地基处理形式。

a) 基坑底部地质条件仅局部不均匀，或仅浅表层 3m 内存在软弱土层时，可采用换填处理。换填材料可采用中砂、粗砂、砂砾，角（圆）砾、碎（卵）石、矿渣、灰土、黏性土以及其他性能稳定、无腐蚀性的材料；

b) 基坑底部浅表 3~5m 存在软弱土层时，可采用水泥搅拌桩、高压旋喷桩、挤密桩碎石、CFG 桩等处理形式；

c) 基坑底部浅表软弱土层厚度大于 5m 或下卧软硬交互地层时，宜采用桩基础，桩基础可采用混凝土预制桩或混凝土灌注桩。

注：

地基处理形式主要有以下几种类型：

(1) 水泥搅拌桩：主要用于加固淤泥、淤泥质土、粉土和含水量较高且地基承载力不大于 120kPa 的地基。水泥搅拌桩复合地基适用范围和加固深度与施工机械能力有关。有的深层搅拌施工机械可用于砂土地基的加固。当拟加固地基土层为泥炭土、有机质含量较高的土层，含大量植物根茎土层以及土层地下水有腐蚀性、流速过大等情况时，必须通过现场试验确定水泥搅拌桩复合地基的适用性。地基中含有大量大粒径块石的，不能采用水泥搅拌桩复合地基加固。

(2) 高压旋喷桩：根据工程需要和土质条件，高压旋喷桩可采用单管法、双管法和三管法施工。高压旋喷桩复合地基适用于处理淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、砂土、黄土、素填土和碎石土等地基。当土中含有较多大直径块石、大量植物根茎或有机质含量较高，以及地下水流速过大和已涌水的工程，应根据现场试验结果确定其适用性。

(3) 挤密砂石桩：根据成孔的方式不同可分为振冲法、振动沉管法等。按填料可分为挤密碎石桩、挤密砂桩和挤密砂桩。上述三类碎石桩均为散体材料桩，统称为砂石桩。

挤密砂石桩复合地基适用于处理松散砂土、粉土、素填土和杂填土等地基。当处理黏粒含量大于 10% 的砂土、粉土地基时，应通过现场试验确定其适用性。挤密砂石桩法也可用于处理可液化地基。

(4) 钢筋混凝土桩：适合于处理黏性土、粉土、砂土等地基。淤泥、淤泥质土地基上对变形控制要求不严的工程也可采用钢筋混凝土桩复合地基。钢筋混凝土桩复合地基中的桩应采用摩擦型桩，设计时应进行地基变形验算。

11.3.3 复合地基设计应满足隧道承载力和变形要求。复合地基承载力特征值应通过现场复合地基载荷试验确定，或采用增强体载荷试验结果和其周边土的承载力特征值结合经验确定。

注：

当桩长较长时，由于荷载板宽度较小，单桩复合地基载荷试验不能完全反映复合地基的承载特性，必要时应进行多桩复合地基载荷试验确定。有地区经验时也可采用单桩载荷试验结果和其周边土承载力特征值结合经验确定。

11.3.4 桩基布置位置应有利于隧道主体结构的受力，并宜符合下列规定：

- a) 敞开段宜沿底板均匀布置，暗埋段宜沿结构侧墙及中隔墙底部均匀布置。
- b) 隧道纵向桩间距宜按相同间距均匀布置，并通过桩长的变化来调整各分段总抗浮力。

注：

桩基沿结构侧墙及中隔墙底部均匀布置传力体系明确，可有效避免结构底板局部剪力过大。

11.4 隧道结构

11.4.1 围堰法隧道的结构形式应根据隧道跨度、覆盖层厚度、地质条件及使用功能确定，可采用矩形结构、拱形结构、单孔结构及多孔结构等，并宜符合下列规定：

- a) 可采用整体式现浇钢筋混凝土结构或装配式钢筋混凝土结构，当结构受力较大时，可采用预应力钢筋混凝土结构；
- b) 对于覆土较薄的隧道结构，宜采用矩形断面；当隧道覆土在 5m 以上，且跨度较大时，可考虑采用拱形断面；
- c) 双向行车时，宜采用双孔结构，当车道较多及兼具行人或市政管廊功能时，可根据功能分区采用多孔结构。

注：

围堰法修建的隧道可选用现浇或装配式钢筋混凝土结构，装配式结构具有工业化程度高、施工速度快等优点，构件在现场连接成整体，以利于防水、抗震，并提高隧道抵抗纵向不均匀沉降能力，施工不受低温天气影响。当隧道跨度大、覆土深、水压高等受力较大的情况下，还可考虑采用预应力混凝土结构，以改善结构受力性能。矩形断面由于施工方便、工艺成熟、断面利用率高，在确定结构断面方案时，宜优先选用。当覆土较厚且跨度较大时，由于拱形断面具有较优的受力性能，宜考虑采用拱形断面。一般城市道路双向行车宜采用双孔结构，当有市政管线及行人要求时，还应对面进行功能划分，采用多孔结构。

11.4.2 主体结构侧墙可采用单一墙、叠合墙及复合墙等形式。对外观或防水要求较低且能满足耐久性要求时可采用单一墙，围护墙直接作为主体结构侧墙。对外观或防水要求较高时，结合结构使用、受力、防水及耐久性等要求，宜选用叠合墙或复合墙，围护墙宜作为主体结构侧墙的一部分与内衬墙共同受力。

注：

侧墙形式对工程投资、结构受力、施工和使用等较大的影响，应结合使用要求、围护结构的形式、工程地质与水文地质条件及场地条件等通过技术经济比较确定。围堰法隧道主体结构的侧墙与基坑支护结构的关系一般可分为以下三种：

(1) 单一墙：围护墙直接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，且槽段之间的接头需做特殊处理，一般施工时可采用柔性防水接头。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。

(2) 叠合墙：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有钢筋接驳器联结，通过结构和施工措施，保证叠合面的剪力传递。叠合后可把二者视为整体墙，但防水层难以形成连续密封整体，其围护墙也多采用地下连续墙。

(3) 复合墙：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。围护结构可采用地下连续墙、钻孔灌注桩或人工挖孔桩等。

11.4.3 隧道抗浮可用压重、压顶梁、抗拔桩及抗浮锚桩等措施。隧道底部设置桩基时，应考虑桩基与结构的相互作用。

注：

抗浮力随施工过程及使用阶段不断变化，施工期间，由于静荷载尚未全部作用在结构上，需注意其抗浮稳定性。抗浮措施可分为消除浮力和抵抗浮力两大类。

11.4.4 隧道结构在荷载、结构形式和工程地质等条件发生显著改变的部位设置变形缝时，应采取工程技术措施控制变形缝两侧不产生影响使用的差异沉降。

11.4.5 地下水较丰富时，围护结构宜选用地下连续墙或钢板桩等具有防水能力的围护形式；选用钻孔灌注桩或 SMW 工法桩时，接缝处宜采取防水措施。

注：

采用地下连续墙作为围护墙时，墙幅间接缝一般需避开拐角部位，同时墙幅间接缝采用可靠的防水接头，可以有效提高连续墙的防水性能。单一墙、叠合墙、复合墙的防水性能不同，设计主体结构的防水方案时，需要有针对性的采取防水措施。

11.5 结构防水及回填

11.5.1 围堰法隧道主体结构的防水等级应根据结构重要性和设计使用年限，按现行国家标准《地下工程防水技术规范》（GB 50108）采用二级防水标准。

11.5.2 隧道主体结构宜按照全封闭不排水的原则设计，防水体系由混凝土自防水为主，以接缝防水为重点，并辅以附加防水层加强防水。

注：

防水设防要求应结合使用功能、设计使用年限、水文条件、结构形式、环境因素及施工方法综合确定。

11.5.3 中等以上腐蚀环境中的隧道混凝土外防水层的选用与设置应符合如下规定：

a) 在迎水面或复合式衬砌之间宜设置全包柔性外防水层，并根据顶、底板防水层的特性考虑保护措施；

b) 当耐久性设计中考虑设置防腐蚀层时，外防水层的设计应与防腐蚀层相结合。

注：

中等以上腐蚀环境会对结构产生较为严重的危害，因此迎水面或复合式衬砌之间宜采取设置全包柔性防水层措施，以隔绝腐蚀环境对结构耐久性的影响。

11.5.4 防水混凝土结构底板下应设置混凝土垫层，强度等级不应低于 C20，厚度不应小于 150mm，在软弱土层中不应小于 200mm。

11.5.5 隧道主体结构外部防水层宜以防水涂料、防水卷材、塑料防水板为主，特殊部位或有特殊环境要求时也可采用金属防水板、膨润土防水毯等。防水材料优先选用能与混凝土直

接粘结，且具有良好施工性能的柔性防水材料。

注：

附加防水层设置于隧道结构外侧，在铺设防水层前，结构外表面一般采用水泥砂浆进行找平，结合主体结构的施工特点，结构底板、侧墙防水卷材可采用预铺法施工，顶板可采用后铺法施工。

11.5.6 防水混凝土应连续浇筑，宜少留施工缝。留施工缝时应符合下列规定：

- a) 墙体水平施工缝不应留在剪力最大处或底板与侧墙的交接处；
- b) 垂直施工缝应避开地下水和裂隙水较多的地段，并宜与变形缝相结合。

11.5.7 隧道两侧及顶部回填应考虑水流速度、水深、水流冲刷、航运要求、结构抗浮、地震作用等因素，并宜符合下列规定：

- a) 隧道施工完成后，应进行基坑回填，回填之前需明确水域是否通航，一般回填至原河（海）床面；
- b) 回填材料可采用土石分层回填，压实度不宜小于 90%；
- c) 当水流冲刷较大时，顶部回填可采用大重量块石、浆砌片石或混凝土铺砌。
- d) 顶部保护层应满足使用年限最大冲刷要求；
- e) 回填覆盖后，运营期隧道抗浮安全系数不宜小于 1.15。

注：

回填设计时应考虑防冲刷、防锚、防沉船冲击等能力，回填料自身应具有良好的排水能力，避免回填部分形成抗地震液化薄弱区。隧道主体结构两侧底层可回填砂石反滤层，应具有良好的排水能力。中层可采用碎石回填至结构顶。顶部保护层可采用一定级配的片石，应具有较高的密度。片石保护层上部，采用一般回填，回填料可采用原开挖沙土或海沙，片石保护层与结构顶板外侧之间应设置 0.15m 的防锚层。回填原则：纵向分段、断面分层，分段回填，结构两侧依次从底层向上回填。

11.6 构造要求

11.6.1 围堰法隧道两岸接线段变形缝的设置应符合下列规定：

- a) 暗埋段结构变形缝间距宜为 60m，宜设于结构断面变化处、地面覆土变化较大处、地基强度差异明显等可能产生较大差异沉降的地方，变形缝宽度宜为 20mm；
- b) 敞开段结构变形缝间距宜为 30m，变形缝宽度宜为 20mm；
- c) 在软弱地层中，变形缝处宜在顶、底板和侧墙采取抗剪措施，如顶板和边墙设置剪力杆，底板设置凹凸榫，防止缝两侧的结构发生竖向错动，减小变形缝两侧结构的差异沉降。

11.6.2 围堰法隧道施工缝的设置应符合下列规定：

- a) 隧道环向施工缝间距宜为 12~15m，应尽量留在剪力较小且便于施工的部位，并兼顾内部设施的完整性（避让较大孔洞及横向框架），环向施工缝宜与变形缝或后浇带相结合；
- b) 纵向施工缝宜设在结构顶、中、底板加腋以外不小于 300mm 处。墙体有预留孔洞时，施工缝距孔洞边缘不宜小于 300mm；
- c) 施工缝间各结构段的混凝土宜间隔浇注。

11.6.3 矩形隧道结构顶、底板与侧墙连接处宜设置腋角，腋角的边宽不宜小于 150mm，内配置八字斜筋的直径宜与侧墙的受力筋相同。

12 机电系统

12.1 一般规定

12.1.1 隧道应根据施工工法、环境条件、交通状况及运营管理等因素，配置合理的通风、

给排水、消防、供配电、照明、监控及火灾报警等机电系统设施。

12.1.2 隧道总体布置、附属用房、机电系统设施等设置应满足水下隧道正常运营、维护管养、防灾救援等综合需要。

12.1.3 隧道应选用技术先进、工艺成熟、安全可靠、经济合理、节能环保的机电设备，并应满足防尘、防潮、防腐蚀、防雷等要求。

12.2 通风系统

12.2.1 隧道的通风设计应综合考虑道路等级、工程规模、预测交通量及交通组成、车辆有害气体排放量、道路平纵断面线形、环境保护、烟气控制和运营维护等因素。

12.2.2 隧道通风系统在正常工况及交通阻塞时，应能稀释或排除隧道内 CO、烟尘、NO_x 等污染物；火灾工况时，应能控制并迅速排除烟气；隧道内养护维修时，应能提供必要的通风措施。

12.2.3 隧道内部环境标准应符合下列规定：

- a) CO 和烟尘设计浓度，应满足表 24 中的规定。

表 24 CO、NO₂ 和烟尘设计浓度

车速 (km/h) 或交通状况	CO (ppm)	NO ₂ (ppm)	烟尘设计浓度
			消光系数 K (10 ⁻³ /m)
正常高峰交通 (>50)	70	1 (<20min)	5
50≥v>30	70	1 (<20min)	7
≤30	90	1 (<20min)	9
隧道养护 (运营中)	20	0.12	3
关闭隧道	200	—	12

b) 交通阻滞工况按各车道平均车速为 10km/h，长度不大于 1km，其余路段车速可取 30km/h。

注：

本条结合世界道路协会 D.5 技术委员会 (PIARC) 2019 年技术报告、《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02-2014) 等提出隧道内污染物设计浓度的相关标准。

12.2.4 隧道通风换气应符合下列规定：

- a) 隧道内空间不间断换气次数不应小于 3 次/h；
b) 当采用纵向通风时，换气风速不应低于 2.5m/s。

12.2.5 隧道设计纵向风速不宜大于 10m/s，特殊情况时不应大于 12m/s。

12.2.6 单向交通隧道通风方案的选取应符合下列规定：

a) 长度不大于 500m 且仅限通行非危险化学品等机动车辆的城市道路水下隧道可采用自然通风方式；

b) 长度不大于 3000m 的单洞单向交通隧道宜采用纵向通风排烟方式，交通量较大且容易发生阻塞时，可采用重点排烟方式；

c) 长度大于 3000m 的隧道，宜采用分段纵向通风排烟方式或重点排烟方式。

12.2.7 单洞双向交通隧道，运营通风方案根据工程方案、环境条件及交通量预测等因素选定，隧道内火灾时宜采用重点排烟方式。

12.2.8 隧道洞口污染物排放应满足《环境空气质量标准》(GB 3095) 及环境影响报告的相关要求；如洞口污染物排放预测无法达标，应根据隧道两岸建设条件、景观绿化及用地规划等因素进行分析，综合比选高风塔排放、机械式分散排放或空气除尘净化方案。

12.2.9 隧道内稀释 CO、NO₂ 及烟尘需风量计算可分别按公式 (12.2.9) 进行计算, 隧道入口新风应考虑洞口环境空气本底浓度的影响。

$$V = \sum (n_{\text{veh}} \cdot Q_v) \cdot \frac{1}{C_{\text{adm}} - C_{\text{amb}}} \quad (12.2.9)$$

式中: V——需风量 (m³/h);

n_{veh} ——隧道内各类型车辆数量;

Q_v ——隧道内各类车型 CO、NO₂ 排放量[g/(h · veh)], 颗粒物单车产生量[m²/(h · veh)];

C_{adm} ——隧道内污染物设计浓度 (g/m³);

C_{amb} ——隧道入口新风环境浓度 (g/m³)。

计算稀释烟雾需风量时, 将 $C_{\text{adm}} - C_{\text{amb}}$ 替换为烟尘设计浓度 K_{adm} (m⁻¹)。

12.2.10 隧道内各类车型有害气体排放量按公式 (12.2.10) 计算:

$$Q_v = q_{\text{ex}}(v, i) \cdot f_h \cdot f_t \cdot f_e \cdot f_m + q_{\text{ne}}(v) \quad (12.2.10)$$

式中: Q_v ——隧道内各类车型 CO、NO₂ 排放量[g/(h · veh)], 颗粒物单车产生量[m²/(h · veh)];

$q_{\text{ex}}(v, i)$ ——各类车 CO、NO₂ 基准排放量[g/(h · veh)]和颗粒物基准排放量[m²/(h · veh)];

f_h ——海拔修正系数, 按附录 B 取值;

f_t ——年限修正系数, 按附录 B 取值;

f_e ——区域修正系数, 按附录 B 取值;

f_m ——质量修正系数, 按附录 B 取值;

$q_{\text{ne}}(v)$ ——非排放颗粒物, 其他污染物计算值为零[m²/(h · veh)], 按附录 B 取值。

注:

城市水下道路隧道交通组成中小客车的占比较高, 根据对隧道污染物排放情况的调研, 隧道内外污染物浓度较低, 但由于缺少国内城市道路机动车尾排中有害气体及烟尘基准排放量的基础数据, 隧道需风量计算参考 PIARC 2019 年技术报告中的方法进行计算。不同之处在于, 本规范采用了区域系数修正。目前国内已经实行较为严格的国 VI 标准, 但鉴于我国城市道路水下隧道覆盖区域较广, 为保守起见, 采取此方式进行计算。

12.2.11 隧道进出口含有多匝道或与其他隧道互通匝道, 宜采用通风网络计算方法计算匝道、主线等风量分配及污染物分布情况。

12.2.12 隧道通风阻力计算时, 应充分考虑水下隧道纵坡、隧道曲线及匝道分合流对隧道沿程阻力系统 λ_r 的影响。

12.2.13 射流风机的布置应符合下列规定:

a) 射流风机距离洞口布置间距不宜大于 100m, 同组射流风机中心间距不应小于风机直径的 2 倍;

b) 射流风机不应侵入隧道建筑限界, 风机边沿与隧道建筑限界的净距不宜小于 150mm;

c) 射流风机安装空间紧张时, 可采用隧道顶部结构局部抬高, 或横向结构扩挖的壁龛方式, 风机进出口两侧导流墙与隧道纵向轴线夹角不宜大于 15°, 射流风机进出口两侧壁龛直线段长度不应小于风机纵向中心线距离结构壁面的 1.5 倍;

d) 支承风机的结构承载力不应小于风机实际静荷载的 15 倍, 风机安装前应进行支承结构的荷载试验;

e) 射流风机在隧道分岔位置布置时, 应充分考虑该区域的气流流场分布, 保证隧道分岔位置气流组织合理。

12.2.14 隧道风机房的布置应结合施工工法、结构安全及地面环境等因素综合考虑。风机房的布局应能满足风机及其配套设施运输、安装及检修要求。

12.2.15 隧道轴流风机的布置、选型及安装应符合下列规定:

- a) 轴流风机并联运行时,不宜大于3台,并联运行风机型号和性能参数应保持一致;
- b) 轴流风机选型应根据风机性能参数、风道摩擦阻力和风机全压效率等验算确定;
- c) 大型轴流风机上方应设置吊装滑轮或电动葫芦等。

12.2.16 附属设备用房通风空调设计应符合下列规定:

- a) 附属设备用房应按照去除室内余热、余湿及换气要求设置通风系统;当变电所、控制室等电气房间余热、余湿量较大时,可设置空调或除湿系统;
- b) 当设置空调系统时,新风量每人不应少于 $30\text{m}^3/\text{h}$ 。

12.3 给水系统

12.3.1 隧道给水设计应满足工程对水量、水质、水压的要求,做到安全可靠、技术先进、经济合理、节水节能、管理方便。

12.3.2 给水系统用水量定额应符合下列规定:

- a) 工作人员生活用水定额最高日应为 $30\sim 50\text{L}/\text{人}\cdot\text{班}$,平均日应为 $25\sim 40\text{L}/\text{人}\cdot\text{班}$,最高日小时变化系数 $1.5\sim 1.2$;
- b) 隧道各附属建筑物用水定额,应符合现行国家标准《建筑给水排水设计规范》(GB 50015)的有关规定;
- c) 隧道内宜采用隧道专用冲洗车,冲洗水量根据喷洒面积按 $2.0\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})\sim 3.0\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 计算。

12.3.3 给水系统应符合下列规定:

- a) 应充分利用城市给水管网的水压直接供水;
- b) 不同使用性质或计费的给水系统,应在引入管后分成各自独立的给水管网,水下隧道应采用生产、生活和消防分开的给水系统;
- c) 寒冷地区,给水管道应有防冻措施。

12.3.4 给水系统管道布置和敷设应符合下列规定:

- a) 隧道两端室外宜设置室外加水栓;
- b) 隧道外埋地的给水管道管材,应具有耐腐蚀和承受相应地面荷载的要求。

12.4 排水系统

12.4.1 排水系统的选择应根据雨、废水的性质,并结合市政排水体制确定。

12.4.2 隧道雨水系统设计应与区域排水系统相协调,并满足城市排涝除险措施。

12.4.3 雨水系统设计应采取工程性和非工程性措施加强城市隧道应对超过内涝防治设计重现期降雨的韧性,并应完善必要应急措施。

12.4.4 排水量标准应符合下列规定:

- a) 冲洗水量和消防废水量应与其用水量相当;
- b) 城市地下道路敞开段的暴雨重现期不应小于50年,集流时间宜为 $5\text{min}\sim 10\text{min}$;
- c) 结构渗漏水排水按实际发生计;
- d) 钻爆法水下隧道结构渗水量应根据隧道的地质条件、环境条件、防排水措施、施工水平等综合确定。

注:

关于钻爆法水下隧道控制排水标准,挪威海底隧道规范规定允许的渗水量为 $300\text{L}/\text{km}\cdot\text{min}$,即 $0.432\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{d}$,而目前国内尚无明确的规范规定。但水下隧道钻爆段水量的控制排放标准是一个十分重要的指标,过严格的控制排放标准将使辅助施工措施费用大大增加,过低的控制标准将使大量的地下水进入隧道,运营成本大大增加。通过对国内外钻爆法水下隧道排水量的调研,得到目前国内外钻爆法或组合工法钻爆

段水下隧道工程的渗水量情况大部分已建工程排水量集中在 $0.1 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{d}$ ~ $1.0 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{d}$ 这样一个区间范围。

12.4.5 排水系统应符合下列规定：

- a) 隧道宜采用高水高排、低水低排互不连通的系统就近排放；
- b) 隧道排水设计应分类集中，雨水系统应设置避免客水进入隧道措施，集中排除敞口段汇水面积的地面径流水；冲洗废水、结构渗漏水 and 消防废水应集中合并排放；
- c) 隧道排水应设置独立的排水系统，并防止倒灌。当没有条件设置独立排水系统时，受纳排水系统应能满足地区和隧道排水流量要求；
- d) 隧道排水系统应考虑施工、运营期间的可维护性；
- e) 废水泵房应根据条件考虑永临结合。

12.4.6 排水泵房应符合下列规定：

- a) 排水系统宜采用强排措施，并宜在管道出口采取防倒灌措施；
- b) 隧道排水泵房宜设置两个出入口，其中一个能满足最大设备或部件的进出；
- c) 排水泵房室内地坪应比室外地坪高 $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ ；
- d) 隧道雨、废泵房供电应按一级负荷设计。局部泵站按二级负荷设计；
- e) 排水泵站应采用自灌式泵站；
- f) 水下隧道废水泵房的位置应根据隧道纵断面布置确定。最低点废水泵房宜采用一次性提升，当确有困难时，可采用逐级提升、接力排出；
- g) 水域环境下的泵站，应采用耐腐蚀水泵及零配件，海域环境废水泵站宜采用双相不锈钢材质水泵或者牺牲阳极保护法增加水泵的耐腐蚀性。

注：

水下隧道一般埋深较大，排水系统需采用强排措施，废水泵站的提升方式应综合土建要求、水泵的选型、能耗、运维等各方面因素。当隧道埋深较浅可以采用一次性提升，当埋深较深应进行方案的综合比选后确定。

12.4.7 排水泵房排水设备应符合下列规定：

- a) 雨水泵房应设置备用泵，并宜设置旱季泵；
- b) 主废水泵房应设置备用泵，排水能力应按消防最大排水量和结构渗水量之和计算确定，水泵扬水管不应少于两条，废水泵宜选用单级潜水排污泵，当采用多级潜水泵时，集水池前宜设置水处理设施，满足潜水泵对水质的要求；
- c) 选用的水泵在设计扬程时宜在高效区运行，2 台以上水泵并联运行合用一根出水管时，应根据水泵特性曲线和管路工作特性曲线验算单台水泵工况。

12.4.8 排水泵房集水池应符合下列规定：

- a) 雨水泵房集水池有效容积不应小于最大一台泵 10-15min 的出水量；
- b) 流入集水池的污水和雨水均应通过格栅，集水池应设置冲洗装置；
- c) 沉管法隧道主废水泵房集水池应避开沉管段接缝位置，并满足水泵的安装的要求，其有效容积不应该小于最大一台水泵 15min 的出水量；
- d) 钻爆法水下隧道主废水泵房应设检修通道，集水池宜与正洞隔离；集水池应具有一定的安全储备容积。储备容积应满足泵房设备事故情况下更换，抢修，电力恢复等所需时间内的结构渗水量的存储需要，且储备容积不应小于 24h 内结构渗水量的总和确定；
- e) 盾构法隧道工作井应设废水泵房。最低点废水泵房集水池应满足检修的要求，工作井及最低废水泵房集水池有效容积不应该小于最大一台水泵 15min 的出水量。

注：

钻爆法水下隧道的结构渗水量较大，国内关于其排水量的技术研究较少，每天排水量可达上千甚至上万方，目前国内的海底泵房集水池容积在满足国家标准和各自行业标准的的要求下，均考虑了一定规模的储备容积，用于特定情况下的安全储备。挪威海底隧道规范规定，其容积要能容下 24h。

12.4.9 排水设备控制与监测应符合下列规定：

- a) 排水设备应设有基本、就地和远控三种控制方式；
- b) 隧道应设置地面积水深度标尺、标识线和提醒标语等警示标识，宜设置水位监测预警系统；
- c) 钻爆法水下隧道废水排水管网宜设置流量监测装置。

注：

2 水位监测预警系统通过人工智能、云计算和边缘计算等新型技术对隧道积水点水位、现场图像等要素进行实施监测，并以积水点为中心，建立集监测、预警、警告于一体的防汛管控体系及交通诱导系统，在广州市的既有隧道中有推广安装。

3 钻爆法水下隧道结构渗水量较大，为了便于运营的管理和监测建议在排水管上设置流量监测装置。

12.4.10 隧道内排水收集系统应符合下列规定：

- a) 隧道接地段处应设置驼峰，驼峰高度不小于 500mm，接地段附近应设置横截沟，将客水排出隧道外；
- b) 隧道洞口应设置横截沟，且不宜少于 2 道，并将雨水排至雨水泵房；
- c) 隧道最低点应设置横截沟，并将废水排至废水泵房；
- d) 隧道应设置纵向排水沟，以排除结构渗水、雨水、冲洗水和灭火时的消防水，排水沟坡度与路面纵坡坡度一致；
- e) 隧道横截沟和纵向沟盖板应保证车辆和行人安全，并满足清淤要求。

12.4.11 隧道内排水管道的布置、选型应符合下列规定：

- a) 排水管材应满足现行国家和行业标准，应根据土壤和水下腐蚀性等因素确定管材材质防腐措施。海域环境下，排水管材宜采用无缝钢管做管基的环氧复合管、衬塑钢管等；泵房内排水管材宜采用 316L 不锈钢钢管等；
- b) 排水管道在穿越结构变形缝、施工缝时应设置补偿管道伸缩和剪切的装置；
- c) 寒冷地区，排水管道应有防冻措施。

注：

经过调研，部分海域环境下地铁区间排水管道采用内外涂环氧复合钢管渗漏严重，有明显腐蚀。采用内外涂环氧复合钢管和缩合式衬塑钢管整体运行状态良好，因此建议海域环境下采用不锈钢钢管为管基的管材。

316 不锈钢管材具有自身防腐特性，无需涂层，能够耐海洋环境腐蚀；可切割、焊接、维护方便；承压性能好。但价格昂贵，一般仅在泵房等关键部位使用。现在在翔安隧道、厦门地铁 2 号线过海区间隧道、厦门地铁 3 号线过海区间隧道泵房内等均有采用，整体运行情况良好。

12.5 照明系统

12.5.1 隧道照明可划分为入口段照明、过渡段照明、中间段照明、出口段照明、敞开段照明。

12.5.2 隧道照明应根据行车速度和交通量确定其设计标准，隧道照明中间段亮度标准值应符合表 25 的规定。

表 25 隧道照明中间段亮度标准值

设计速度 (km/h)	L _{in} (cd/m ²)			
	单向交通		双向交通	
	N≥1200veh/(h.ln)	N≤350veh/(h.ln)	N≥650veh/(h.ln)	N≤180veh/(h.ln)
100	9	4	9	4
80	4.5	2	4.5	2

60	2.5	1.5	2.5	1.5
40	1.5	1.5	1.5	1.5

注：veh/(h.ln)为混合车型设计高峰小时每车道交通量；当交通量在中间值时，亮度标准值按线性内插取值。

注：

隧道中间段亮度标准值参考了《城市道路交通设施设计规范（2019年版）》（GB 50688-2011），与山岭隧道照明设计相比，亮度标准值适当提高。

12.5.3 隧道入口段照明、过渡段照明和出口段照明亮度标准值应满足现行《公路隧道照明设计细则》（JTG/TD70/2-01）的相关规定。

12.5.4 隧道敞开段照明亮度标准值宜与接线道路照明亮度标准值一致。隧道洞口接近段宜采用设置遮光棚等减光措施。

12.5.5 隧道内交通分流段、合流段的亮度不宜低于中间段亮度的3倍。

12.5.6 人行、车行横通道亮度不应低于1.0cd/m²。

12.5.7 隧道照明控制设计应实现正常和异常交通工况的控制功能。隧道照明控制设计宜采用智能控制或自动控制为主、手动控制为辅的控制方式。

12.5.8 隧道照明灯具宜选用LED灯，灯具防护等级不应低于IP65，灯具外壳应采用防腐材料。

12.5.9 隧道照明LED灯具一般显色指数不应小于60，且额定相关色温不宜大于5000K。隧道照明LED灯具应采取措施抑制眩光，避免对安全和视觉舒适性造成干扰。

12.6 供配电系统

12.6.1 外部电源工程设计应兼顾施工临时用电与运营永久用电需求。

注：

施工临时用电与运营永久用电统筹考虑，做到10kV、20kV或35kV外部电源一次建设到位，减少不必要的重复建设。

12.6.2 隧道用电负荷分级应根据对供电可靠性的要求及中断供电所造成的损失或影响程度确定。城市道路水下隧道用电负荷分级应符合表26的规定。

表 26 隧道用电负荷分级

序号	负荷名称	负荷等级
1	应急照明、电光标志、交通监控设施、通风及照明控制设施、紧急呼叫设施、火灾检测与报警设施、中央控制设施、变电所操作电源等	一级负荷中的特别重要负荷
2	消防水泵、雨水泵、废水泵、排烟风机、隧道基本照明等	一级负荷
3	隧道加强照明、隧道设备机房及管理用房内的正常照明等	二级负荷
4	隧道检修电源等	三级负荷

12.6.3 隧道供电设计应符合下列规定：

- a) 一级负荷应由双重电源供电，当一个电源发生故障时，另一个电源不应同时受到损坏；
- b) 对于一级负荷中的特别重要负荷，除双重电源供电外，尚应增设应急电源供电；应

急电源供电回路应自成系统，且不得将其他负荷接入应急供电回路；应急电源的切换时间，应满足设备允许中断供电的要求；应急电源的供电时间，应满足用电设备最长持续运行时间的要求；

c) 二级负荷的外部电源进线宜由 35kV、20kV 或 10kV 双回线路供电。当隧道由一路 35kV、20kV 或 10kV 电源供电时，二级负荷可由两台变压器各引一路低压回路在负荷端配电箱处切换供电。当隧道由双重电源供电，且两台变压器低压侧设有母联开关时，二级负荷可由任一段低压母线单回路供电；

d) 三级负荷可采用单电源单回路供电。

12.6.4 隧道变电所位置宜接近负荷中心；不应设在地势低洼和可能积水的场所。

注：

当在隧道内部设置变电所时，变电所的所址不应设在线路最低点位置。

12.6.5 设置中央控制管理设施的隧道宜设置电力监控系统。

12.6.6 隧道供电系统的继电保护和自动装置应满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性的要求，并应符合下列规定：

a) 继电保护和自动装置应具有自动在线检测、闭锁和装置异常或故障报警功能；

b) 对相邻设备和线路有配合要求时，上下两级之间的灵敏系数和动作时间应相互配合；

c) 当被保护设备和线路在保护范围内发生故障时，应具有必要的灵敏系数；

d) 保护装置应能尽快地切除短路故障。当需要加速切除短路故障时，可允许保护装置无选择性地动作，但应利用自动重合闸或备用电源和备用设备的自动投入装置缩小停电范围。

12.6.7 隧道内配电箱（柜）的防护等级应不低于 IP55，并满足防腐蚀要求。

12.6.8 隧道内的电线和电缆应选用低烟、无卤阻燃型。隧道内消防用电设备的配电线路应采用耐火电缆或矿物绝缘电缆，并满足消防用电设备火灾发生期间最少持续供电时间的需要。耐火电缆和矿物绝缘电缆应具有不低于 B1 级的难燃性能。

12.6.9 隧道内低压配电系统接地方式宜采用 TN-S。

12.7 弱电系统

12.7.1 附属用房设施设计应符合下列规定：

a) 特长、长隧道宜设置运营管理中心，中、短隧道可纳入城市监控及应急事件管理；

b) 运营管理中心宜设置在城市道路水下隧道引道出入口附近，并应符合日常维护管理及应急处置要求；

c) 运营管理中心应符合交通管理、电力供给、防灾报警、设备监控，以及应急处理和全线信息的集散与交换等的要求；

d) 位置较近的多条城市道路水下隧道宜集中布置运营管理中心，监控系统设备应同时满足多条城市道路水下隧道的总体监控功能、运营管理需求以及可靠性要求；救援线路长度和救援时间应控制在合理范围内，并应满足应急救援要求；

e) 运营管理中心建筑应符合节约用地、布局实用、功能明确、规模合理、与周围环境相协调、独立进出的要求。

12.7.2 交通监控设施设计应符合下列规定：

a) 隧道交通监控设施设计内容应包括交通监测设施、交通控制及诱导设施的设计，交通监控设施应使管理者能及时掌握交通信息，有效地管理交通；

b) 交通监测设施应具备检测隧道内交通信息、车辆运行状况，监视隧道交通运营状态的功能；

c) 交通控制及诱导设施应具备收集和处理交通信息，并传送给中央控制室计算机，同时接收中央控制室计算机传来的有关信息或指令，实现交通控制与诱导的功能；

d) 交通监控设施的设备及设置间距要求应符合现行《公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施》(JTG D70/2)及《城市地下道路工程设计规范》(CJJ221)的规定。

12.7.3 紧急呼叫及广播设施设计应符合下列规定:

a) 设计内容应包括紧急电话设施和隧道广播设施的设计,紧急呼叫设施应为隧道管理提供快捷的紧急呼叫功能;

b) 紧急电话及隧道广播设施的设计原则应符合现行《公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施》(JTG D70/2)及《城市地下道路工程设计规范》(CJJ221)的规定。

12.7.4 无线通讯设施设计应符合下列规定:

a) 城市道路水下中、短隧道宜设置无线通信系统,城市道路水下长、特长隧道应设置无线通信系统;

b) 公安及消防用无线信号的设备及传输网络宜单独设置;

c) 民用移动通信信号由运营商自行设置。

注:

2 公安及消防用无线信号的设置宜根据当地政策有针对性的设置。部分城市现已规定公安及消防用的无线信号使用专用传输通道将信号直接传至就近的交警大队或交警部门。

3 前期与民用移动通信信号对接设置的需求及要求,在设计时预留设备的安装位置及设备所需的供电回路,施工时设备的安装由运营商自行完成。

12.7.5 火灾探测报警设施设计应符合下列规定:

a) 火灾探测报警设施设计内容应包括报警区域和探测区域的划分、火灾探测器、手动报警按钮、火灾报警控制器、火灾声光报警器的设计等;

b) 城市道路水下超长、特长、长隧道应同时采用线型光纤感温火灾探测器和点型红外火焰探测器(或图像型火灾探测器);其他隧道应根据自身条件采用至少一种火灾探测器。火灾探测器的设计原则应符合《火灾自动报警系统设计规范》(GB 50016)的规定;

c) 设置火灾探测器且未设置有线广播的隧道应设置火灾声光报警器;同时设置火灾探测器和有线广播的隧道宜设置火灾声光报警器;

d) 火灾探测报警系统应设有交流电源和蓄电池备用电源。蓄电池备用电源宜采用专用蓄电池或集中设置的蓄电池,其电池维持供电时间不应小于 3h。采用集中设置的蓄电池时,火灾报警控制器应采用单独的供电回路,并应保证在系统处于最大负载状态下不影响火灾报警控制器的正常工作。

注:

2 隧道内图像型火灾探测器的设置可为单独系统或由视频监控系统所设置的隧道内固定摄像机兼作为火灾的图像型火灾探测器。当由隧道内的固定摄像机兼作时,需兼顾规范对摄像机设置间距的要求,直线段设置间距不应超过 100m,曲线段设置间距可根据实际视距进行调整,保证摄像机在隧道内无盲区覆盖。

12.7.6 隧道标志设施设计应符合下列规定:

a) 城市道路水下隧道隧道标志设施的设计内容应包括紧急电话指示标志、消防设备指示标志、人行横通道指示标志、车行横通道指示标志、紧急停车带标志;

b) 隧道标志设施的设计原则应符合现行《公路隧道交通工程设计规范》(JTG/T D71)、《公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施》(JTG D70/2)及《城市地下道路工程设计规范》(CJJ221)的规定。

12.7.7 UPS 供电设施设计应符合下列规定:

a) 附属用房设施、交通监控设施、设备监控设施、紧急呼叫设施、无线通讯设施、火灾探测报警设施、隧道标志设施应为特别重要负荷;

b) 特别重要负荷由两路独立电源供电的同时应设置不间断电源(UPS)作为应急电源。不间断电源(UPS)的供电时间应按照 60min 考虑。

13 消防安全与应急疏散

13.1 一般规定

13.1.1 隧道的防灾疏散设计应按隧道全线同一时间内发生一次火灾考虑。

注：

城市地下道路车道孔内一般不能设置防火分隔设施，因此，可将一个车道孔视为一个防火分区。地下道路车道孔发生火灾时，这条车道孔、相邻车道孔均要参与疏散与救援，因而地下道路原则上仅有应对一次火灾的能力。同时也是根据我国公路隧道建设与运营经验，并参照我国建筑、地铁及国外相关标准的要求确定的。如《建筑设计防火规范》(GB50016--2006)中有“消防用水量应按其火灾延续时间和隧道全线同一时间内发生一次火灾，经计算确定.....”的类似规定。

13.1.2 隧道在防灾设计时需要考虑交通阻滞，阻滞长度可根据隧道长度进行考虑，当隧道长度 $L \leq 1000\text{m}$ 时，阻滞长度等于隧道长度，当隧道长度 $> 1000\text{m}$ 时，阻滞长度可按 1000m 进行设置。

13.1.3 隧道禁止通行危险化学品等机动车。

13.1.4 消防设施应根据隧道类型、隧道形式、隧道功能定位和防火等级进行选择，并对全线消防设施进行集中监控与联动。

13.1.5 隧道需要结合隧道交通功能、交通流量及车型比例，确定火灾热释放速率，火灾热释放速率可按表 27 进行取值。

表 27 火灾热释放速率

车辆类型	小轿车	货车	公共汽车	重型车
火灾热释放速率（MW）	3~5	20~30	20~30	30~50

注：

在城市地下道路防火设计中，应根据地下道路等级、通行车辆构成以及车种比例，确定一个合适的车辆火灾热释放率，作为防灾设计依据。世界各国对车辆火灾热释放功率规定不一，本条主要参考《城市地下道路工程设计规范》CJJ221 规定。

13.1.6 长度 $L \geq 500\text{m}$ 的城市道路水下隧道应设置火灾机械防烟与排烟系统。

13.2 隧道及其附属设施防火

13.2.1 城市单孔和双孔隧道应按其封闭段长度和交通情况分为一、二、三、四类，并应符合表 28 的规定。

表 28 单孔和双孔隧道分类

用途	一类	二类	三类	四类
	隧道段长度 L （m）			
可通行危险化学品等机动车	$L > 1500$	$1500 \geq L > 500$	$500 \geq L$	-
仅限通行非危险化学品等机动车	$L > 3000$	$3000 \geq L > 1500$	$1500 \geq L > 500$	$500 \geq L$
仅限人行或通行非机动车	-	-	$L > 1500$	$1500 \geq L$

13.2.2 隧道行车道、电缆廊道及横通道承重结构体耐火极限不应低于表 29 的规定，特长、长隧道承重结构体耐火极限应采用 RABT 标准升温曲线，中、短隧道承载结构体的耐火极限应采用 HC 标准升温曲线。

表 29 隧道承重结构体耐火极限要求

隧道长度（m）	>3000	3000≥L>1000	1000≥L>500	L≤500
测试升温曲线	RABT		HC	
耐火极限（h）	2.00	2.00	2.00	2.00

注：

表 13.2.2 内容参考《公路水下隧道设计规范》JTG D71 及《道路隧道设计规范》DG-TJ08-2033 防火设计相关条文。

隧道结构一旦受到破坏，特别是发生坍塌时，其修复难度非常大，花费也大。同时，火灾条件下的隧道结构安全，是保证火灾时灭火救援和火灾后隧道尽快修复使用的重要条件。不同隧道可能的火灾规模与持续时间有所差异。目前，各国以建筑构件为对象的标准耐火试验，均以 ISO 834 的标准升温曲线（纤维质类）为基础，该标准升温曲线以常规工业与民用建筑物内的材料的燃烧特性为基础，模拟了地面开放空间火灾的发展状况，但这一模型不适用于石油化工工程中的有些火灾，也不适用于常见的隧道火灾。

隧道火灾是以碳氢火灾为主的混合火灾。碳氢(HC)标准升温曲线的特点是所模拟的火灾在发展初期带有爆燃-热冲击现象,温度在最初 5min 之内可达到 930℃左右，20min 后稳定在 1080℃左右。这种升温曲线模拟了火灾在特定环境或高潜热值燃料燃烧的发展过程，在国际石化工业领域和隧道工程防火中得到了普遍应用。

13.2.3 采用集中排烟的城市道路水下隧道，排烟道内隧道承重结构体耐火极限及判定标准同行车道隧道承重结构体，火灾升温曲线可采用模拟火灾升温曲线；烟道板结构耐火极限不小于 2.0h，行车道侧火灾升温曲线采用 RABT 标准升温曲线，排烟道侧火灾升温曲线可采用模拟火灾升温曲线，耐火极限判定标准采用《建筑构件耐火试验方法 第 1 部分：通用要求》GB / T 9978.1 的规定，由其承载能力判定。

注：

烟道板直接暴露于行车空间，火灾时将和行车空间管片一样，直接受到火灾作用，因此烟道板的火灾升温曲线可和管片一样采用 RABT 火灾升温曲线。

相对于管片，烟道板的结构重要性较低，且易于维修更换，火灾时只要不垮塌从而影响人员安全、造成交通堵塞，可以允许较大变形和局部损伤。因此，烟道板的耐火极限可较管片低，耐火极限判定标准亦可较管片的低。烟道板为受弯构件，主要承受自重及风机的重量，无完整性和隔热性要求，因此其耐火极限由其承载能力判定，判定条件如下：

极限弯曲变形量：
$$D_L = \frac{L_d^2}{400d}$$

极限弯曲变形速率：
$$\frac{dD_L}{dt} = \frac{L_d^2}{9000d} \quad \text{mm/min, 且 } D_L > \frac{L_d}{30}。$$

式中：

L_d ——试件的净跨度，单位 mm；

d ——试件截面上抗压点与抗拉点之间的距离，单位 mm。

13.2.4 隧道内部装修应采用不燃、且高温时不释放出有毒气体的材料。

注：

隧道内发生火灾时的烟气控制和减小火灾烟气对人的毒性作用也是隧道防火面临的主要问题，要严格控制装修材料的燃烧性能及其发烟量，特别是可能产生大量毒性气体的材料。

13.2.5 隧道内防火门应采用甲级防火门，防火门的设置应符合下列规定：

- a) 防火门应为钢质 A 类隔热防火门，耐火极限不应低于 3.0h；
- b) 防火门应为向疏散方向开启的平开防火门，应能在门两侧开启，且应能自动关闭；中间廊道空间受限，防火门设置在人行横通道口时，应向横通道内开启；
- c) 用于人行横通道和专用疏散通道的防火门，应为常闭防火门，防火门应具有信号反馈的功能。

13.2.6 车行横通道应设置防火卷帘，并应符合下列规定：

- a) 防火卷帘应为常闭钢制防火、防烟卷帘，且耐火极限不低于 3.0h；
- b) 防火卷帘两侧应设置启闭装置，并应具有就地和远程控制功能。

注：

隧道内发生火灾时，需要根据火灾蔓延情况，由监控中心远程开启防火卷帘进行车流疏导，因此需要其具备就地和远程开启功能。

13.2.7 设置在隧道行车道旁的电缆沟，其侧沿结构应能够不渗透液体，且其顶部高于路面距离不应小于 200mm。

13.2.8 城市道路水下隧道、地下附属设备用房、风井、消防出入口的耐火等级为一级，地面重要的设备用房、运营管理中心耐火等级不应低于二级，其它地面附属用房的耐火等级为二级。

注：

服务于隧道的重要设备用房，主要包括隧道的通风与排烟机房、变电站、消防设备房。其他地面附属用房，主要包括收费站、道口检查亭、管理用房等。隧道内及地面保障隧道日常运行的各类设备用房、管理用房等基础设施以及消防救援专用口、临时避难间，在火灾情况下担负着灭火救援的重要作用，需确保这些用房的防火安全。

13.3 疏散通道

13.3.1 隧道人行横通道应根据隧道施工方法进行设置，具体形式如下：

- a) 双孔沉管法、钻爆法及围堰法隧道应设置人行横通道；
- b) 双孔盾构法隧道应设置人行横通道或人行疏散通道，设置横通道难度较大时，应采用车道层下方的疏散通道进行纵向疏散；
- c) 上、下行车的双层隧道可采用上下互为疏散的方式进行人员疏散，且上、下层隧道需采用封闭楼梯间和甲级防火门进行防火分隔。

注：

水下盾构法隧道有条件时宜设置横通道，当设置横通道对隧道结构安全影响较大时，如结构失稳、渗漏水风险较大，可以进行消防专项论证取消横通道，可采用行车道层下方安全通道进行纵向疏散。

13.3.6 人行横通道的净高度不应小于 2.1m，净宽度不应小于 1.2m；盾构法隧道采用纵向疏散时，疏散楼梯净宽度不应小于 0.8m，坡度不应大于 60°。

注：

地下道路应设置相应安全疏散设施用于应急情况下的人员逃生疏散。安全疏散是指从一个车道孔疏散至另一个车道孔或安全通道。城市地下道路安全疏散设施包括：横向人行通道(或直接安全口)、人行疏散通道(安全通道)、逃生滑梯、上下层楼梯、至地面楼梯及避难室等。安全疏散设施也可兼做救援使用，兼用时应满足救援车辆的尺寸要求，人行区与车行区宜设置分隔措施。

13.3.7 人行横通道应具备应急照明、安全标志等设施。

13.3.8 坡度大于 5%的人行横通道应设置踏步台阶，且应在人行横通道边墙两侧设置高度为 0.9m 的扶手。

13.3.9 人行横通道设置数量可根据表 30 进行设置：

表 30 人行横通道设置数量

隧道长度（m）	人行横通道设置数量
<500	可不设置

500~800	设置一处
>800	间距 250m~300m 设置一处

- 13.3.10 车行横通道的净高度不应小于 4.5m，净宽度不应小于 4.0m，应在车行横通道两端设置甲级防火卷帘。
- 13.3.11 车行横通道的纵坡应小于 5%，并且在两端设置凸镜和警示标志。
- 13.3.12 车行横通道设置数量可根据表 31 进行设置：

表 31 车行横通道设置数量

隧道长度（m）	车行横通道设置数量
<1000	可不设置
1000~1500	设置一处
>1500	间距 1000m~1500m

- 13.3.13 盾构法隧道采用疏散滑梯进行疏散时，间距宜为 80m，且疏散滑梯应能满足每分钟通行 28 人；采用疏散楼梯进行疏散时，间距宜为 80m~120m，且疏散楼梯应能满足每分钟通行 38 人。
- 13.3.14 疏散口逃生盖板应能承受行车荷载且易开启，并具备手动及电动开启功能。
- 13.3.15 疏散楼梯及疏散滑梯侧的墙壁上应设置应急照明灯具和指示标志，并有打开逃生口盖板的指示标志。
- 13.3.16 纵向疏散通道应设置独立的机械加压送风设施，纵向疏散通道与隧道行车道之间的压差应为 30Pa~ 50Pa。

13.4 消防给水和灭火设施

- 13.4.1 隧道内应设置 ABC 类灭火器，并满足下列规定：
- a) 特长隧道、长隧道和设置 3 条及以上车道的中短隧道，在隧道两侧应交错设置灭火器，每个设置点不应少于 4 具，单侧纵向间距不应大于 45m；
 - b) 其他隧道，可在隧道一侧设置灭火器，每个设置点不应少于 2 具；
 - c) 逃生通道、工作井紧急疏散楼梯应设置灭火器。

注：引发隧道内火灾的主要部位有，行驶车辆的油箱、电池、驾驶室、行李或货物和客车的旅客座位等，火灾类型一般为 A、B 类混合，部分火灾可能因隧道内的电器设备、配电线路引起。因此，在隧道内要合理配置能扑灭 ABC 类的灭火器。

- 13.4.2 隧道消防给水系统设计应符合下列规定：
- a) 隧道内应设置独立的消防给水系统，若当市政给水管网连续供水且供水量满足消防要求时，消防给水系统可采用市政给水管网直接供水；
 - b) 隧道内消防用水量按同一时间发生一处火灾考虑；
 - c) 特长、长隧道内消火栓用水量不应小于 20L/s，隧道外消火栓用水量不应小于 30L/s，系统持续供水时间不应小于 3.0h；中隧道内、外的消火栓系统用水量分别为 10L/s 和 20L/s，系统持续供水时间不应小于 2.0h；
 - d) 管道内的消防供水压力应保证用水量达到最大时，消火栓栓口处的出水压力应为 0.3MPa~0.7MPa，超过 0.7MPa 后应设置减压设施；

e) 隧道内消火栓给水管网应布置成环状,并通过检修阀分隔成若干独立段,每段内消火栓箱的数量不宜超过 5 个;

f) 环状管网的消防干管及向环状管网输水的输水管均不应少于 2 条,当其中一条发生故障时,其余的干管应仍能通过消防用水量;

g) 消火栓箱应安装在隧道侧壁上,采用双开门暗装消火栓箱,间距不应大于 50m,其箱底距路面高度应为 1.1m,且应设置明显的消防安全标志;

h) 单洞双向隧道或单洞单向隧道大于 3 车道时,应在隧道两侧间隔设置消火栓。

注:

当城市自来水的供水量能满足地下道路的生产、生活和消防用水的要求,而供水压力不能满足消防用水压力时,应与当地消防及市政部门协商增设消防泵和稳压装置,可不设消防水池。当城市自来水的供水量和供水压力能满足生产生活用水,而不能满足消防用水量的要求时,则应设消防泵、稳压装置和消防水池。

按现行国家标准《消防给水及消火栓系统技术规范》GB 50974 要求,对消火栓栓口的动压作了规定,并要求验算消火栓系统的最大出口压力。

13.4.3 泡沫消火栓系统设计应满足下列规定:

a) 隧道内泡沫消火栓的间距不应大于 50m;

b) 泡沫消火栓箱内应设置泡沫原液容器罐、Φ19 软管卷盘(≥25m)、比例混合器、Φ9 泡沫喷枪、压力表及其他附属阀门和管路组件等;

c) 系统应选用带开关的吸气型泡沫喷枪,且泡沫喷枪在进口压力 0.5MPa 时,泡沫混合液流量不应低于 30L/min,射程不应小于 6m;

d) 泡沫系统用水量可按 1L/s 设计,并应计入消火栓泵的额定流量内,最不利点泡沫消火栓的供水压力不应小于 0.35MPa;

e) 系统应选用环保型水成膜泡沫液,泡沫混合液的混合比宜采用 3%,泡沫混合液连续供给时间不应小于 20min;

f) 泡沫原液容器罐的有效容积宜采用 30L;

g) 罐体及附件应采用耐泡沫液腐蚀的材质,且与泡沫液直接接触的内壁或衬里不应受泡沫液的性能产生不利影响。

注:

根据现行国家标准《泡沫灭火系统设计规范》GB50151 关于隧道泡沫消火栓的设置规定,对原规范条文中泡沫原液容器罐的储量和泡沫混合液的喷射时间等进行了调整和补充。

13.4.4 水喷雾设施可以用于防护冷却,设计应符合下列规定:

a) 水喷雾强度不应小于 6.0L/(min·m²),最不利点处喷头的工作压力不应小于 0.2MPa,喷雾持续时间不应小于 4.0h;

b) 水喷雾系统用于防护冷却时,响应时间不应大于 300s,保护平面面积不宜大于 600m²;

c) 水喷雾设施设计流量可按下式计算:

$$Q_s = KQ_j \quad (13.4.4)$$

式中: Q_s ——水喷雾系统设计流量(L/S);

K ——安全系数,取 1.05~1.10;

Q_j ——计算流量(L/S)。

d) 水喷雾设施应与火灾报警设施联动,灭火时火场附近相邻 2~3 个防护区段应同时动作;

e) 水喷雾系统应设有水雾喷头、雨淋阀组、放气阀、过滤器、供水管道、供水设施等;

f) 喷头宜采用侧式安装的隧道专用远近射程喷头。

13.4.5 泡沫-水喷雾灭火系统设计应满足下列规定:

a) 喷雾强度不应小于 6.5L/(min·m²),最不利点处喷头的工作压力应大于 0.35MPa,

泡沫混合液持续喷射时间不应小于 20min，喷雾持续时间不应小于 60min；

b) 泡沫-水喷雾系统用于灭火时，响应时间不应大于 45s。

13.4.6 当有下列情况之一时，应设置消防水池：

a) 当其他用水量达到最大，市政给水管道、进水管或天然水源不能满足隧道内外消防用水量时；

b) 当采用一路消防供水或只有一条引入管，且室外消火栓设计流量大于 20L/s 时。

13.4.7 人员集中的隧道运营管理用房设置灭火系统时，应采用不致人中毒、伤害的灭火系统。

13.4.8 隧道针对新能源汽车火灾应以水系灭火剂冷却为主，采用外部冷却与内部填充冷却相结合的方式，保证消防系统设计灭火时间至少能满足 2h 的工作时间。

注：

新能源机动车灭火用水时间随着电池容量的增加而增加，由于纯电动汽车的内部装置较多，管线错综复杂，且大部分均为可燃物体，在自由燃烧状态下，火焰可持续 90min 左右。《锂电池生产仓储使用场所火灾事故处置安全要点》第五条中规定：锂离子电池具备持续放电特性，明火熄灭后，应继续利用水枪进行持续冷却 1h 以上，并使用测温仪进行实时监测。且美国消防研究基金会建议，新能源汽车火灾要做好 1h 以上的灭火准备。

在新能源汽车火灾初期，消防救援人员未到达现场时，利用隧道内自动灭火系统，如水喷雾灭火系统或泡沫-水喷雾灭火系统进行外部冷却，当消防救援人员到达火灾事故现场后利用消火栓灭火系统或泡沫消火栓灭火系统进行内部填充冷却，待明火熄灭后，应继续利用水枪进行持续冷却 1h 以上，并使用测温仪进行实时监测。

13.5 隧道火灾防排烟

13.5.1 隧道应根据隧道断面、长度、曲率、坡度，并结合交通量、交通组成、救援疏散及火灾规模等因素进行防烟与排烟设计。

13.5.2 隧道进行火灾防烟与排烟设计应符合下列规定：

a) 当隧道长度不大于 3000m 时可采用纵向排烟方式，单洞单向隧道长度大于 3000m 时宜采用分段纵向排烟方式或重点排烟方式，单洞双向隧道宜采用重点排烟方式；

b) 应利于人员安全疏散，避免火灾隧道的烟气侵入人行与车行横通道、相邻隧道以及附属用房等；

c) 应能有效控制火场烟气的扩散，且利于救援、灭火。

注：

一般情况下隧道内交通顺畅，采用与行车方向一致的纵向通风控制烟气流动，可保证火灾上游受阻汽车内人员撤离环境不受烟气影响，且纵向控烟与正常及阻滞通风形式保持一致，有利于工程实施。同时，参考现行国家标准《建筑设计防火规范》GB50016 的要求，长度大于 3000m 的隧道采用纵向分段排烟。对于经常发生交通阻滞的隧道，当高峰期阻滞车流队列中发生火灾时，由于着火点前方车辆不能快速撤离隧道，采用纵向通风排烟不能保证火灾源下游司乘人员的疏散环境，因此，需采用重点排烟方式，以尽可能同时保障火源两侧人员撤离环境。

13.5.3 隧道火灾排烟设计应结合逃生避难设施和通风控制统一考虑。

13.5.4 隧道附属设备用房应设置防排烟设施。

13.5.5 当隧道采用纵向排烟时，纵向排烟风速应大于临界风速，临界风速可按照下式计算确定：

$$V_c = K_1 K_2 \left[\frac{g H_b Q_h}{\rho_0 c_p A_h T_f} \right]^{1/3} \quad (13.5.5-1)$$

$$T_f = \frac{Q_h}{\rho_0 c_p A_h V_c} + T_0 \quad (13.5.5-2)$$

式中: V_c ——临界风速, m/s;

K_1 ——临界查德森的 1/3 次幂。取 0.606;

K_2 ——坡度修正系数, $K_2 = 1 + 0.0374i^{0.8}$;

i ——隧道纵坡, %;

g ——重力加速度, 取 9.8N/kg;

H_b ——隧道高度, m;

Q_h ——火灾热释放率, kW;

A_h ——隧道横截面积, m^2 ;

ρ_0 ——周围空气密度, kg/m^3 ;

T_0 ——环境空气温度, K;

C_p ——空气比热, kJ/kg.k;

13.5.6 隧道内火灾时烟羽流质量流量 M_p 可根据轴对称型烟羽流计算:

$$\text{当 } Z > Z_l \text{ 时, } M_p = 0.071Q_c^{\frac{1}{3}}Z^{\frac{5}{3}} + 0.0018Q_c \quad (13.5.6-1)$$

$$\text{当 } Z \leq Z_l \text{ 时, } M_p = 0.032Q_c^{\frac{3}{5}}Z \quad (13.5.6-2)$$

式中: Q_c ——火源的对流热释放速率, 一般取 $Q_c = 0.7Q_h$, kW;

Z ——燃料面到烟气层底部的高度, m, (取值应大于等于最小清晰高度与燃料面高度之差)。

Z_l ——火焰限制高度, 取 $Z_l = 0.166Q_c^{\frac{2}{5}}$, m;

M_p ——羽流质量流量, kg/s。

烟气的平均温度 T 可由下式计算得到:

$$T = T_0 + \frac{K_h Q_c}{M_p C_p} \quad (13.5.6-3)$$

式中: T ——烟气的平均温度, K。

c_p ——空气的定压比热, 取 $c_p = 1.02 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$;

T_0 ——环境温度, K, 取 $T_0 = 293 \text{ K}$ 。

K_h ——烟气中对流放热因子。当采用机械排烟时, 取 $K_h = 1.0$; 当采用自然排烟时, 取 $K_h = 0.5$ 。

集中排烟的排烟量应不小于火灾产烟速率, 火灾产烟速率可根据下式计算:

$$V = \frac{M_p T}{T_0 \rho_0} \quad (13.5.6-4)$$

式中: V ——火灾产烟速率, m^3/s ;

ρ_0 ——环境温度下气体密度, kg/m^3 , 一般取 $T_0 = 293 \text{ K}$, $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。

13.5.7 当隧道采用集中式排烟时, 排烟道内风速不宜大于 15m/s, 排烟口的设计风速不宜

大于 10 m/s。

13.5.8 隧道内用于火灾排烟的射流风机，应符合下列规定：

- a) 当隧道发生火灾时，在温度为 250℃ 情况下，射流风机应能正常可靠运转 1h；
- b) 用于火灾排烟的射流风机应至少备用一组；
- c) 射流风机还应满足《公路隧道通风设计细则》（JTG/TD70/2-2）相关规定。

13.5.9 隧道排烟风机在 250℃ 环境条件下连续正常运行时间不应小于 60min；排烟风机消声器应在 250℃ 的烟气中保持性能稳定。

注：

本条对与高温烟气有直接接触的风机电机的耐高温要求，引用《消防排烟风机耐高温试验方法》(GA 211-2009) 提出的“应能满足在 250℃ 的烟气中正常工作不少于 60min”的要求。为确保风机消声器在火灾高温作用下能正常使用，提出了其耐高温的要求。

13.5.10 火灾时运转的风机从静止到达全速运转的时间不应大于 60s，可逆式风机应能在 90s 内完成反向运转。

13.5.11 集中排烟排烟阀应符合下列规定：

- a) 排烟阀间距宜为 50m~80m，排烟阀开启数量不少于 4 组，烟气控制范围宜为 300m~500m；
- b) 排烟阀应能满足在 250℃ 的烟气中正常工作不少于 60min 的要求；
- c) 排烟阀面积及长宽比设计参数取值参见表 32；

表 32 排烟阀面积及长宽比

单个排烟阀面积 (m ²)	5	6	8	10
排烟阀长宽比	1:3~1:5	1:3~1:5	1:2~1:5	1:2~1:5
推荐形状	1.25×4.00	1.25×5.00	1.60×5.00	2.00×5.00

- d) 排烟阀应设置在隧道顶部或侧壁上部，采用常闭型，并应能成组自动控制开、闭；
- e) 排烟阀结构应具有良好的气密性，在不大于 2000Pa 压差的情况下，排烟阀单位面积的漏风量不应大于 0.1m³/(s · m²)；
- f) 排烟阀的开闭时间不应大于 30s。

13.6 防灾通信及火灾报警

13.6.1 隧道入口外 100m~150m 处，应设置隧道内发生火灾时能提示车辆禁入隧道的警报信号装置。

13.6.2 一、二类隧道应设置火灾自动报警系统，三类隧道宜设置火灾自动报警系统。火灾自动报警系统的设置应符合下列规定：

- a) 应设置火灾自动探测装置；
- b) 隧道火灾自动报警系统应能实时探测并输出报警，实时联动相关消防设备消灾；
- c) 应留有足够的接口与中央控制室的监视设备相连，并实现通讯；
- d) 隧道出入口和隧道内每隔 100m~150m 处，应设置报警电话；
- e) 隧道内手动报警按钮间隔应不超过 50m；
- f) 应设置火灾应急广播或应每隔 50m 处设置发光警报装置。

注：

为早期发现、及早通知隧道内的人员与车辆进行疏散和避让，向相关管理人员报警以采取救援行动，尽可能在初期将火扑灭，要求在隧道内设置合适的火灾报警系统。火灾报警装置的设置需根据隧道类别分别考虑，并至少要具备手动或自动报警功能。对于长大隧道，应设置火灾自动报警系统，并要求具备报警联络电话、声光显示报警功能。由于隧道内的环境差异较大，较工业与民用建筑物内的条件恶劣，如风速

大、空气污染程度高等,因此火灾探测与报警装置的选择要充分考虑这些不利因素。

13.6.3 隧道用电缆通道和主要设备用房内应设置火灾自动报警系统。

13.6.4 长隧道和特长隧道应设置无线通信,对于可能产生屏蔽的中短隧道,应设置无线通信等保证灭火时通信联络畅通的设施。

注:

隧道内一般均具有一定的电磁屏蔽效应,可能导致通信中断或无法进行无线联络。为保障灭火救援的通信联络畅通,在可能出现屏蔽的隧道内需采取措施使无线通讯信号,特别是要保证城市公安消防机构的无线通信网络信号能进入隧道。

13.6.5 长度超过 1000m 的隧道宜设置消防控制室,消防控制室内设备应具有以下功能:

- a) 接收并显示全线各区域送来的火灾报警、故障报警和防灾设备的工作状态信号;
- b) 对全线消防设施进行集中监控;
- c) 对全线火灾事件、历史资料进行存档和管理。

13.6.6 隧道内火灾自动报警系统的设计应符合现行国家标准《火灾自动报警系统设计规范》(GB 50116)的规定。

13.6.7 隧道用电缆通道宜设置线型感温火灾探测器,主要设备用房内的配电线路应设置电气火灾监控探测器。

13.6.8 隧道火灾宜通过隧道内设置的火灾自动报警系统与视频监视系统联动确认。

13.6.9 火灾自动报警系统应将火灾报警信号传输给隧道中央控制管理设备。

13.6.10 消防应急广播可与隧道内设置的有线广播合用,其播放范围内最远点的播放声压级应高于隧道背景噪声 15dB。

13.6.11 消防专用电话可与隧道内设置的紧急电话合用。

13.6.12 消防联动控制器应能手动控制与正常通风合用的排烟风机。

13.6.13 隧道内设置的消防设备的防护等级不应低于 IP65。

13.7 应急供电及照明

13.7.1 隧道及其附属用房的下列部位应设置应急照明:

- a) 隧道及其横洞内;
- b) 消防控制室、消防设备用房、水泵房、配电室等隧道附属用房;
- c) 隧道内的安全疏散通道、疏散楼梯。

13.7.2 特长及长、中隧道应急用电应按一级负荷要求供电,短隧道应急用电可按二级负荷要求供电。

注:

消防用电的可靠性是消防用电设施可靠运行的基本保证,消防用电设施主要包括监控系统(含火灾报警、广播)、消防水泵、废水泵、防排烟风机及相关风阀、防火卷帘、应急照明、疏散指示标志等。本条参照现行国家标准《建筑设计防火规范》(GB 50016)的相关内容修编。

13.7.3 隧道内安全疏散通道、疏散楼梯内照度标准值不应低于 100lx。

13.7.4 隧道内应急照明设施设计应符合下列规定:

- a) 行车道路面亮度不应小于中间段亮度的 10%,且不应低于 0.2cd/m²;
- b) 隧道内附属用房的应急照明照度应与正常照明的照度值相同;
- c) 应急照明设施应设置不间断供电设施,供电转换时照明中断时间不应超过 0.3s;
- d) 应急照明连续供电时间,短隧道不应小于 60min,其他隧道不应小于 90min。

13.7.5 隧道内消防应急照明灯具应符合现行国家标准《消防应急照明和疏散指示系统》(GB 51309)的有关规定。

14 耐久性设计

14.1 一般规定

14.1.1 混凝土结构耐久性设计应包括下列内容：

- a) 确定结构的设计使用年限、结构所处的环境类别和环境作用等级；
- b) 采用有利于减轻环境作用的结构形式和布置；
- c) 规定结构材料的性能与指标；
- d) 确定钢筋的混凝土保护层厚度；
- e) 提出混凝土构件裂缝控制等构造要求；
- f) 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。

14.1.2 建筑材料应满足符合结构强度要求，并应满足规定的抗冻、抗渗、抗侵蚀、抗磨蚀等耐久性要求。

注：

水下隧道所处环境复杂，且受到较高的土压力及水压力的作用，因此要求水下隧道混凝土结构能满足抗裂、抗渗、抗冻及抗腐蚀的性能要求。在一般环境条件下，通过提高混凝土的强度等级，可减少混凝土的碳化及钢筋锈蚀，提高材料的利用率并取得较好的耐久性。

14.1.3 后张预应力混凝土结构除应满足钢筋混凝土的耐久性要求外，尚应根据结构所处环境类别和作用等级对预应力体系采取相应的多重防护措施。

14.1.4 环境因素划分按现行《公路水下隧道设计规范》（JTG/T3371）执行。

14.1.5 当结构构件受到多种环境类别共同作用下，应分别针对每种环境类别进行设计。

14.2 材料耐久性

14.2.1 配置有耐久性要求的混凝土及砂浆原材料应符合下列规定：

- a) 混凝土宜选用低水化热、低 C_3A 含量、低碱含量的水泥和矿物掺合料、引气剂等；
- b) 应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其质量应符合现行国家标准《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》（GB175）的要求， C_3A 含量不宜超过 8%，水泥碱含量应小于 0.60%；管片混凝土应采用强度等级不小于 42.5 的硅酸盐水泥；
- c) 宜使用非碱活性骨料；当使用碱活性骨料时，混凝土中的最大碱含量为 3.0kg/m^3 ；混凝土中的最大氯离子含量为 0.06% 且不应大于胶凝材料总量的 0.1%。
- d) 应根据现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB1596）、《高强高性能混凝土用矿物外加剂》（GB/T18736）添加优于 II 级灰性能的粉煤灰、高炉矿渣粉及硅灰等活性掺合料；
- e) 粗骨料应使用碎石。其品质应符合现行国家标准《建筑用卵石、碎石》（GB/T14685）的规定，碎石粒径宜为 5~25mm，其氯离子含量不应大于 0.02%，含泥量不应大于 0.7%，泥块含量不应大于 0.3%，针、片状含量不应大于 8%，并不得使用具有碱活性的骨料；
- f) 细骨料应使用中砂。其品质应符合现行国家标准《建筑用砂》（GB/T14684）的规定，其细度模数应为 2.5~3.0；
- g) 外加剂的质量和使用要求应分别符合现行国家标准《混凝土外加剂》（GB/T8076）、《混凝土外加剂应用技术规范》（GB50119）的规定，应选择与胶凝材料相符的聚羧酸型外加剂，减水率不小于 25%；
- h) 当有侵蚀性水经常作用时，所用混凝土和水泥砂浆均应具有抗侵蚀性能。

注：

第 8 款混凝土耐久性设计参数分为配合比设计确定参数和现场质量控制参数两个层面，确定配合比前，

必须进行原材料、混凝土碱含量、混凝土快速碳化深度、混凝土抗裂性、混凝土电通量和氯离子扩散系数的检测。其中氯离子扩散系数检测时间相对较长、方法复杂、费用较高。主要作为设计使用寿命计算和确定配合比设计之用。而电通量相对快速、简捷、主要作为控制现场质量之用。

14.2.2 混凝土和砌体所用的材料处应符合国家相关标准外，尚应符合下列要求：

- a) 钢筋混凝土中由水泥、矿物掺合料、骨料、外加剂和拌合用水等引入的氯离子总含量不应超过胶凝材料的 0.10%；
- b) 混凝土中的碱含量满足表 33 的规定；
- c) 混凝土中的三氧化硫含量不应超过胶凝材料总量的 4.0%；
- d) 钢筋应符合《钢筋混凝土用钢》GB1499 的规定；
- e) 片石强度等级不应低于 MU60，有裂缝和易风化的食材不应采用。

表 33 混凝土的碱含量最大值（kg/m）

设计使用年限		100 年
环境条件	干燥环境	3.5
	潮湿环境	3.0
	含碱环境	2.1

注：混凝土的碱含量包括水泥、掺合料、骨料、外加剂及拌合用水的碱含量之和。

14.2.3 注浆材料应符合下列规定：

- a) 浆液应无毒无臭、不污染环境；
- b) 浆液黏度低、流动性好、可注性强、凝结时间可按要求控制；
- c) 浆液固化稳定性好，能满足注浆工程的使用寿命要求；
- d) 浆液应对注浆设备、管路及混凝土结构无腐蚀性、易于清洗。

14.2.4 预应力筋的防护措施应按表 34 的规定选用。

表 34 预应力筋的防护措施

编号	防护工艺	防护措施
PS1	预应力筋表面处理	油脂涂层或环氧涂层
PS2	预应力套管内部填充	水泥基浆体、油脂或石蜡
PS2a	预应力套管内部特殊填充	管道填充浆体中加入阻锈部分
PS3	预应力套管	高密度聚乙烯、聚丙烯套管
PS3a	预应力套管特殊处理	套管表面涂刷防渗涂层
PS4	混凝土表面涂层	耐腐蚀表面涂层和防腐蚀面层

14.2.5 隧道初期支护、基坑支护以及临时支护等结构可采用玻璃纤维筋（GFRP），其强度标准值及弹性模量应符合现行国家标准《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》（GB50608）的规定。

14.2.6 盾构法隧道管片、沉管法隧道管节以及其他预制构件之间的螺栓等紧固件的连接形式及其机械性能等级应满足结构受力及构造要求，其表面应进行防腐蚀处理，并应达到规定的耐久性。常用螺栓等级及强度可按表 35 采用

表 35 常用螺栓等级和强度

类型	普通螺栓					高强螺栓			
等级	3.6	4.6	4.8	5.6	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9

抗拉强度 (MPa)	300	400	400	500	600	800	900	1000	1200
屈服强度 (MPa)	180	240	320	380	480	640	720	900	1080

14.2.7 盾构法隧道采用的弹性橡胶密封垫成品的物理性能指标应满足《高分子防水材料：第 4 部分：盾构法隧道管片用橡胶密封垫》（GB18173.4）的要求。

14.2.8 盾构法隧道采用的遇水膨胀橡胶密封垫胶料的物理性能应满足《高分子防水材料：第 4 部分：盾构法隧道管片用橡胶密封垫》（GB18173.4）的要求。

14.3 结构耐久性

- 14.3.1 隧道结构混凝土耐久性设计应遵守下列原则：
- a) 根据所处的环境类别、环境作用等级，采用基于耐久性所需的混凝土原材料、混凝土配合比、混凝土耐久性参数的指标；
 - b) 采用合理的结构布置、结构构造，以满足使用过程中检查、维护的要求；
 - c) 提出对混凝土施工过程的质量控制要求。

注：环境作用是导致水下隧道材料和结构性能退化的根本原因。同一结构所处环境不同，其性能退化程度也不同。因此，在隧道设计前需充分调查和勘察结构所处环境的类型，确定对结构及其材料有损害物质的成分与含量。调查工作包括气象、水文条件、场地使用历史等，工程地质勘察应包括地下水文和水质情况、地层矿物组成及其溶出性和腐蚀性。

14.3.2 隧道结构混凝土耐久性设计，包括所处的环境类别的分类、环境作用等级的分级等内容，应符合标准《混凝土结构耐久性设计与施工指南》（CCES01）的规定。

14.3.3 设计使用年限 100 年的隧道主体结构，应按表 36 确定和检测混凝土的耐久性设计参数：

表 36 混凝土耐久性设计参数

结构名称		盾构法隧道管片		沉管法隧道管段		明挖法主体结构		暗挖法主体结构	
结构部位		外弧面	内弧面	外侧	内测	侧测	外侧	内侧	外侧
混凝土最低强度等级		C50		C35		C35		C30	
补充防护措施		防水防腐涂层 抗碳化涂层		防水防腐涂层 抗碳化涂层		——		防水防腐内涂层	
最大水胶比		0.35		0.45		0.45		0.45	
最小胶凝材料用量（kg/m³）		430		320		320		320	
最大胶凝材料用量（kg/m³）		530		420		420		420	
渗透性能	电通量（C）	≤1000		≤1500		≤2000		≤2500	
	氯离子扩散系数 （10 ⁻¹² m²/s）	≤1.5		≤2.0		≤2.0		≤4.0	
抗碳化性能	快速碳化深度（mm）	1.0		2.0		2.5		3.0	
混凝土材料	抗裂等级	I		I		I		I	

抗裂性能					
------	--	--	--	--	--

注：风井内测混凝土宜设置抗碳化防水、防腐涂层。

14.3.4 隧道结构所采用的各类材料应与使用环境相适应，可结合结构重要性、可维修性以及环境作用等级、采取附加防护措施，并符合下列规定：

- a) 混凝土或钢筋混凝土构件应具有抵抗腐蚀性离子渗透的能力；
- b) 金属结构与构件可不考虑冻融环境（Ⅱ类）的影响；
- c) 普通钢材和非合金铝等金属材料不宜用于海洋氯化物腐蚀环境（Ⅳ类）及化学腐蚀环境（Ⅴ类）。必须使用时应注意采取附加防腐蚀措施；
- d) 采用聚合物类有机材料的结构或构建应避免直接暴露于高温或紫外线直射环境；
- e) 考虑结构表面防护层（防水层或其他防护层）对结构耐久性的有利影响时，应保证防护层的完整性和耐久性。

注：

即使隧道结构选用了与所处环境类型相适应的结构材料，隧道结构的性能仍然会随其服役时间的延续而退化。因此，除合理的结构耐久性设计外，还需要根据结构的重要性、可维修性、以及环境作用等级，有针对性地采取附加措施。

隧道工程结构除大量采用混凝土外，还会使用钢材、铝合金、聚合物等材料。混凝土材料适应的环境类别广泛，但金属材料一般不用于腐蚀环境（Ⅴ类），极端的温度条件（如Ⅱ类）会降低有机聚合物类材料的性能。因此，设计时应选与环境类型相适应的结构材料以及附加防护措施的材料。

金属结构的附加防护措施如表面电镀、防锈漆、防腐涂层、牺牲阳极等；钢筋混凝土结构中的钢筋防护方式如恰当设置混凝土保护层、直接保护钢筋、或者在混凝土中添加钢筋阻锈剂等外加剂；混凝土表面的防水涂层、防腐蚀面层等也可以使构件隔出有害离子的寝室。

14.3.5 配筋混凝土结构满足耐久性要求的混凝土最低强度等级应符合表 37 的规定。

表 37 满足耐久性要求的混凝土最低强度等级

环境类别和作用等级	设计使用年限		
	100 年	50 年	30 年
I—A	C30	C25	C25
I—B	C35	C30	C25
I—C	C40	C35	C30
II—C	Ca35, C45	Ca30, C45	Ca30, C40
II—D	C40	C35	C35
II—E	C45	C40	C40
III—C, IV—C, V—C, III—D, IV—D, V—D	C45	C40	C40
III—E, IV—E, V—E	C50	C45	C45
III—F	C50	C50	C50

注：

混凝土的强度等级与耐久性之间并不存在一一对应关系，但在原材料保持不变的前提下，混凝土强度的高低在一定程度上反映混凝土的密实性。鉴于强度指标仍是工程现场检验混凝土质量最简洁的方法，而对混凝土水胶比与密实性的测定相对复杂，一般也不列为常规的质量检验项目。

14.3.6 在无氯盐的环境条件下，环境作用等级为 A、B、C 级时，所采用的混凝土强度等级可低于表 14.3.5 的要求，但强度等级不应低于两级，且设计使用年限为 100 年和 50 年的构件，其强度等级不应低于 C25 和 C20。采用的混凝土等级比表中规定的低一级时，相应的保护层厚度应比规定值增加 5~10mm；采用的混凝土强度等级比表中规定等级低两级时，相应的保护层厚度应增加 10~15mm。

注：

尽管采用现代混凝土技术可以很容易的配置强度等级 C60 以下的混凝土，考虑到水下隧道现行功法的适应性和混凝土原材料的可获取性，对于环境作用等级低于 C 级时，混凝土的强度等级要求可以适当降低，但是，耐久性要求不能降低，因此，当混凝土的强度等级降低（密实度）时，要求增加混凝土的保护层厚度，以达到同等的抗渗透性能力。

14.3.7 用于氯盐腐蚀环境中的钢筋混凝土构件，其混凝土 28d 龄期的氯离子扩散系数 DRCM 值，应符合表 38 的规定

表 38 混凝土中的氯离子扩散系数 DRCM 值（28d 龄期，10-12 m²/s）

结构设计使用年限	环境作用等级	
	D	E 以上
100 年	≤7	≤4
50 年	≤10	≤6

注：表中的 DRCM 值，是标准养护条件下 28d 龄期混凝土试件的测定值，仅适用于氯盐条件下采用的较大掺量和大掺量矿物掺合料的混凝土。对于其他组分的混凝土以及更长龄期的混凝土，应采用更低的 DRCM 值作为氯离子侵入性能的评定依据。

注：

氯离子扩散系数是用来评价混凝土氯离子扩散能力的一项重要指标，一般有电通量法和扩散系数法两种表征方式，其测试方法可以按《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTG/TB07）确定。本规范推荐采用扩散系数法。

对于 F 级环境作用等级，需要通过增加保护层厚度提高结构防护能力。

14.3.8 素混凝土结构满足耐久性要求的混凝土最低强度等级，一般环境不应低于 C15；冻融环境和化学腐蚀环境规定应与本规范表 14.3.5 相同，氯化物环境可按本标准表 14.3.5 的 III—C 或 IV—C 环境作用等级确定。

14.3.9 预应力构件的混凝土最低强度等级不应低于 C40。

14.3.10 初支结构作为永久性结构时，应符合下列规定：

- a) 海底隧道由于渗漏溶蚀会对锚杆及钢拱架进行腐蚀破坏，锚杆及钢材采用防腐处理；
- b) 锚杆质量采用抗拉拔力和砂浆饱满度控制；
- c) 锚杆、钢架保护层厚度必须满足要求。

14.3.11 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 39 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。

表 39 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
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	按一级裂缝控制或安全预应力类构件控制

注 1：括号中的裂缝宽度适用于采用钢丝或钢绞线的先张预应力构件；

注 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》（GB50010）的计算裂

缝宽度。

注：

本条所指的裂缝为荷载造成的横向裂缝，不包括收缩和温度等非荷载作用引起的裂缝，其中裂缝宽度允许值更不能作为荷载裂缝计算值与非荷载裂缝计算值两者叠加后的控制标准。控制非荷载因素引起的裂缝，应该通过混凝土原材料的精心选择、合理的配合比设计、良好的施工养护和适当的构造措施来实现。

14.3.12 钢筋混凝土构件的保护层厚度应根据环境作用等级及设计使用年限确定，并符合表 40 的规定。

表 40 钢筋混凝土的最小保护层厚度(mm)

环境作用等级	设计使用年限		
	100 年	50 年	25 年
A	30	25	25
B	40	30	30
C	50	35	35
D	60	45	40
E	70	50	45
F	75	55	50

注 1：结构厚度大于 500mm 时，保护层厚度应不小于 40mm；

注 2：边水沟电缆沟等部件的最外层保护层厚度可取 25mm；

注 3：受力钢筋的混凝土保护层厚度不得小于钢筋的公称直径；

注 4：海底隧道的保护层厚度应增加 5-10mm。

注：

钢筋混凝土的保护层作用是保障使用环境和荷载作用下，钢筋与混凝土之间具有良好的粘结性能，使用环境除这里提到的各类腐蚀与侵蚀作用外，还有火灾高温、冲刷等，在目前的认知水平下可以合理确定荷载作用下的钢筋保护层厚度，对于其他环境作用尚不存在可用的模型。

表中所设定的最小保护层厚度，主要参考了《混凝土结构耐久性设计规范》（GB50476）、《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTG/T B07）和《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTJ275）的规定。

板式构件最外层的箍筋或分布筋最早受到侵蚀，箍筋的锈蚀可引起沿箍筋的环向开裂，而墙板式分布筋的锈蚀除引起开裂外，严重时还会发生保护层的成片剥落，因此，在确定钢筋保护层的最小厚度时应考虑到最外侧的分布筋和箍筋的需要。不同于板式构件的梁、柱等条形构件，其角部受力钢筋同时受到来自两个相邻侧面的环境侵蚀，所以后者的保护层做小厚度要大于前者。

边水沟、电缆沟的环境作用等级一般为 C 级以下，又容易维修与更换，一般不采用过后的保护。

14.3.13 沉管法隧道结构构件保护层最小厚度应符合表 41 的规定

表 41 沉管法结构构件保护层最小厚度(mm)

环境类别/作用等级	构件类别				
	顶、底板		侧墙		中隔墙 中板
	迎土 (水) 面	背土 (水) 面	迎土 (水) 面	背土 (水) 面	侧面、顶 底面
一般环境 (内河) / I -B	50	40	50	40	40
氯化物环境/III-D	55	45	40	45	40

- 14.3.14 盾构法隧道管片外弧面最小保护层厚度不小于 50mm，内弧面最小保护层厚度不小于 45mm。钻爆法隧道、围堰法隧道钢筋混凝土保护层按表 14.3.12 确定。
- 14.3.15 海底隧道管片应增加防水、防腐蚀涂层、抗碳化涂层等保护措施。
- 14.3.16 海底隧道管片接头钢件和纵、横向连接螺栓均应基于结构设计直径增加 2mm 的防腐厚度。
- 14.3.17 钢管片表面锈蚀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第 I 部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级》GB/T8923.1 规定的 C 级以上。
- 14.3.18 沉管管节接头钢端壳、钢底板、PC 拉索、钢剪切键紧固件、GINA 止水带的压板及紧固件等，应采取涂刷耐腐蚀涂层或金属喷涂、牺牲阳极等措施。

15 施工监测与运营监测

15.1 一般规定

- 15.1.1 隧道应根据隧道的功能、使用要求、构造特点、施工条件等进行施工和运营监测专项设计，应包括下列内容：
- a) 监测项目和方法。
 - b) 监测点布置。
 - c) 监测要求。
 - d) 安全预警与状态评估。
- 15.1.2 施工期与运营期监测系统应统筹设计。
- 15.1.3 监测方案应与隧道主体同步设计，监测方案的实施应与隧道建设工期相匹配。
- 15.1.4 机电系统设计时应统筹考虑隧道运营期监测需求。

15.2 监测项目和方法

- 15.2.1 监测项目应在风险源识别的基础上，根据隧道特点、地质状况、环境条件、结构形式、施工工艺等，满足隧道结构和毗邻建（构）筑物结构安全、设计验证、正常使用功能等要求。
- 15.2.2 监测方法宜采用自动化实时监测和人工定期检测相结合。
- 15.2.3 运营期监测项目和方法应符合可修、可检的原则。
- 注：预埋隧道中的传感器一旦损坏，将无法进行维修和更换。传感器信号丢失将导致监测工作的中断，无法实现隧道施工和运营全生命周期内连续监测的要求。因此，运营期隧道监测不宜选取混凝土内力、钢筋应力、水土压力等需要预埋传感器监测的项目，提倡监测项目和监测方法可以维修或更换、可以检测，保证监测设备完好性和数据的连续性。
- 15.2.4 盾构法隧道监测项目及时期应根据表 42 进行选择。

表 42 盾构法隧道监测项目

序号	监测项目			监测时期
1	盾构姿态	应测	实时监测	施工期
3	管片注浆	宜测	实时监测	施工期

4	土、水压力	宜测	实时监测	施工期
5	连接螺栓应力	宜测	实时监测	施工期、运营期
6	沉降	应测	实时监测/定期检测	施工期、运营期
7	收敛变形	应测	实时监测/定期检测	施工期、运营期
8	管片接缝张开和错台	应测	实时监测	运营期
9	管片背后脱空	宜测	定期检测	运营期

注：

盾构法隧道施工期监测参照《盾构法隧道施工及验收规范》（GB50446）执行。其中，盾构姿态的良好保持是盾构法隧道施工的重要控制目标，在盾构推进过程中，通过监测及时准确给出方向、角度等偏差，并予以指导纠偏，盾构姿态直接关系到隧道质量与施工成败。在盾构隧道建设过程中，管片拼装质量影响工程质量，管片拼装不好对导致隧道漏水、管片局部受力过大而破损现象，土、水压力监测能够了解盾构的施工性能。对于盾构法隧道，管片结构及其连接是隧道结构最重要的构件单元，管片结构病害的出现和发展直接影响隧道结构的安全。管片拼装后，管片环向和纵向通过螺栓进行连接紧固。螺栓在管片中同时承受拉力和弯矩，受力复杂。隧道不均匀沉降、横径收敛、管片变形都会导致螺栓受力的巨大变化，对螺栓进行受力监测对保障盾构法隧道安全具有重要意义。由于施工、地层、地下水分布等因素，会造成管片环向缝隙注浆填充不密实、空腔，运营期受车辆振动、固结沉降等影响，管片背后出现脱空病害，造成地层变形，地表沉降量过大、地面塌陷等一系列问题。

15.2.5 沉管法隧道监测项目及时期应根据表 43 进行选择。

表 43 沉管法隧道监测项目

序号	监测项目			监测时期
1	基坑监测	应测	定期检测/实时监测	施工期
2	围堰监测	应测	定期检测/实时监测	施工期
3	水下检测	应测	定期检测/实时监测	施工期
4	沉降	应测	实时监测/定期检测	施工期、运营期
5	水平位移	应测	定期检测	施工期、运营期
6	覆盖层厚度	应测	定期检测	运营期
7	管节接头三向位移	应测	实时监测	运营期
8	后铺发基础垫层	宜测	定期检测	运营期

注：

沉管隧道施工期间基坑监测参照《建筑基坑工程监测技术标准》（GB 50497）执行，围堰监测参照《水利水电工程围堰设计规范》（SL645）关于围堰监测要求执行，水下检测参照《内河沉管隧道水下检测技术规范》（DBJ/T 15-146）执行。对于运营期，管节接头是运营管理最关注的结构。受温度变化的影响，混凝土管节存在热胀冷缩，产生纵向张开量。水流、地质、车流等运动，产生水平错位和垂直错位。因此，沉管法隧道管节接头处三向位移包括：纵向张开量、垂直错位和水平错位。沉管法隧道运营期间，由于水流、潮流反复作用，管顶顶部覆盖层会发生冲淤变化。隧道发生淤积，管顶覆盖层厚度增加，隧道基础可能出现沉降。管顶覆盖层冲刷，管顶直接暴露在水中，影响隧道结构安全。基础脱空检测，受车辆行驶，发生基础脱空。隧道运营过程中受车辆动荷载反复作用，沉管法隧道灌砂基础出现固结沉降现象，导致局部地区出现脱空，进而引起隧道结构的不均匀沉降。

15.2.6 钻爆法隧道监测项目及时期应根据表 44 进行选择。

表 44 钻爆法隧道监测项目

序号	监测项目			监测时期
1	沉降	应测	实时监测/定期检测	施工期、运营期

2	净空收敛	应测	实时监测/定期检测	施工期、运营期
3	拱顶下沉	应测	实时监测/定期检测	施工期、运营期

15.2.7 围堰法隧道监测项目及时期应根据表 45 进行选择。

表 45 围堰法隧道监测项目

序号	监测项目			监测时期
1	基坑监测	应测	实时监测/定期检测	施工期
2	围堰监测	应测	实时监测/定期检测	施工期
3	沉降	应测	实时监测/定期检测	施工期、运营期
4	水平位移	应测	定期检测	施工期、运营期

注：

围堰法隧道施工期基坑监测参照《建筑基坑工程监测技术标准》（GB 50497）执行，围堰监测参照《水利水电工程围堰设计规范》SL645 关于围堰监测要求执行。

15.3 监测点布置

15.3.1 测点布置应符合下列规定：

- a) 应满足安全预警及状态评估的要求。
- b) 应反映监测对象的实际状态及变化趋势。
- c) 宜选择最不利位置。
- d) 测点的位置和数量宜根据结构类型、外部环境及荷载作业、设计要求、施工工艺、监测内容及结构分析结果确定。
- e) 测点的数量和布设范围应有冗余度。
- f) 可利用结构对称性，减少测点布置数量。
- g) 测点布置应便于安装、维修、维护和更换。
- h) 应不影响监测对象安全性能和正常使用功能。
- i) 应满足数据采集、传输要求。
- j) 应在易出现或已出现病害位置增设监测点。

15.3.2 监测点布置应结合不同工法隧道设置如下：

- a) 盾构法隧道的测点宜布置在拱顶、拱底和拱腰。
- b) 钻爆法隧道的测点宜布置在拱顶、拱底和拱脚。
- c) 沉管法隧道和围堰法隧道测点宜布置在顶板、底板和侧墙中部。

15.3.3 根据水下隧道结构特点设置监测区域，并应符合下列规定：

- a) 变形和内力监测区域应选择水压力最大、土压力最大、覆土厚度最小、隧道结构变异、下卧地层变动较大处等外部荷载较大或结构内力较大的区域。
- b) 变形和内力监测断面间距宜设置 20~30m。
- c) 沉管法隧道水下接头监测区域应全覆盖。
- d) 覆盖层检测应满足水中段全覆盖。
- e) 脱空检测应满足管片或基础全覆盖。

15.4 监测要求

15.4.1 数据采集精度应满足结构安全预警和状态评估，并符合下列要求：

- a) 应力监测数据精度不低于 0.01MPa。

- b) 位移监测数据精度不低于 1mm。
- c) 脱空和基础垫层检测数据平面精度不低于 100mm，垂直精度不低于 20mm。
- d) 覆盖层厚度检测精度不低于 100mm。

注：

根据现有公路隧道、铁路隧道和其他规范的具体要求，结合常用的监测仪器精度技术指标和实际工程监测经验，应力监测精度一般不低于 0.01MPa，位移监测精度为 0.5~1mm。基础脱空检测平面精度与测点布设相关，测点布设越密，检测精度越高，一般可达到 50~100mm。垂直方向精度主要依赖于波的反演，精度一般可达到 20mm。隧道顶部覆盖层厚度采用水下声呐检测方法，多波束测深系统作为广泛应用于水下地形测量的设备，检测精度一般可达 100mm 以内。

15.4.2 传感器最小量程应高于设计最小值的 75%，最大量程应不低于设计最大值的 125%。

15.4.3 监测频率应根据水下隧道特点和结构状况确定，并符合下列规定：

- a) 自动监测频率不少于 1 次/h。
- b) 覆盖层厚度监测频率不少于 1 次/年。
- c) 盾构隧道管片脱空和沉管隧道基础垫层检测不少于 1 次/1 年。
- d) 其他人工监测频率不低于 1 次/季度。

15.4.4 应开发相应水下隧道结构健康监测系统，系统的实施应做到安全稳定、操作方便、经济合理、便于维护和扩展升级。

15.4.5 监测数据存储应安全可靠并做好备份。

15.5 安全预警与状态评估

15.5.1 应建立隧道结构安全预警和结构健康状态评估系统，对实时监测和定期数据处理分析，对隧道结构进行异常诊断、安全预警和健康状况评估。

15.5.2 预警分级可按表 46 划分，分为红色预警和黄色预警 2 级。

表 46 预警分级

预警级别	级别描述	颜色标识	结构状态	监测值/设计值
I	特别严重	红色	红色预警	≥ 0.8
II	严重	黄色	黄色预警	$[0.6, 0.8)$

15.5.3 应根据结构监测结果，制定如下相应的预警方案和处置措施：

- a) 结构安全预警方式应明显，除指示灯外宜多样化，可包括声音、网络、可变情报板、路侧广播等。
- b) 结构状态处于黄色预警及以下时，采取日常性保养和预防性养护维修。
- c) 结构状态处于红色预警时，提高监测频率，分析原因并采取针对性措施。

注：

当监测值/设计值处于 0.6 以下，结构处于安全绿色状态。当结构为红色预警状态时，分析原因：如果是结构出现病害，需要采取针对性维修措施；如果是监测故障，需要更新或维修传感器并进行人工复测校准。

15.5.4 隧道健康状态评估宜使用综合评估方法，可采用模糊评价法进行隧道整体状态评分。

注：

根据水下隧道结构特点及传感器布设情况，可采用层次分析法构建隧道健康状况评价因子集，并由上至下对各层评价因子赋权重；参考预警级别划分，利用模糊数据方法构建各项评价因子健康状态隶属函数及隧道整体评价算子；带入现场监测数据，获取隧道整体健康状态评分并判定等级。

附录 A 场地复杂程度分级

表 A.1 场地复杂程度分级

复杂程度 施工工法	简单	中等	复杂
盾构法隧道	洞身全部位于较为均匀的土层中； 洞身在岩层中，上部岩层厚度大于 0.5 倍洞径。	洞身附近土层物理力学参数差异较大； 洞身位于岩层中但是上部岩层厚度小于 0.5 倍洞径。	洞身位于岩土交界面附近； 隧道埋置深度小于 1 倍洞径； 隧道受河床冲刷影响较大。
沉管法隧道	基槽全部位于较为均匀的土层中； 基槽开挖深度小于 15m； 水深小于 15m。	介于简单及复杂之间的其他情况； 水深 15~25m。	基槽位于岩土交界面附近； 基槽开挖深度大于 20m； 淤泥层厚度大于 10m； 水深大于 25m。
钻爆法隧道	洞身在硬质岩层中，上部岩层厚度大于 1 倍开挖跨度； 洞身在中硬岩层中，上部岩层厚度大于 2 倍开挖跨度。	洞身在硬质岩层中，上部岩层厚度小于 1 倍隧道开挖宽度； 洞身在中硬岩层中，上部岩层厚度小于 2 倍开挖跨度； 洞身位于强风化岩层中或破碎岩层中。	洞身位于断层破碎带中； 洞身位于岩土交界面附近； 洞身位于土层中； 洞身位于岩溶发育地层中。
围堰法隧道	基坑全部位于较为均匀的土层中； 基坑深度小于 10m； 水深小于 5m。	介于简单及复杂之间的其他情况； 水深 5~10m。	洞身或基础位于岩土交界面附近； 基坑深度大于 15m； 水深大于 10m。

附录 B 车辆有害气体基准排放量

B.1 小客车（PC）有害气体以 2018 年为基数确定基准排放量 $q_{ex}(v,i)$ ，根据国内小客车燃油种类实际情况，城市道路隧道内柴油小客车的比率基本为零，为保证数据的完整性，保留了柴油小客车各类污染物基准排放量列表，设计者可根据隧道实际交通组成进行需风量计算。

表 B. 1-1 2018 年汽油小客车（PC）基准排放量——CO（g/h）

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
10	7.7	8.8	9.7	11.0	12.0	14.1	16.6
20	8.4	10.2	12.6	15.5	22.7	35.4	50.2
30	7.7	9.3	11.1	13.7	17.3	22.8	31.1
40	8.3	10.3	12.9	16.4	22.3	33.2	48.9
50	8.9	11.8	14.0	18.2	23.8	33.1	46.7
60	8.5	11.4	13.3	18.2	25.3	37.8	59.2
70	9.9	13.3	17.9	25.6	36.4	60.4	109.0
80	12.5	16.2	21.1	31.0	49.8	89.1	166.2
90	11.7	15.7	22.7	35.6	67.5	146.1	264.3
100	15.5	20.9	31.6	50.4	85.9	209.4	415.7

表 B. 1-2 2018 年汽油小客车（PC）基准排放量——NO_x（g/h）

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
10	1.2	1.3	1.6	1.8	2.1	2.3	2.6
20	1.3	1.6	2.0	2.4	2.9	3.4	4.2
30	1.3	1.6	2.1	2.7	3.4	4.3	5.4
40	1.4	1.8	2.4	3.1	4.1	5.1	6.2
50	1.3	1.7	2.3	3.2	4.3	5.5	7.1
60	1.3	1.8	2.5	3.6	5.1	6.9	8.6
70	1.3	1.9	2.7	4.0	5.9	8.3	10.1
80	1.4	2.1	3.2	5.2	7.4	9.8	12.3

90	1.6	2.4	3.7	6.4	9.9	11.8	14.6
100	1.9	3.0	4.4	7.7	12.1	15.3	17.8

注：根据 PIARC2019 报告的相关研究，各种类型车辆尾气排放中，NO₂ 的体积含量占 NO_x 总量的 5%~33% 不等，柴油车比例大时，NO₂ 的体积比越大，如有条件可根据实际交通组成比例确定，隧道内通行柴油车比例不高时，NO₂ 的体积比可按 20%取值。

表 B. 1-3 2018 年汽油小客车（PC）基准排放量——颗粒物（m²/h）

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
20	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
30	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
40	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
50	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6
60	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9
70	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	1.5
80	0.2	0.3	0.3	0.5	0.8	1.3	2.4
90	0.3	0.3	0.3	0.6	1.2	2.1	3.8
100	0.5	0.3	0.4	0.7	1.5	2.9	4.9

表 B. 1-4 2018 年柴油小客车（PC）基准排放量——CO（g/h）

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
10	0.8	0.9	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0
20	0.9	1.0	1.3	2.8	3.3	3.6	4.1
30	0.9	1.2	1.4	2.4	3.0	3.5	3.9
40	0.9	1.2	1.4	2.0	2.7	3.2	3.7
50	1.0	1.1	1.4	1.8	2.6	3.1	3.6
60	1.0	1.1	1.2	1.6	2.4	3.0	3.6
70	1.0	1.1	1.2	1.6	2.1	2.8	3.4

80	0.9	1.1	1.2	1.6	2.1	2.4	3.2
90	0.9	1.0	1.2	1.5	1.9	2.1	2.9
100	1.0	1.1	1.2	1.3	1.6	1.9	2.7

表 B. 1-5 2018 年柴油小客车 (PC) 基准排放量——NO_x (g/h)

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
10	7.7	9.0	10.3	12.2	14.5	16.9	19.9
20	7.9	9.5	11.6	14.7	18.4	23.1	28.4
30	8.0	10.1	12.8	17.3	22.4	29.3	36.9
40	8.0	10.2	13.5	19.0	25.8	34.8	45.8
50	8.0	10.4	14.2	20.6	29.2	40.2	54.7
60	8.4	11.3	16.2	23.9	35.2	51.0	71.6
70	8.7	12.4	18.7	28.9	43.6	63.0	87.8
80	7.6	11.9	20.0	34.0	56.7	88.8	126.6
90	8.3	13.3	24.5	43.9	70.0	108.6	171.6
100	9.6	14.2	27.0	50.9	86.7	131.1	204.2

表 B. 1-6 2018 年柴油小客车 (PC) 基准排放量——颗粒物 (m²/h)

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
10	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0
20	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.3	2.7
30	1.1	1.4	1.6	2.0	2.3	2.7	3.1
40	1.2	1.4	1.8	2.3	2.8	3.4	4.0
50	1.2	1.5	2.0	2.7	3.4	4.2	4.8

60	1.3	1.6	2.1	2.8	3.8	4.9	6.0
70	1.3	1.8	2.5	3.2	4.3	5.3	7.0
80	1.3	1.9	2.8	3.8	5.3	6.6	8.6
90	1.5	2.2	3.2	4.6	6.5	8.2	9.7
100	2.0	2.6	3.8	5.6	7.6	9.4	10.6

表 B.1-7 小客车（PC）预测年限修正系数 f_t

f_t	CO		NO _x		颗粒物	
	汽油车	柴油车	汽油车	柴油车	汽油车	柴油车
2018	1	1	1	1	1	1
2020	0.91	0.92	0.85	0.87	0.98	0.76
2025	0.78	0.80	0.62	0.51	0.95	0.44
2030	0.71	0.74	0.50	0.32	0.93	0.33
2035	0.69	0.72	0.46	0.26	0.92	0.31

对于海拔 1000m 及以下的隧道，海拔修正系数 f_h 为 1.0。海拔 1000m 至 2000m 之间的修正系数可通过线性插值得出。对于海拔 2000m 以上的隧道，数据很少，但可根据表 B.1-8 中适当提高。

表 B.1-8 小客车（PC）2000m 海拔修正系数 f_h

f_h	CO		NO _x		颗粒物
	汽油车	柴油车	汽油车	汽油车	柴油车
2018	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2020	1.6	1.0	1.0	1.0	1.0
2025及以后	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 B.1-9 小客车非排放颗粒物 $q_{ne}(v)$ (m^2/h)

v [km/h]	双向交通	单向交通
0	0	0
10	1.1	0.7
20	2.2	1.3
30	3.4	2.0
40	4.5	2.6
50	5.6	3.3

60	6.7	3.9
70	7.8	4.6
80	9.0	5.3
90	10.1	5.9
100	11.2	6.6

B.2 轻型车（LCV）有害气体基准排放量 $q_{ex}(v,i)$ 及预测年限修正系数。

表 B. 2-1 2018 年汽油轻型车（LCV）基准排放量——CO（g/h）

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
10	35.3	38.1	41.7	45.5	50.2	55.9	61.8
20	35.9	40.1	46.8	51.7	58.3	67.8	83.4
30	36.5	42.2	51.9	57.9	66.5	79.7	105.1
40	37.8	43.2	57.4	67.8	86.2	116.5	123.2
50	39.5	44.2	57.6	70.0	90.0	124.0	141.3
60	40.8	47.1	61.2	69.3	93.8	131.6	204.7
70	44.0	51.8	71.9	90.8	126.5	193.5	381.1
80	52.1	61.6	81.3	98.3	164.5	272.5	645.7
90	52.3	67.8	99.1	118.4	237.1	581.9	1380.3
100	68.8	94.8	137.0	148.0	329.6	953.7	2194.7

表 B. 2-2 2018 年汽油轻型车（LCV）基准排放量——NO_x（g/h）

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
10	1.7	2.1	2.7	3.4	4.3	5.4	6.4
20	1.8	2.2	3.0	4.7	6.2	8.8	10.4
30	1.9	2.1	3.1	5.7	8.0	10.7	13.1
40	1.8	2.0	3.3	6.0	9.1	12.7	16.1
50	1.4	1.6	3.6	6.0	9.9	14.2	18.7
60	0.9	1.7	3.9	7.5	12.3	14.7	21.2

70	0.8	1.9	4.7	9.1	14.6	18.1	24.3
80	0.7	2.0	5.7	12.3	19.1	21.6	25.5
90	1.1	2.7	7.8	15.2	23.6	24.7	26.8
100	2.0	3.9	10.1	19.2	27.9	27.8	27.9

表 B. 2-3 2018 年汽油轻型车 (LCV) 基准排放量——颗粒物 (m²/h)

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
20	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5
30	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.8
40	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.9	1.1
50	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.8	1.5
60	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	1.2	2.4
70	0.2	0.2	0.3	0.6	1.2	2.4	5.1
80	0.5	0.5	0.7	0.9	2.0	4.3	9.6
90	0.8	0.9	1.0	1.2	3.1	7.1	13.6
100	1.1	1.2	1.4	2.0	5.2	9.5	18.8

表 B. 2-4 2018 年柴油轻型车 (LCV) 基准排放量——CO (g/h)

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
10	0.9	1.0	1.2	1.5	1.6	1.8	2.1
20	1.0	1.2	1.5	1.8	1.9	2.1	2.3
30	1.0	1.3	1.6	2.0	2.2	2.4	2.6
40	1.1	1.3	1.7	2.0	2.3	2.5	2.9
50	1.1	1.4	1.7	2.1	2.5	2.8	3.0
60	1.0	1.4	1.7	2.1	2.7	3.0	3.4
70	1.1	1.6	1.8	2.3	3.0	3.3	3.8

80	1.4	1.7	1.9	2.5	3.3	3.6	4.2
90	1.7	2.0	2.1	2.6	3.5	3.9	5.1
100	2.0	2.3	2.2	2.8	3.9	4.6	5.7

表 B. 2-5 2018 年柴油轻型车 (LCV) 基准排放量——NO_x (g/h)

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
10	5.2	6.0	7.3	9.0	11.3	13.7	16.0
20	5.3	6.6	8.7	11.7	15.9	27.7	34.9
30	5.4	7.2	10.1	14.4	20.4	34.0	44.6
40	4.9	6.9	10.2	15.7	23.8	40.2	54.3
50	4.5	6.5	10.4	17.1	27.2	41.4	58.6
60	4.0	7.7	10.7	18.5	37.9	57.5	81.5
70	4.5	9.0	16.6	29.6	48.6	73.6	104.4
80	4.9	9.4	20.0	43.2	75.6	108.6	146.2
90	8.5	15.8	30.4	58.0	102.4	144.9	181.8
100	12.2	23.8	43.1	76.3	122.2	169.6	210.5

表 B. 2-6 2018 年柴油轻型车 (LCV) 基准排放量——颗粒物 (m²/h)

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
10	1.8	2.0	2.2	2.6	2.9	3.3	3.6
20	2.0	2.3	2.8	3.3	3.8	4.6	5.5
30	2.0	2.3	2.9	3.5	4.7	5.9	7.0
40	2.1	2.8	3.3	4.2	5.4	7.2	8.5
50	2.0	2.7	3.7	4.8	6.1	8.8	9.4
60	2.3	3.0	4.2	5.9	7.2	10.5	11.9
70	2.5	3.3	4.6	6.9	9.8	12.2	14.3
80	3.9	4.6	6.4	9.1	12.3	14.8	17.3

90	5.7	6.7	8.3	11.3	14.6	17.4	20.4
100	7.7	9.1	11.0	13.3	16.5	19.8	22.7

表 B. 2-7 轻型车 (LCV) 预测年限修正系数 f_t

f_t	CO		NO _x		颗粒物	
	汽油车	柴油车	汽油车	柴油车	汽油车	柴油车
2018	1	1	1	1	1	1
2020	0.80	0.77	0.70	0.82	0.92	0.75
2025	0.57	0.43	0.32	0.49	0.82	0.38
2030	0.49	0.26	0.20	0.34	0.79	0.21
2035	0.48	0.25	0.19	0.29	0.78	0.17

轻型车海拔修正系数 f_h 、非排放颗粒物 $q_{ne}(v)$ 取值与小客车相同，详见表 B.1-8、9。

B.3 重型车 (HGV) 有害气体基准排放量 $q_{ex}(v, i)$ 及预测年限修正系数。重型车的基准排放量是基于平均质量为 23 t 柴油车的基本排放量，如卡车、卡车-拖车组合、半拖车等。公共汽车和客车平均质量约为 15 t，建议基准排放量按照质量系数进行折减。

表 B. 3-1 2018 年重型柴油车 (HGV) 基准排放量——CO (g/h)

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
10	11.7	14.1	17.3	21.0	24.3	28.0	31.3
20	10.0	11.4	17.8	22.3	26.2	30.6	35.2
30	8.7	10.1	18.3	23.9	30.6	37.8	42.3
40	5.8	8.7	18.8	26.9	37.3	48.1	55.1
50	4.1	6.2	19.3	29.4	43.2	56.8	64.8
60	3.5	6.1	19.8	34.9	53.3	62.3	67.7
70	3.6	6.1	20.3	40.3	63.1	67.8	70.6
80	3.6	6.1	20.7	45.8	73.3	77.2	76.6
90	3.6	6.1	22.2	47.0	75.7	83.1	82.4
100	3.6	6.1	22.3	49.6	78.1	88.6	88.0

表 B. 3-2 2018 年重型柴油车 (HGV) 基准排放量——NO_x (g/h)

v [km/h]	坡度 [%]
----------	--------

	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4
10	54.2	65.7	77.2	86.5	92.7	98.4	103.8
20	41.0	55.3	76.2	88.7	98.8	104.1	111.7
30	32.4	48.5	75.2	92.7	103.1	111.0	127.6
40	23.9	41.6	69.3	105.3	119.2	141.2	174.9
50	20.0	33.1	64.2	111.8	129.8	167.1	211.7
60	16.2	24.5	62.2	122.9	182.0	247.5	301.9
70	12.3	16.3	57.5	134.0	234.2	328.0	392.1
80	12.3	16.3	57.5	145.1	286.5	408.4	482.3
90	12.3	16.3	57.5	146.6	294.6	419.5	485.4
100	12.3	16.3	57.5	151.7	304.6	428.6	488.5

表 B. 3-3 2018 年重型柴油车（HGV）基准排放量——颗粒物（m²/h）

v [km/h]	坡度 [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
10	4.3	4.9	5.6	6.3	7.1	7.9	8.6
20	3.7	4.3	5.6	6.5	7.4	8.5	9.6
30	3.5	4.1	5.6	6.8	8.4	9.9	11.3
40	3.3	3.9	5.8	8.0	10.5	12.9	15.0
50	3.1	3.7	5.8	8.6	11.9	14.9	17.5
60	3.1	3.7	6.0	9.3	14.3	19.3	22.6
70	3.1	3.8	6.3	10.1	16.7	23.6	27.7
80	3.3	3.7	6.6	12.3	19.4	28.0	32.8
90	3.5	3.9	6.6	14.4	21.7	28.5	33.1
100	3.5	3.9	6.8	15.0	23.0	29.4	33.3

表 B. 3-4 重型柴油车（HGV）质量修正系数 f_m

车型	CO	NO _x	颗粒物
15 t（轻货、公共汽车）	0.9	0.9	0.9

23 t (平均)	1.0	1.0	1.0
32 t (货车-拖车组合/半挂车)	1.2	1.2	1.2

表 B. 3-5 重型柴油车 (HGV) 预测年限修正系数 f_t

预测年限	CO	NO _x	颗粒物
2018	1	1	1
2020	0.89	0.71	0.96
2025	0.76	0.34	0.92
2030	0.72	0.22	0.91
2035	0.72	0.22	0.91

重型柴油车海拔修正系数 f_h 取值与小客车相同, 详见表 B.1-8。非排放颗粒物 $q_{ne}(v)$ 见表 B.3-6。

表 B. 3-6 重型柴油车 (HGV) 非排放颗粒物 $q_{ne}(v)$ (m^2/h)

v [km/h]	双向交通	单向交通
0	0	0
10	5.1	4.4
20	10.1	8.8
30	15.2	13.3
40	20.2	17.7
50	25.3	22.1
60	30.3	26.5
70	35.4	30.9
80	40.4	35.3
90	45.5	39.8
100	50.6	44.2

B.4 本附录给出的 2018 年单车污染物基准排放量是基于 PIARC 2019 报告的调研数据, 基准年欧洲个标准车辆组成比例如表 B.4-1。

表 B. 4-1 基准年 2018 年欧洲各标准车辆占比

车型	年度	欧1前	欧1	欧2	欧3	欧4	欧5	欧6
小客车 (汽油)	2018	2.2%	2.3%	2.6%	2.1%	17.0%	35.7%	38.2%
小客车 (柴油)		0.2%	1.3%	2.2%	5.9%	16.8%	36.0%	37.5%
轻型车 (汽油)		5.7%	3.3%	2.4%	4.3%	15.9%	29.7%	38.9%

轻型车（柴油）		1.7%	1.7%	3.0%	8.3%	20.5%	33.6%	31.1%
重型车（柴油）		0.8%	0.6%	1.6%	4.9%	3.1%	29.2%	59.8%

我国 2017 年全国汽车保有量调查数据中各类排放标准见表 B.4-2。

表 B. 4-2 我国 2017 年保有车辆中各标准车辆占比

标准	国 I 前	国 I	国 II	国 III	国 IV	国 V 及以上
保有量（万辆）	27.0	756.5	1149.8	4420.0	9889.0	4573.7
占比	0.1%	3.7%	5.5%	21.2%	47.5%	22.0%

由上表对比分析，我国汽车保有量中国 IV 的占比较大，国 V 及以上标准的车辆占比相比欧洲国家较少。目前国内已经实行较为严格的国 VI 标准，但鉴于我国城市道路水下隧道覆盖区域较广，为保守起见，可按区域对基本排放量进行修正，区域修正系数 f_e 按表 B.4-3 取值。

表 B. 4-3 区域修正系数 f_e

车辆类型	CO	NO _x	颗粒物
小客车（汽油/柴油）	1.5/2.0	1.8/1.1	-/1.4
轻型车（混合）	2.7	1.4	2.2
重型车（柴油）	1.9	1.6	2.5