



T/CECS G XXXX: 20XX

中国工程建设标准化协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

公路盾构隧道设计标准

Standard for design of highway shield tunnel

(征求意见稿)

****出版社

中国工程建设标准化协会标准

公路盾构隧道设计标准

Standard for design of highway shield tunnel

T/CECS G XXX-202X

主编单位：中交第二公路勘察设计研究院有限公司

批准部门：中国工程建设标准化协会

执行日期：202X年XX月XX日

*****出版社

202X年 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展 2017 年第二批中国工程建设标准化协会标准（CECSG）制修订项目编制工作的通知》（中建标公路[2017]71 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为 20 章，主要内容包括：总则、术语及符号、盾构隧道控制要素、地质勘察、总体设计、建筑材料、衬砌及管内结构、荷载、结构计算、耐久性设计、抗震设计、结构防水、盾构选型、始发与接收、附属工程设计、辅助工程措施、特殊地段设计、监控量测、结构安全监测、风险分析。

本规程由中国工程建设标准化协会湿陷性黄土专业委员会归口管理，由中交第二公路勘察设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给中交第二公路勘察设计研究院有限公司（地址：湖北省武汉市经济技术开发区创业路 18 号，邮编：430056，邮箱：690239866@qq.com）。

主编单位：中交第二公路勘察设计研究院有限公司

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 录

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	5
3 盾构隧道控制要素	6
4 地质勘察	12
4.1 一般规定.....	12
4.2 资料收集与场地条件调查.....	14
4.3 地质勘察.....	14
4.4 地质勘察方法.....	18
4.5 临近环境条件勘察.....	21
4.6 地质勘察报告编制.....	22
5 总体设计	25
5.1 一般规定.....	25
5.2 隧道位置选择.....	25
5.3 隧道线形设计.....	28
5.4 隧道横断面设计.....	31
5.5 合理覆盖层厚度确定.....	36
5.6 施工组织设计.....	37
6 建筑材料	44
6.1 一般规定.....	44
6.2 混凝土.....	45
6.3 钢筋.....	46
6.4 紧固件.....	47
6.5 防水材料.....	49
6.6 防火材料.....	50
6.7 装饰材料.....	52
6.8 其它材料.....	54
7 衬砌及管内结构	56
7.1 管片类型.....	56
7.2 楔形环类型.....	56
7.3 管片分块与环宽.....	57
7.4 管片接头构造.....	58
7.5 封顶块设计.....	59
7.6 注浆孔设计.....	60
7.7 吊装方案设计.....	61
7.8 盾构设备推进作用方案设计.....	61
7.9 管片制作误差要求.....	61

8 荷载	64
8.1 一般规定.....	64
8.2 作用.....	65
9 结构计算	79
9.1 管片结构计算.....	79
9.2 施工计算.....	87
9.3 管内主体结构计算.....	88
9.4 抗浮验算.....	89
9.5 结构验算.....	91
9.6 防火计算.....	99
10 耐久性设计	104
10.1 一般规定.....	104
10.2 环境类别与作用等级.....	105
10.3 结构材料要求.....	107
10.4 防腐蚀附加措施.....	109
10.5 管片耐久性设计.....	110
10.6 防水材料耐久性设计.....	116
11 抗震设计	118
11.1 一般规定.....	118
11.2 地震作用.....	120
11.3 抗震设计.....	124
11.4 抗震措施.....	131
12 结构防水	134
12.1 一般规定.....	134
12.2 管片自防水.....	135
12.3 附加防水层设计.....	138
12.4 管片接缝防水.....	139
12.5 螺栓孔和注浆孔防水.....	144
12.6 二次衬砌防水.....	145
12.7 附属工程防水.....	146
13 盾构选型	148
13.1 一般规定.....	148
13.2 选型原则及依据.....	150
13.3 盾构基本参数.....	154
13.4 刀盘结构.....	158
13.5 掘削刀具.....	159
13.6 盾体.....	161
13.7 刀盘驱动.....	162
13.8 推进装置.....	163
13.9 输送排放系统.....	164

13.10 管片拼装系统.....	164
13.11 其他辅助系统.....	165
13.12 选型依据及一般程序.....	166
14 始发与接收.....	168
14.1 一般规定.....	168
14.2 盾构始发.....	171
14.3 盾构接收.....	181
14.4 井内建筑.....	189
14.5 盾构井结构.....	190
14.6 盾构井地层加固.....	191
15 附属工程设计.....	193
15.1 一般规定.....	193
15.2 内部结构.....	194
15.3 横通道.....	194
15.4 防淹防护门.....	195
15.5 集水坑及泵房.....	196
16 辅助工程措施.....	197
16.1 一般规定.....	197
16.2 同步注浆.....	197
16.3 二次注浆.....	199
16.4 水泥土搅拌桩法.....	200
16.5 高压旋喷搅拌法.....	201
16.6 冻结法.....	204
17 特殊地段设计.....	209
17.1 一般规定.....	209
17.2 小净距段.....	210
17.3 浅覆土段.....	210
17.4 卵砾层及复合地层段.....	214
17.5 敏感环境地段.....	215
17.6 小半径段.....	216
18 监控量测.....	218
18.1 一般规定.....	218
18.2 监测项目.....	218
18.3 测点布置.....	220
18.4 监测精度.....	224
18.5 监测频率.....	225
18.6 监测要求.....	226
19 结构安全监测.....	230
19.1 一般规定.....	230
19.2 监测内容.....	232

19.3 监测要求.....	234
20 风险分析	240
20.1 一般规定.....	240
20.2 前期研究风险分析.....	242
20.3 初步设计阶段风险分析.....	246
20.4 施工图设计阶段风险分析.....	253

征求意见稿

1 总 则

1.0.1 为规范公路盾构隧道设计，提高公路盾构隧道设计技术与质量，特制定本标准。

【条文说明】通过总结国内外公路盾构隧道建设经验，规范和指导公路盾构隧道勘察设计，以达到设计质量、降低建设风险、促进技术进步的目的。

1.0.2 本标准适用于采用盾构法施工的新建公路隧道。

【条文说明】当前公路盾构隧道以新建为主，改扩建极少，因此本规范主要适用于新建的公路盾构隧道。

1.0.3 本标准所包含的基本内容为公路盾构隧道地质勘察、总体设计、盾构选型、结构与计算、始发与接收、隧道监测及风险分析等。

【条文说明】公路盾构隧道设计所涉及的专业较多，且相互之间存在较大影响，在设计阶段需要注意总体设计，综合考虑各系统之间的相互影响，正确处理各系统之间的关系，保证施工与运营安全。本标准以盾构隧道土建工程设计为主，交通工程与附属设施等其他专业参照相关规范统筹设计。

1.0.4 应根据设计使用年限及环境作用等级对隧道结构进行耐久性设计，公路盾构隧道主体结构的设计使用年限不应低于 100 年。

【条文说明】公路盾构隧道多数属于重大的基础设施项目，若设计使用年限太低则不合理，因此规定其主体结构的设计使用年限不低于 100 年。根据工程经验及桥隧相关规范，附属工程的各项设计使用年限考虑的主要因素有重要性、维修或更换难易程度、经济性等。

1.0.5 盾构隧道设计应贯彻国家有关技术经济政策，积极稳妥地采用新技术、新材料、新设备与新工艺。

1.0.6 公路盾构隧道设计除应符合本标准外，尚应遵守现行国家法律、法规，符合国家 and 行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 公路盾构隧道 road shield tunnel

用盾构机进行开挖、掘进，并采用预制管片作为隧道衬砌的公路隧道。

2.1.2 隧道场地条件 site conditions of tunnel

建设场地内地层分布与拟建隧道的关系。

2.1.3 临近环境条件 adjacent surroundings

建设场地内既有建(构)筑物、道路、地下设施、地下管线及生态条件等与拟建隧道的关系。

2.1.4 设计使用年限 designed service life

在设计确定的环境作用、维护及使用条件下，不必大修能保证结构正常使用的年限。

2.1.5 合理覆土厚度 reasonable thickness of covering soil

综合考虑隧道施工运营风险、隧道抗浮、河床冲刷、洪水、隧道纵坡及施工运营成本等因素条件下的隧道合理覆土厚度。

2.1.6 盾构选型 shield selection

结合土质条件、岩性、开挖面稳定性、隧道埋深、隧道直径、地下水位、环境条件、衬砌类型等多条件综合选取盾构类型及相应参数。

2.1.7 衬砌结构 lining structure

承受盾构隧道周围的土压力、水压力，以确保隧道净空的结构及运营安全。它由数块管片拼装成圆形结构。

2.1.8 承载能力极限状态 ultimate limit states

盾构隧道管片结构达到最大承载力、出现疲劳破坏、管片接头发生不适于继续承载的变形以及隧道结构抗浮的极限状态。

2.1.9 正常使用极限状态 ultimate limit states

盾构隧道结构达到正常使用的某项规定限制或耐久性能的某种规定状态。

2.1.10 盾构管片 shield segment

盾构隧道衬砌环的基本单元，有钢筋混凝土管片、钢纤维混凝土管片、钢管

片、铸铁管片、复合管片等多种类型。

2.1.11 环境作用等级 environmental action grade

地下水、围岩及大气等环境条件对结构耐久性的影响程度。

2.1.12 结构耐久性 structure durability

结构在设计要求的使用年限内,不需要进行重大加固维修而能保证安全性和适用性的能力。

2.1.13 氯离子扩散系数 Cl- diffusion coefficient

表示氯离子借助混凝土中的毛细孔孔壁吸附水从高浓度区向低浓度区扩散性的参数。

2.1.14 抗震设防烈度 seismic precautionary intensity

按国家规定的权限批准作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。

2.1.15 抗震设防标准 seismic precautionary criterion

衡量抗震设防要求高低的尺度,由抗震设防烈度或设计地震动参数及隧道抗震设防类别确定。

2.1.16 防水等级 grade of waterproof

根据公路盾构隧道对防水的要求确定的结构允许渗漏水量的等级标准。

2.1.17 防水密封垫 waterproof gasket

粘帖于管片接缝处沟槽内,用于管片结构接缝防水的密封材料。

2.1.18 密封槽 seal groove

管片结构中用来粘帖防水材料从而达到管片密封防水功能的凹槽。

2.1.19 防火涂料 fireproof coatings

涂覆在隧道混凝土结构表面,能形成耐火隔热保护层以提高其结构耐火极限的防火涂料。

2.1.20 防火保护板 fireproof board

固定安装在隧道的混凝土结构表面,能提高隧道耐火极限的防火保护板。

2.1.21 变形缝 deformation joint

沉降缝与伸缩缝的统称。

2.1.22 盾构工作井 shield working shaft

供盾构组装、拆卸、掉头、吊运管片或出碴等使用的竖向通道,包括始发工作井、中间工作井、接收工作井等。

2.1.23 盾构始发 shield launching

使盾构机从始发井进入地层的一系列作业。

2.1.24 盾构接收 shield arrival

盾构机由地层进入接收井内的一系列作业。

2.1.25 反力架 reaction frame

为盾构始发掘进提供反力的支撑装置。

2.1.26 基坑 foundation pit

为修建隧道明挖段及盾构工作井而在地面以下开挖的敞开空间。

2.1.27 基坑支护 retaining system for foundation pit

为保证基坑周边环境的安全，对基坑侧壁及周边环境采用的支挡、加固与保护措施。

2.1.28 基坑安全等级 safety grade for foundation pit

衡量基坑工程破坏后果及复杂程度的指标，一般应根据基坑开挖深度、工程地质条件、水文地质条件、环境条件及使用条件等综合确定。

2.1.29 同步注浆 synchronous grouting

盾构隧道掘进时对刚脱出盾尾的管片与地层间的空隙进行注浆填补，减少地层损失及地表沉降。

2.1.30 二次注浆 secondary grouting

根据同步注浆的效果进行的补充注浆方式，当地表沉降稳定，可不进行二次注浆。

2.1.31 冻结法 freezing method

利用人工制冷技术，使地层中的水结冰，把天然岩土变成冻土，增加其强度和稳定性，隔绝地下水与地下工程的联系，以便在冻结壁的保护下进行盾构隧道横通道的施工。

2.1.32 结构健康监测 structure health monitoring

为了解隧道结构运营期间工作状况，对结构工作环境、受力及变形等进行监测与评价的系统。

2.1.33 隧道防灾 tunnel disaster prevention

防止隧道内发生水灾、火灾或交通事故的措施。

2.1.34 隧道救援 tunnel emergency rescue

当隧道内发生灾害事故后采取的紧急救助措施。

2.1.35 单一风险事件 single risk

用于风险评估的事件单元。

2.1.36 总体风险事件 overall risk

对隧道全局产生影响的风险事件，如平纵面布置、通风系统、消防系统等。

2.2 符号

征求意见稿

3 盾构隧道控制要素

3.0.1 根据盾构隧道的长度，可按表 3.0.1 分为五级。

表 3.0.1 盾构隧道按长度分级

隧道等级	隧道长度 L(m)	备注
超长隧道	$L > 6000$	隧道运营管理系统一般需特殊考虑
特长隧道	$3000 < L \leq 6000$	平纵指标对通风方案影响显著
长隧道	$1000 < L \leq 3000$	一般需设置水消防及进行机械通风
中隧道	$500 < L \leq 1000$	一般不需设置水消防及悬挂风机
短隧道	$L \leq 500$	隧道平纵指标可适当放宽

注：隧道长度指隧道两端洞门桩号之差，当为并行双洞时以较长隧道为准。

【条文说明】根据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1)、《公路隧道设计细则》(JTG/TD070)，按照公路隧道的长度分类：分为短隧道 ($L \leq 500\text{m}$)、中长隧道 ($500 < L < 1000\text{m}$)、长隧道 ($1000 \leq L \leq 3000\text{m}$) 和特长隧道 ($L > 3000\text{m}$)。随着近年来，出现以长度大于 3000m 为主的大量公路隧道建设，因此，需要重点关注与盾构隧道长度密切关联的隧道通风、运营管理等工程特点，本标准在原隧道分类的基础上，增加了特长隧道及超长隧道的分类定义。

3.0.2 根据盾构中所采用的对土层稳定的技术措施和开挖方法不同，盾构类型可按表 3.0.2 分类。

表 3.0.2 盾构类型一览表

第一级	第二级	第三级	第四级	
盾构类型	敞开型	人工开挖盾构	/	
		半机械开挖盾构	/	
		机械开挖盾构	/	
	部分敞开型	挤压盾构	/	
		网格盾构	/	
	封闭型	泥水加压盾构	直接控制型泥水加压盾构	
			间接控制型泥水加压盾构	
		土压平衡盾构	普通型土压平衡盾构	
			加泥型土压平衡盾构	
			加水型土压平衡盾构	
	复合型	泥浆型土压平衡盾构		
		泥水复合盾构	/	
		土压复合盾构	/	
	敞开复合盾构	/		

【条文说明】1 敞开型盾构是指盾构内施工人员可以直接和开挖面土层接触，这种盾构适用于能自立和较稳定的土层施工。

2 部分敞开型盾构是在盾构切口环正面安装挤压胸板或网格切削装置，支护开挖面土层，施工人员可以直接观察开挖面土层工况，开挖土体通过网格孔

或挤压胸板闸门进入盾构。这种盾构适用于不能自立、流动性大的松软粘性土层，对隧道沿线地面变形控制较难。

3 封闭型盾构是在盾构切口环和支承环之间增设一道密封隔舱板，在开挖面土层和密封舱板之间形成密封泥土舱，盾构施工时，通过对密封泥土舱中的压力进行控制，使其与开挖面土层水、土压力保持平衡，从而使开挖面保持稳定。封闭型盾构主要有泥水加压和土压平衡两大类。

(1) 泥水加压盾构在隔舱板与开挖面土层之间形成的是泥水舱，在泥水舱内充以压力泥浆支护开挖面土层，利用泥浆静压力平衡开挖面土层水、土压，并在土层表面形成不透水泥膜。泥水加压盾构适用土层范围很广，从软粘土、砂土到砂砾层都可适用，尤其是超大直径和对地表变形要求高的工程都能显示其优越性。

(2) 土压平衡盾构是在盾构密封泥土舱内利用开挖下的泥土直接支护开挖面土层，既具有泥水加压的优点，又消除了复杂的泥水分离处理设施。土压平衡盾构可根据不同地质条件采取不同技术措施，设计成不同类型，能适应从软粘土到砂砾土层范围内各种土层施工。

4 复合型盾构是在软土盾构的刀盘上安装切削岩层的各式刀具，有的还在盾构机内安装碎石机，这种硬岩开挖工具与软土隧道盾构机械相结合，能在硬岩和软土地层交替作业。复合型盾构刀盘上安装的刀具，应根据不同岩层条件而定，一般适应软土地层、硬岩地层、软硬混合交替夹层等。

3.0.3 盾构可根据其切削断面形状分为圆形与非圆形两大类，圆形盾构又可分为单圆形、半圆形、双圆搭接形，三圆搭接形。非圆形盾构又分为马蹄形、矩形（矩形、凸字型、凹字型）、椭圆形（纵向椭圆形、横向椭圆形）。公路盾构隧道一般采用单圆形盾构。

【条文说明】根据我国近年公路盾构隧道设计经验，公路盾构隧道一般采用单圆形切削断面。本标准适用于单圆形公路盾构隧道设计。

3.0.4 根据盾构隧道开挖直径，盾构隧道可分为超小型、小型、中型、大型、超大型、特大型。公路盾构隧道多为大型、特大型。

表 3.0.4 盾构隧道开挖直径分级

开挖直径分级	直径 D (m)	备注
微型盾构	$D < 1$	
小型盾构	$1 \leq D < 3.5$	

中型盾构	$3.5 \leq D < 7$	单车道公路隧道
大型盾构	$7 \leq D < 12$	双车道公路隧道
特大型盾构	$12 \leq D < 16$	三车道公路隧道
超大型盾构	$D \geq 16$	四车道公路隧道

【条文说明】我国公路盾构隧道建设近年来得到了迅速发展，从国内外工程案例统计来看，近30年来公路盾构隧道向大深度、大断面、长距离的方向发展。依据盾构隧道直径，出现了各种对盾构直径的描述，20年前，直径10~11m的盾构被认为是超大型的，可以满足单层2车道需求。而10多年来，14m及以上直径是当前的主流，可以满足双层4/6车道或单层3车道需求。近年来，公路盾构隧道直径达16~18米以上。为了规范行业内对盾构直径相关工程特性对设计的需求表达，本标准结合公路隧道功能特点，对盾构隧道开挖直径进行了分级。

3.0.5 根据盾构隧道承受水压力的大小，可其按表3.0.5分为四级。

表 3.0.5 盾构隧道水压条件分级

分级	水压力 P (MPa)
低水压盾构隧道	$P < 0.4$
中水压盾构隧道	$0.4 \leq P < 0.7$
高水压盾构隧道	$0.7 \leq P < 1.0$
超高水压盾构隧道	$P \geq 1.0$

【条文说明】我国公路盾构隧道建设近年来得到了迅速发展，从国内外工程案例统计来看，近30年来公路盾构隧道向大深度、大断面、长距离的方向发展。对于水下盾构隧道而言，出现了大量高水压盾构隧道。现阶段仍未明确定义隧道水压条件。为了规范行业内对隧道承受水压相关工程特性对设计的需求表达，本标准结合公路盾构隧道建设经验及工程特点，对公路盾构隧道水压条件进行了分级。

3.0.6 根据盾构隧道双洞净距情况，可将其按表3.0.6分为三类。

表 3.0.6 盾构隧道布置方式分类

布置方式分类	净距 D
分离式隧道	$B \geq 1.5D$
小净距隧道	$1.5D > B > 0.5D$
超小净距隧道	$B \leq 0.5D$

【条文说明】根据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1)、《公路隧道设计细则》(JTG/T D070)，对公路隧道双洞间距进行了分类，但主要适用于钻爆法隧道。本标准结合施工期及运营期公路盾构隧道的工程特点及建设经验，对盾构隧道布置方式进行了分类。

3.0.7 根据盾构隧道与场地地质条件的关系，将隧道建设场地条件按表3.0.7分为三级。

表 3.0.7 隧道场地条件分级

场地条件分级	场地描述
简单场地	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。
中等场地	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。
复杂场地	洞身位于岩土交界面附近。

3.0.8 根据环境条件对隧道主体结构耐久性的影响程度，隧道的环境作用等级应按表 3.0.8 划分。

表 3.0.8 隧道环境类别的作用等级

环境类别	环境作用等级					
	轻微	轻度	中度	严重	非常严重	极端严重
一般环境 (I 类)	A	B	C			
冻融环境 (II 类)			C	D	E	
海洋氯化物环境 (III 类)			C	D	E	F
除冰盐环境 (IV 类)			C	D	E	
化学腐蚀环境 (V 类)			C	D	E	

注：1 一般环境 (I 类)：下穿江河湖泊的水下隧道及海底隧道两岸不受海水侵蚀的区域。

2 冻融环境 (II 类)：寒冷地区隧道的洞口段，主要为衬砌及洞门的外表面。

3 海洋氯化物环境 (III 类)：海底隧道初期支护两侧及二次衬砌结构的临土侧。

4 除冰盐环境 (IV 类)：寒冷地区隧道的洞口段，主要为洞口衬砌内侧、结构底板、边沟与电缆沟。

5 化学腐蚀环境 (V 类)：地下环境中硫酸根离子、碳酸根离子或酸碱度等，主要为衬砌临土侧。

3.0.9 隧道主体结构的防水标准应按表 3.0.9 确定

表 3.0.9 盾构隧道防水分级

防水等级	防水标准	适用范围
一级	不允许渗水，结构表面无湿渍	地下风机房及大型电气设备洞室、电缆沟等
二级	不允许渗水，结构表面可有少量湿滞； 总湿滞面积不应大于总防水面积的 2/1000；任意 100 m ² 防水面积上的湿滞不超过 3 处，单个湿滞的最大面积不大于 0.2 m ² ；平均渗水量不大于 0.05L/(m ² ·d)，任意 100 m ² 防水面积上的渗水量不大于 0.15L/(m ² ·d)	盾构管片衬砌结构及管内结构
三级	有少量漏水点，不得有线流和漏泥沙； 任意 100m ² 防水面积上的漏水或湿滞点数不超过 7 处，单个漏水点的最大漏水量不大于 2.5L/d，单个湿滞的最大面积不大于 0.3 m ²	通风竖井或斜井
四级	有漏水点，不得有线流和漏泥沙； 整个工程平均渗水量不大于 2L/(m ² ·d)，任意 100 m ² 防水	施工辅助坑道

面积上的渗水量不大于 4L/(m ² ·d)

3.0.10 隧道主体结构混凝土的抗渗等级应根据表 3.0.10 确定。

表 3.0.10 防水混凝土设计抗渗等级

工程埋置深度 H (m)	设计抗渗等级
H<10	P6
10<H<20	P8
20≤H<30	P10
H≥30	P12

3.0.11 隧道结构安全等级应按表 3.0.11 确定。

表 3.0.11 隧道结构的安全等级

结构安全等级		隧道结构
一级	主体结构	管片、明洞、洞门、行车道板等
二级	一般结构	地下泵房、横通道、风道、遮光棚等
三级	次要结构	边水沟、电缆沟等

3.0.12 隧道临近环境分级宜按表 3.0.12 分级。

表 3.0.12 隧道临近环境条件分级

环境因素	简单	中等	复杂
建筑物	影响区内无敏感建筑物，或仅有少量简易平房	影响区内有少量敏感建筑物	影响区内敏感建筑物较多
地下管线	影响区内无污水、雨水、热力、煤气等对地层变形敏感的地下管线	影响区有少量对地层变形敏感的地下管线	影响区有大量对地层变形敏感的地下管线
道路	影响区内城市次干道或四级公路	影响区内有城市主干道路或二、三级公路	影响区内有城市快速路、一级公路或高速公路
航道锚地	区内无航道、锚地	区内存在小型航道、锚地	区内在重要航道、锚地
码头	影响区内无码头	影响区内有小型码头	影响区内有大型重要码头
自然保护区	影响区仅有县市级自然保护区	影响区内有省级自然保护区	影响区内有国家级自然保护区

3.0.13 基坑支护安全等级应结合基坑开挖深度、临近环境条件等级、地质条件等级按表 3.0.13 确定。

表 3.0.13 基坑支护安全等级

基坑开挖深度(H)	临近环境条件等级 ¹								
	简单			中等			复杂		
地基复杂程度 ²	简单	中等	复杂	简单	中等	复杂	简单	中等	复杂
H≥20	一级	一级	一级	一级	特级	特级	特级	特级	特级
14m<H≤20m	一级	一级	一级	一级	一级	一级	一级	一级	特级
7m<H≤14m	二级	二级	二级	二级	二级	一级	一级	一级	一级
H≤7m	三级	三级	二级	三级	二级	二级	二级	二级	二级

注：1. 临近环境条件等级见表 3.0.13。

2. 地基复杂程度根据场地地基土性软弱程度及水文地质条件分类如下：

简单：2H 深度范围内土性较好；无暗浜（塘）分布；水文地质条件简单。

中等：2H 深度范围内存在淤泥质粘土、中密碎石土、砂土和黏土；水文地质条件：距离江河湖海大于 1.5 倍 H，但无水力联系。

复杂：2H 深度范围内存在厚度较大的极软弱淤泥质土，坑底存在厚度较大的粉土或砂土且隔水帷幕无法隔断；存在大面积填土（厚度大于 3m）、暗浜（塘）分布；水文地质条件：邻近水体（约 1.5H 范围内）并有水泥联系；基坑范围内有渗透性较大的含水层并存在承压水。

3.0.14 根据风险发生概率和风险损失情况，盾构隧道的风险等级应按表 3.0.14 分为四级。

表 3.0.14 风险等级判别表

风险发生概率		风险损失				
		1	2	3	4	5
		很小	较小	较大	很大	极大
1	几乎不可能发生或 $P_f < 0.0003$	I	I	II	II	III
2	很少发生或 $0.0003 \leq P_f < 0.003$	I	II	II	III	III
3	偶然发生或 $0.003 \leq P_f < 0.03$	II	II	III	III	IV
4	可能发生或 $0.03 \leq P_f < 0.3$	II	III	III	IV	IV
5	频繁发生或 $P_f \geq 0.3$	III	III	IV	IV	IV

注：1. P_f 为风险发生的概率值。

2. I级：低度风险，II级：中度风险，III级：高度风险，IV级：极高风险。

4 地质勘察

4.1 一般规定

4.1.1 盾构隧道勘察阶段可分为预可行性研究阶段工程地质勘察（简称预可勘察）、工程可行性研究阶段工程地质勘察（简称工可勘察）、初步设计阶段工程地质勘察（简称初步勘察）、施工图设计阶段工程地质勘察（简称详细勘察）四个阶段。

4.1.2 盾构隧道勘察应按工程地质调绘、勘探测试、地质资料综合分析及报告编制的程序开展工作，正确反映工程建设场地的工程地质及水文地质条件，为盾构隧道建设提供完整、评价正确的地质资料。

4.1.3 盾构隧道地质勘察勘探点、测试点和观测点的布置应能明确工程目的，具有代表性，能判明重要的地质界线和查明工程地质状况，其密度、深度应根据勘察阶段、成图比例、露头情况和工程结构特点等确定。

【条文说明】盾构隧道设计一般包括预可行性研究、可行性研究、初步设计、施工图设计、施工、运营等阶段。设计各个阶段所解决的工程问题不同，对岩土工程勘察的资料深度要求也不同。如：预可勘察及工可勘察主要目的是了解控制和影响线路方案的宏观地质条件，规避对线路方案产生重大影响的地质和环境风险。初步勘察和详细勘察主要目的是针对地质条件开展设计工作，并对各类环境提出保护方案。

若不按照建设阶段及各阶段的技术要求开展岩土工程勘察工作，可能会导致工程投资浪费、工期延误，甚至在施工阶段产生重大的工程风险。根据规划和各设计阶段的要求，分阶段开展岩土工程勘察工作，规避工程风险，对盾构隧道建设意义重大。

不良地质作用、地质灾害、特殊性岩土等往往对盾构隧道线位规划、敷设形式、结构设计等工程方案产生重大影响，严重时危及工程施工和线路运营的安全。不良地质作用、地质灾害、特殊性岩土等岩土工程问题往往具有复杂性和特殊性，采用常规的勘探手段在常规的勘探工作量条件下难以查清。因此，对工程方案有重大影响的岩土工程问题应进行专项勘察工作，提出有针对性的

工程措施建议，确保工程规划设计经济、合理，工程施工安全，顺利。

4.1.4 盾构隧道勘察应为下列工作提供勘察资料：

- 1 隧道轴线和盾构始发（接收）井位置的选定。
- 2 盾构设备选型、设计制造和刀盘、刀具的选择。
- 3 盾构管片及管片背后注浆设计。
- 4 盾构推进压力、推进速度、盾构姿态等施工工艺参数的确定。
- 5 盾构开仓检修与换刀位置的选定。
- 6 土体改良设计。
- 7 盾构始发（接收）井端头加固设计与施工。
- 8 工程风险评估、工程周边环境保护及工程监测方案设计。

【条文说明】盾构法隧道轴线和盾构始发井、接收井位置的选定，盾构设备选型和刀盘、刀具的选择，盾构管片设计及管片背后注浆设计，盾构推进压力、推进速度、土体改良、盾构姿态等施工工艺参数的确定，盾构始发井、接收井端头加固设计与施工，盾构开仓检修与换刀位置的选定等与工程地质条件和水文地质条件密切相关。

1 盾构隧道轴线和覆土厚度的确定，必须确保施工安全，并且不给周围环境带来不利影响，应综合考虑地面及地下建筑物的状况、围岩条件、开挖断面大小，施工方法等因素后确定。覆盖层过小，不仅可能造成漏气、喷发（当采用气压盾构时）、上浮、地面沉降或隆起、地下管线破坏等，而且盾构推进时也容易产生蛇行；过大则会影响施工的作业效率，增大工程投入。根据工程经验，盾构隧道的最小覆盖层厚度以控制在1倍开挖直径为宜。

2 由于盾构选型与地质条件、开挖和出渣方式、辅助施工方法的选用关系密切，各种盾构的造价，施工费用、工程进度和推进中对周围环境的影响差别又相当大，加之施工中盾构难以更换，所以必须结合地质条件、场地条件、使用要求和施工条件等慎重比选。

4.1.5 应根据隧道所处地质条件、地形条件、临近建（构）筑物及地下管线分布状况与隧道位置关系，对隧道的场地条件进行分区后布置勘察工作。前期研究阶段的分区沿纵向长度不宜小于1000m，初步设计阶段不宜小于500m，施工图阶段不宜小于100m。

4.2 资料收集与场地条件调查

4.2.1 应根据盾构隧道的总体布置、地质条件、环境条件、盾构选型、隧道规模及辅助工法等因素确定隧道设计各阶段资料收集与场地条件调查的内容。

4.2.2 应查明项目区域土地利用状况及权属关系，掌握市区、农田、林地、河海等不同用途土地利用的现状，对土地进行分类调查，有无矿产、文物需要保护。

4.2.3 应收集项目区域综合规划，调查盾构机大型设备等相关材料的交通运输情况。

4.2.4 应调查工作井的工程用地，盾构始发与接收设备堆放、管片预制厂及弃土弃渣处理场地的难易程度。

4.2.5 应调查河流、湖泊、江海等水域的周边情况，包括水域及堤坝岸床断面，水文、航道及水利情况。

4.2.6 应调查工程用电及给水排水设施的状况，以确保隧道施工与运营期电源、水源供给的合理配置。

4.3 地质勘察

4.3.1 盾构隧道勘察应符合下列要求：

1 查明场地岩土类型、成因、分布与工程特性；重点查明高灵敏度软土层、松散砂土层、高塑性黏性土层、含承压水砂层、软硬不均地层、含漂石或卵石地层等的分布和特征，分析评价其对盾构施工的影响。

2 基岩地区应查明岩土分界面位置、岩石坚硬程度、岩石风化程度、结构面发育情况、构造破碎带、岩脉的分布与特征等，分析其对盾构施工可能造成的危害。

3 通过专项勘察查明岩溶、土洞、孤石、球状风化体、地下障碍物、有害气体分布。

4 提供砂土、卵石和全风化、强风化岩石的颗粒组成、最大粒径及曲率系数、不均匀系数、耐磨矿物成分及含量，岩石质量指标（RQD），土层的黏粒含量等。

5 对盾构始发（接收）井及区间联络通道的地质条件进行分析和评价，预

测可能发生的岩土工程问题，提出岩土加固范围和方法的建议。

6 根据围岩条件、隧道断面尺寸和形式，对盾构设备选型及刀盘、刀具以及辅助工法提出建议，并提供所需的岩土参数。

7 根据围岩条件和工程周边环境变形控制要求，对不良地质体的处理及环境保护提出建议。

4.3.2 粘性土地层勘察应符合下列要求：

- 1 查明粘性土的粘粒含量和塑性特征。
- 2 查明粘土地层是否含有膨胀性矿物。
- 3 提供软土的灵敏度指标、强度等物理力学参数。

4.3.3 砾砂类地层勘察应符合下列要求：

- 1 查明砾砂地层的密实程度，确定相关物理力学参数。
- 2 进行颗粒分析试验，确定常见硬矿物如石英、长石和角闪石的含量。
- 3 分析各粒组含量，为渣土改良方案提供设计依据。
- 4 结合地下水条件，做好地层的砂土液化可能性判别工作，确定可能引起涌水、涌砂和隧道渗漏的敏感地层区划。

4.3.4 砂卵石类地层勘察应符合下列要求：

1 查明卵石、漂石的粒径分布以及胶结情况，应结合区域地质条件，岩石的成因以及已有地质资料进行分析判断，并提供最大粒径及曲率系数、不均匀系数等指标。

2 查明直接影响盾构机刀盘开口率和排渣系统尺寸的砂卵石地层粒径尺寸。

3 查清泥浆浓度选择（泥水平衡盾构机）和渣土改良剂掺入比设定（土压平衡盾构机）的砂卵石地层的粒径分布和赋水情况。

4.3.5 复合地层勘察应符合下列要求：

- 1 查明上软下硬的硬地层层面，不同程度的岩石风化界面。
- 2 查明砂土地层和风化岩层界面。
- 3 查明软土层和风化岩层界面。
- 4 查明耐磨矿物成分及含量。

【条文说明】以下地层对盾构施工和环境容易造成的主要工程地质问题包括：

1 高灵敏度软土层：由于土层流动造成开挖面失稳。

高塑性的黏性土地层：因黏着造成盾构刀盘结泥饼或管路堵塞，使开挖难以进行。

含有承压水的砂土层：突发性的涌水和流砂，形成地层空洞，从而引起地面大范围的突然塌陷和沉降。

透水性强的松散砂卵石层；涌水并引起开挖面失稳和地面下沉。

上下软硬复合地层：因软弱层排土过多引起地层下沉，并造成盾构在线路方向上的偏离。

特硬地层：刀具容易磨损或损坏，掘进困难。

含漂石或卵石的地层：难以排除，或因扰动地层，造成超挖和地层下沉。

2 盾构始发井、接收井及联络通道是盾构施工中最容易出现事故的部位，因此，盾构法的岩土工程勘察工作需要对盾构始发、接收井及盾构区间联络通道的地质条件进行分析和评价，预测可能发生的岩土工程问题，提出岩土加固范围和方法建议。

4.3.6 岩石地层勘察应查明直接影响盾构机设计和施工参数的岩石类型、风化程度、硬矿物含量、完整性系数和岩体质量指标（RQD）等。

4.3.7 冻结法勘察应符合下列要求：

1 查明需冻结土层的分布及物理力学性质，其中包括含水量、饱和度、固结系数、抗剪强度。

2 查明需冻结土层周围含水层的分布，提供地下水流速、地下水中的含盐量。

3 提供地层温度、热物理指标、冻胀率、融沉系数等参数。

4 查明冻结施工场地周围的建筑物、地下管线等分布情况，分析冻结法施工对周边环境的影响。

【条文说明】冻结法是临时用人工方法将软弱围岩或含水层冻结成具有较高强度和抗渗性能的冻土，以安全地进行隧道作业的一种施工方法。由于成本较高，一般是在其他辅助施工方法不能达到目的时方可采用。

冻结法可用于砂层和黏土地层中，但当土层的含水率在 10% 以下或地下水流速为 1m/d~5m/d 时，难以获得预期的冻结效果。对于后一种情况，可以通过

注浆来降低水流速度。采用本法时，必须对围岩的含水量、地下水流速、土的冻胀特性及冻土解冻时地层下沉等问题进行充分地调查与研究。

土壤冻结时产生的体积膨胀与土壤的物理力学性质、有无上覆荷载及所采用的冻结方法等有关，一般在砂层和砂砾层中几乎不会产生，在黏土和粉砂中较大。通常人工冻土的体积膨胀不会超过5%，产生的冻胀力可达 $2500\text{kN/m}^2\sim 3000\text{kN/m}^2$ 。为了获得黏性土的冻胀量，可进行不扰动土取样的室内试验。

在接近建筑物或地下管线处采用冻结法施工时，必要时可采取以下措施：

- 1 控制冻土成长；
- 2 限定冻结范围，设置冻胀吸收带，使建筑物周围不冻结；
- 3 对建筑物进行临时支撑或加固等。

4.3.8 盾构下穿地表水体时应调查地表水与地下水之间的水力联系，分析地表水体对盾构施工可能造成的危害。

4.3.9 应分析评价盾构隧道下伏的淤泥层及饱和粉土层、砂层对盾构施工和运营的影响，提出处理措施的建议。

4.3.10 前期地质勘察应满足路线方案及工法比选的需要，并正确评价隧址区域的工程地质、水文地质条件，对影响路线方案的重大地质问题应给出可靠的结论。前期地质勘察应符合下列要求：

- 1 查明区域地质构造及沿线地层分布状况。
- 2 以地质调绘、地质遥感及物探为主，可辅以必要的钻探。
- 3 应进行专题水文分析及河（海）床演变分析。

4 每一隧道轴线方案均应进行物探，当勘察条件复杂时，应辅助布置横断面测线。

4.3.11 对地质条件复杂的盾构隧道，预可阶段宜进行地质勘察。但当符合以下条件之一时预可阶段可不进行地质勘察工作：

- 1 场地条件分级为简单。
- 2 区域附近有其他工程的地质勘察资料可以利用。
- 3 有区域地质遥感资料。
- 4 收集的相关地质资料能够满足预可行性研究的需要。

4.3.12 初步地质勘察应符合下列要求：

- 1 在路线基本走向范围内，对可能作为隧道线位的区间进行地质勘察。
- 2 以地质调绘及物探为主，配合必要的钻探及其他勘探工作。
- 3 初步查明沿线地层分布特点及性质、不良地质及范围、地下水的分布及特性等。
- 4 重点勘察不良地质地段，明确对隧道方案的影响程度。
- 5 对影响方案比选的重大地质问题可开展专项论证工作。

【条文说明】本条所列内容是初步勘察应包含的内容，具体工程可根据工程特点和具体地质条件进行其他有针对性的分析评价。

4.3.13 详细地质勘察应符合下列要求：

- 1 应充分利用已有地质资料，采用钻探、物探、原位测试等综合勘测手段。
- 2 按场地条件分区分段查明沿线工程地质条件，提供区内所有岩层及土层的物理力学参数。
- 3 查明地下水类型及相关参数，并评价其对拟建工程的影响。
- 4 地震基本烈度为7度及其以上的区域应进行场地地震效应评价。
- 5 查明不良地质及地下障碍物，分析其对工程的影响，并提出建议与对策。
- 6 对特殊地质区段或复杂单项工程可开展专项岩土工程勘察。

【条文说明】详细勘察时，拟建工程的平面位置已经确定，详细勘察的目的就是针对具体工程场地进行勘察，提供施工图设计所需的岩土工程资料和参数。

4.4 地质勘察方法

4.4.1 盾构隧道在各阶段勘察过程中均应进行地质调绘工作，并应符合下列要求：

- 1 调绘手段可采用观察、挖探、手持式钻探等多种方法。
- 2 调绘范围为路线两侧不小于1km，不良地质地段及地质条件复杂的路段应扩大调绘范围。
- 3 调绘内容主要为查明或核对隧道区域地质构造、地层岩性、水文条件及

特殊地质问题等。

4 前期勘察及初步勘察应将调绘作为主要的勘察手段之一，详细勘察阶段调绘主要是对地质工作中的遗留问题进行补充和验证。

4.4.2 当场区内围岩对隧道有重大影响时，应开展物探工作。物探工作应符合下列要求：

- 1 前期勘察以轴线探测为主，可辅以必要的横断面勘察。
- 2 初步勘察及详细勘察应以网格状探测为主。
- 3 物探应与调绘、钻探工作相结合，以提高解译的准确性。
- 4 物探宽度可根据路线比选范围及结构特点确定，水域地段不应小于结构边线外侧 150m；陆域地段不应小于结构边线外侧 100m。

5 当物探效果较好时可以加大物探密度，物探效果较差时可以减少甚至取消物探工作。

4.4.3 盾构隧道的物探工作可参照表 4.4.3 执行。

表 4.4.3 盾构隧道物探工作要求

勘察阶段	场地条件分级		
	简单场地	中等复杂场地	复杂场地
前期勘察	物探纵断面每轴线不少于 1 条	物探纵断面每轴线不少于 1 条 地质疑问处宜布置物探横断面	物探纵断面每轴线不少于 1 条 物探横断面间距不大于 500m
初步勘察	物探纵断面每轴线不少于 1 条 物探横断面间距不大于 500m	物探纵断面每轴线不少于 1 条 物探横断面间距不大于 200m	物探纵断面每轴线不少于 2 条 物探横断面间距不大于 150m
详细勘察	物探纵断面每轴线不少于 1 条 物探横断面间距不大于 150m	物探纵断面每轴线不少于 2 条 物探横断面间距不大于 100m	物探纵断面每轴线不少于 3 条 物探横断面间距不大于 50m

【条文说明】场地复杂程度是根据《岩土工程勘察规范》GB 50021 确定的，所列勘探点间距主要针对城市浅埋隧道，对于山区隧道，下穿江、河、湖、海的水底隧道等，一般参照相关国家及行业标准以及设计和施工需要确定。

4.4.4 盾构隧道各阶段勘察均应进行钻探，以核实地层信息，获取地层物理力学参数。

4.4.5 盾构隧道的钻探工作应符合表 4.4.5 的规定。

表 4.4.5 盾构隧道的钻探孔间距要求

勘察阶段	场地条件分级		
	简单场地	中等复杂场地	复杂场地
前期勘察	800~1000m	500~800m	300~500m
初步勘察	200~300m	150~200m	100~150m
详细勘察	75~100m	50~75m	25~50m

注：当为多排钻孔时，指全部钻孔在隧道轴线上的投影距离。

4.4.6 盾构隧道的钻孔布设应符合以下规定：

- 1 钻孔布设在隧道外侧 5~8m 处。
- 2 当为单洞时宜在两侧交错布置，当为多洞并行时，宜多排交错布置。
- 3 双洞并行时钻孔数应增加 30~50%，多洞并行时应增加 60~100%。
- 4 隧道工作井勘探孔间距宜为 20~35m，且不应少于 3 个；

4.4.7 盾构隧道一般性钻孔深度应达到隧道底板以下 1.0D~2.0D（D 为盾构隧道外径）。控制性钻孔深度应达到隧道底板以下 2.0D~3.0D。当下部为基岩时孔深可适当减小。

【条文说明】进入基岩段勘探孔深度应符合下列规定：

1 控制性勘探孔深度：在结构埋深范围内如遇强风化、全风化岩石地层，应进入结构底板以下不小于 15m。如遇中等风化、微风化岩石地层，应进入结构底板以下 5m~8m。

2 一般性勘探孔深度：在结构埋深范围内如遇强风化、全风化岩石地层，应进入结构底板以下不小于 10m。如遇中等风化、微风化岩石地层，应进入结构底板以下不小于 5m。

4.4.8 在隧道前期及初步勘察阶段，应布置适当数量的控制性钻孔。前期勘察阶段控制性钻孔应不低于总钻孔数量的 50%，初步勘察阶段控制性钻孔应不低于总钻孔数量的 25%。

4.4.9 地质钻孔应符合以下规定：

1 根据地质条件及设计需要，选择代表性地段进行孔内弹性波测试、分段抽水试验、孔内摄像及跨孔物探等工作。

2 在各勘察阶段选择有代表性的地质钻孔应进行抽水试验，测定地下水的水位、压力、岩土层的渗透特性等。

3 水中钻孔完毕后应进行全孔封堵，水下部分岩层（含强风化岩层）应采用水下水泥砂浆封堵，土层（含全风化层）须采用粘性土封堵。

【条文说明】水文地质试验孔一般布置在对工程有影响的主要含水层、强透水岩层与相对隔水层的接触带、可溶岩与非可溶岩层的交接带，断层破碎带，向斜构造轴部和背斜构造两翼，以及下穿地表水体地段。

4.4.10 在隧道勘察过程中，陆域地段及比较线上勘察量可适当减少，各阶段物探及钻探工作量应充分利用前阶段工作成果。

4.4.11 当地质条件复杂或水文地质条件对隧道影响较大时，前期勘察阶段宜开展水文地质勘察工作，初步勘察阶段宜进行水文地质专题研究。水文动态观测尽可能安排在详勘以前进行。抽水试验应合理布置水位观测孔，确定场地各含水层的渗透系数和渗透影响半径。

4.4.12 在地质勘察过程中，不仅要进行常规的岩土物理力学参数试验及常规水质分析，还应进行非常规试验，如土的渗透系数、无侧限抗压强度、变形模量、土的物理指标等。

4.4.13 所有的勘探点（孔）宜分层取样进行土工试验或岩石物理力学实验，满足每一岩土层的重要参数试验不应少于 6 个数据的取样。

4.5 临近环境条件勘察

4.5.1 盾构隧道选定路线之前，应重点查明对盾构掘进有障碍的物件，以确保盾构工程的安全掘进。

1 查明各种建（构）筑物的用途、使用情况、结构形式及基础埋深。

2 查明各类埋设物（给水排水管道、电力洞室、通信管道、燃气管道等）的位置、结构、管径、条数。

3 查明水井及古井的位置、深度、利用情况、缺氧程度、地下水的年度水位变化及水质情况。

4 查明建（构）筑物残留物及临时工程残留物的状况，掌握工程经历及工程状况（土地管理者、道路管理者、埋设权属单位、施工单位等），掌握遗留物、回填状态、土壤及地下水的污染状况等。

4.5.2 在盾构隧道勘察过程中，应进行与隧道设计施工相关的临近条件勘察工作，主要包括以下内容：

1 临近港口、码头及航道；

2 附近公路、铁路及城市道路；

- 3 临近建筑物、军事设施和公用设施；
- 4 临近地下管线；
- 5 影响隧道方案及施工的其他临近条件。

【条文说明】由于各个设计阶段对环境调查的范围和深度要求不同，因此，需要分阶段开展环境调查工作，满足各个阶段的设计要求。

4.5.3 临近建（构）筑物及地下管线的调查范围应不小于基坑开挖深度或隧道埋置深度的2倍（单侧），当地质条件较差或附近有重要建（构）筑物、精密仪器与设备的厂房时，应适当扩大调查范围。

1 对于居民住宅、宾馆、厂房等临近建筑物，应查明其产权归属、建成时间、平面位置、结构形式、基础形式与埋深、倾斜与裂缝情况及保护要求等。

2 对于隧道、桥梁、纪念碑、防汛墙（坝）、共同沟等临近构筑物，应查明其管理部门、平面位置、基础布置及埋深、材料类型、断面尺寸及保护要求等。

3 对于雨水管、污水管、自来水总管、煤气管、电力通讯管等地下管线，应查明其平面位置、直径、埋深、接头形式、压力、输送的物质（油、气、水等）及保护、迁改要求等。

4.5.4 当隧道可能对通航、码头、航空设施、防洪设施、城市重要基础设施、重要历史建筑或军事设施等有影响时，应在前期或初步勘察阶段进行专题评估，设计阶段应根据评估结论进行特殊勘察及处置设计。

4.5.5 对不能拆迁而需要原地保护的重要建筑物、特殊地下管线以及其他设施应进行专题评估，内容应包括：保护对象的现状、沉降及位移控制标准、保护措施、监测方案、应急处理以及工后评估等。

4.5.6 盾构隧道应进行地下障碍物勘察，查明隧道通过区域是否存在废弃地下建筑或建筑基桩，通航水域是否存在沉船、大型铁制构件以及废弃炸弹等水下障碍物。

4.5.7 应对盾构法施工对周边环境的影响项目进行环境条件勘察，包括噪声及振动、地基变形、浆液污染、弃土处理等。

4.6 地质勘察报告编制

4.6.1 勘察报告文字说明应包括下列内容：

1 勘察任务依据、拟建工程概况、执行的技术标准、勘察目的与要求、勘察范围、勘察方法、完成工作量等。

2 区域地质概况及勘察场地的地形、地貌、水文、气象条件。

3 场地地面条件及工程周边环境条件等。

4 岩土特征描述，岩土分区与分层，岩土物理力学性质、岩土施工工程分级。

5 地下水类型，赋存、补给、径流、排泄条件，地下水位及其变化幅度，地层的透水及隔水性质。

6 不良地质作用、特殊性岩土的描述，及其对工程危害程度的评价。

7 场地土类型、场地类别、抗震设防烈度、液化判别。

8 场地稳定性和适宜性评价。

9 岩土工程分析评价，并提出相应的建议；盾构始发（接收）井端头及区间联络通道岩土加固方法的建议；对不良地质作用及特殊性岩土可能引起的盾构法施工风险提出控制措施的建议。

10 其他需要说明的问题。

4.6.2 勘察报告图表应包括下列内容：

1 标准贯入试验、静力触探等原位测试，岩土室内试验，抽水试验，水质分析等成果表。

2 各岩土层的原位测试、岩土室内试验统计汇总表；地震液化判别成果表。

3 各岩土物理力学性质指标综合统计表及参数建议值表。

4 区域地质构造图、水文地质图。

5 路线综合工程地质图、工程地质及水文地质分区图。

6 水文地质实验成果图。

7 钻孔柱状图，岩芯照片。

8 波速、电阻率测井试验成果图，静力触探、荷载试验等原位测试曲线图。

9 填土、软土及基岩埋深等值线图。

4.6.3 勘察报告附室内土工试验、岩石试验、岩矿鉴定等试验原始记录。

4.6.4 盾构隧道勘察岩土参数应根据表 4.6.4 的规定进行选取。

表 4.6.4 盾构隧道勘察岩土参数选择表

类别	参数
地下水	1.地下水位; 2.孔隙水压力; 3.渗透系数; 4. 腐蚀性离子的含量
力学性质	1.无侧限抗压强度; 2.黏聚力、内摩擦角; 3.压缩模量、压缩系数; 4.泊松比; 5.静止侧压力系数; 6.标准贯入锤击数; 7.基床系数; 8.岩石质量指标 (RQD); 9.岩石天然湿度抗压强度
物理性质	1.比重、含水量、密度、孔隙比; 2.含砾石量、含砂量、含粉砂量、含黏土量; 3. d_{10} , d_{30} , d_{60} 及不均匀系数 d_{60}/d_{10} ; 4.砾石中的石英、长石等硬质矿物含量; 5.最大粒径、砾石形状、尺寸及硬度; 6.颗粒级配; 7.液限、塑限; 8.灵敏度; 9.围岩的纵横波速度; 10.岩石岩矿物组成及硬质矿物含量。
有害气体	1.土的化学成分; 2.有害气体成分、压力、含量。

5 总体设计

5.1 一般规定

5.1.1 公路盾构隧道勘察设计过程中，应根据公路等级、隧道长度及交通量大小等控制因素合理确定盾构隧道勘察设计标准与工作内容，有效地控制其工程规模及设计质量。

5.1.2 公路盾构隧道总体设计应满足工程影响区域的总体规划、交通规划、航道规划、岸线规划、防洪规划、交通功能等方面的要求，协调好与区域路网、地面建筑物、地下构筑物、堤坝、城市轨道交通及其他公用设施的关系。

5.1.3 公路盾构隧道总体设计应符合以下原则：

1 隧道洞内外平、纵线形应协调，符合行车安全与行车舒适的要求。

2 应根据公路等级、设计速度、设备布置、防灾和救援等要求确定车道数、建筑限界和净空断面。在满足隧道功能和结构受力良好的前提下，确定合理隧道断面型式和隧道结构型式，并满足维修管理方便的要求。

3 根据区域地质条件及相应设计阶段的要求，制订地质勘察方案，充分利用地质遥感资料、附近其他工程的地质资料和必要的地质勘查资料进行隧道方案比选。

4 应根据项目技术标准、地质条件及邻近环境条件，并和其他工法的施工安全性、技术可行性、经济合理性与环境适应性等方面进行充分比较与论证。

5.1.4 公路盾构隧道总体设计应在充分研究已有资料的基础上进行，根据拟定的技术标准，对平面线位、纵面线形、横断面布置、洞口位置、始发与接收、两端接线方案等进行综合比选。

5.1.5 公路盾构隧道总体布置、土建结构、通风照明、消防排水、供配电等运营管理系统及附属设施等，应能满足隧道正常运营、管理维护、防灾救援等方面的需要。

5.2 隧道位置选择

5.2.1 盾构隧道位置选择应遵循以下原则：

1 宜选择在均匀土层及砂质地层穿越；

- 2 宜选择穿越河（海）床冲淤较浅、河（海）床对称及稳定的区段；
- 3 宜布设在河海港湾的浅水区、软弱不透水的深堆积黏土层等区段。

5.2.2 公路盾构隧道位置不宜从以下地段穿越：

- 1 地质条件极为复杂、存在严重不良地质的地段。
- 2 冲淤严重及其不稳定的河（海）段。
- 3 高地震烈度地区易出现地震液化、地震沉陷、地震边坡失稳等区域。
- 4 对环境敏感的建（构）筑物段。

5.2.3 公路盾构隧道位置选择不能避免通过障碍物时，应进行专项论证，并采取工程治理措施。

5.2.4 双洞盾构隧道间距需综合考虑隧址区的地层特性、盾构外径、盾构机选型确定，一般情况下要保持在 1 倍洞径以上；当受初始掘进的区间及道路宽度、障碍物等条件的限制不能满足 1 倍洞径以上的间距，需采取有效的措施。

5.2.5 盾构隧道设置为并行施工隧道时，设计应注意如下事项：

- 1、隧道的相互的位置关系。并行隧道间的距离在后续隧道的外径（ $1D$ ）以内，特别是当为 $0.5D$ 以内时，两洞相互影响显著。
- 2、隧道的开挖顺序。当为上下并行隧道时，由于开挖的顺序不同对先行隧道的影响不同。
- 3、周边地基的土质。对于灵敏度高的软弱黏性土地基及自稳性差的砂土地基来说并行隧道的相互干扰与后续隧道的施工时的影响显著。
- 4、隧道外径。与先行隧道相比，后续盾构的外径越大，对先行隧道的影响也就越大。
- 5、后续盾构的施工时期。宜在先行隧道施工完成后且待土体稳定之后再施工后续盾构，并行隧道不单纯针对先行隧道的横断面方向，包括纵断面方向上应进行分析论证。
- 6、并行隧道施工时，必须充分考虑土质条件，尽量不要扰动隧道周边地基。应结合参考预测解析的结果等，确定掘进管理控制标准。

5.2.6 大深度盾构隧道的接收与始发设置应充分考虑设备器材的搬入搬出对施工周期的影响。必须考虑引进可缩短搬出时间的设备，对安全设备，换气设备等应进行论证与分析。

5.2.7 隧道位置选择应充分考虑对环境的影响，应在施工之前及施工过程中对预测盾构法给周边环境带来影响的项目实施调查：

- 1 噪音及振动对医院、学校及居民区等环境敏感区的影响；
- 2 地基变形对既有民宅、建（构）筑物的影响；
- 3 药液注浆对工程范围内的水井、河流的水质的影响，监测药液泄漏对水质的污染的影响程度；
- 4 弃渣场地的位置及搬运路线与处理方法对环境的影响。

5.2.8 公路盾构隧道洞口位置选择应综合考虑以下因素：

- 1 应综合堤坝安全、施工工法、工程规模、地形、地质、水文、航运、施工、接线工程和生态环境等因素进行方案比选。
- 2 洞口距河流永久稳定岸坡的距离一般不宜小于 50m，同时应满足当地管理部门的要求，并应尽量避免对驳岸、码头等既有构筑物的不良影响。
- 3 洞口设计标高应按比 100 年一遇洪水位高 0.5m 的标准设计，若洞口标高无法满足
- 4 洞口位置的选择应与周围自然环境相协调，宜绕避居民点；当不能避开时，应评估噪声、水质污染等对居民及环境的危害，制定降噪、控制污染等环境保护措施。
- 5 洞口位置的选择应与前后构造物协调。
- 6 洞口应避免建在滑坡、岩堆和泥石流等处。并应控制路堑边坡和仰坡开挖高度。

5.2.9 工作井的位置选择应符合下列规定：

- 1 工作井的布置应符合路线总体设计原则，综合考虑路线平纵控制要素、工作井两端控制性建筑物、水系的分布、工作井功能要求等因素，尽量减小工作井深度。
- 2 盾构工作井位置的选择应综合考虑施工与运营的需要，应能满足隧道施工阶段盾构吊装、拼装、解体、始发及接收的需要，并满足隧道运营阶段的使用功能的要求。
- 3 工作井井口应满足防洪要求，井口位置高程宜高出洪水频率为 1/100 的水位不小于 0.5m；对于不满足防洪要求的特殊建设条件，应在隧道口设置防洪设

施。

4 应根据建设场地周边环境等合理确定工作井处的覆土厚度。

5 工作井宜设置在拆迁量小、对附近居民的噪声和振动影响少、不影响地面交通的区域，应为工程施工创造较好的场地条件。

5.3 隧道线形设计

5.3.1 盾构隧道的平纵线形应根据地形地质条件、水文条件、路线走向、工作井位置、和沿线障碍物等因素确定，洞门内外平、纵线形应相互协调，并应满足工程沿线主要控制条件，与两岸路网连接顺畅。

【条文说明】由于盾构施工法多在市区采用，故在选择隧道的平面形状时，受到地表及地下结构物的影响、城区地质水文条件的制约。从功能、运维和施工方面等考虑，宜尽可能地选用直线，在不得不采用曲线时，必须尽可能地采用大半径曲线。

盾构通过的地点主要受施工竖井的位置、施工设备的配适、地面的利用情况，直接或间接的障碍物，地上及地下建筑物因盾构施工而可能产生的变形等因素制约，但应尽可能地选择在对开挖作业和涌水处理等施工均为安全且有利的地层中通过。另外，也应考虑到竣工后的运营维护问题。

5.3.2 隧道洞口内外平纵线形应保持一致。平面不宜小于按设计车速计算的 3s 行程长度，纵面不宜小于 5s 行程长度。

【条文说明】隧道洞内外的线形应相互协调。洞外连接线的平曲线可根据设计速度来确定，规定 3s 设计速度行驶长度范围的平曲线应与洞内一致。同时，从过去一些公路隧道的经验和教训来看，洞外接线 50m 内设置纵坡变坡点，通视较差，容易引起交通事故。因此，本条文建议隧道两端的接线纵坡宜有距洞口 5s 设计速度行程的长度与隧道纵坡保持一致。

5.3.3 公路隧道不设超高的圆曲线最小半径应符合表 5.3.3-1 的规定，判断隧道是否需要横向加宽的停车视距见表 5.3.3-2。

表 5.3.3-1 不设超高的圆曲线最小半径 (m)

设计速度 (km/h)		100	80	60	40
路拱坡度 (%)	≤2.0%	4000	2500	1500	600
	>2.0%	5250	3350	1900	800

表 5.3.3-2 公路隧道停车视距

公路等级	高速公路、一级公路			
设计速度 (km/h)	100	80	60	40
停车视距 (m)	160	110	75	40

【条文说明】隧道平面线形是设直线还是曲线条文不作规定。《公路路线设计规范》(JTG D20-2017)中规定：“圆曲线半径小于或等于 250m 时，应设置加宽”，而公路隧道不宜采用设加宽的圆曲线。因此，条文规定“当设计速度为 20km/h 时，圆曲线半径不宜小于 250m”。隧道内宜采用同一内轮廓断面，方便施工，是否需要横向加宽依据停车视距确定。

5.3.4 盾构隧道可采用不设超高的平曲线，当必须采用设超高的平曲线时，超高值不宜大于 4%。盾构隧道平曲线半径不应小于 50D (D 为隧道外径)，并不得采用需加宽的平曲线。

【条文说明】盾构隧道采用小半径平曲线时，会大大增加施工控制难度，目前国内盾构最小平曲线半径一般按照 50D 控制。若盾构隧道需要局部加宽，则导致整个隧道均需加宽，将大大增加隧道施工难度及工程造价，因此在此限制盾构隧道采用加宽的平曲线。

5.3.5 小半径盾构隧道线形应充分考虑隧道建筑限界、盾构机尺寸、盾构机的铰接装置和仿形刀装置、隧道轴线控制、隧道整体外侧偏移、纠偏量大引起的沉降量等因素进行综合确定。两车道隧道最小半径不应小于 450m，三车道隧道最小半径不应小于 600m。

【条文说明】当因地形、地质等条件限制不得已时，可采用较小半径线形，但必须进行技术论证，并符合《公路路线设计规范》中关于超高的规定。

5.3.6 盾构隧道纵断面线形应充分考虑地质地形条件、施工安全、行车安全、工程规模、通风方案、营运费用等方面要求，并符合以下规定：

- 1 可根据地形、地质条件设计为“U”形、“V”形、“W”形。
- 2 隧道最小纵坡不宜小于 0.5%，最大纵坡不宜大于表 5.3.6-1 的取值。

表 5.3.6-1 盾构隧道最大纵坡参考表

设计速度(km/h)	限制大型车通行	大型车混入率 15%以内	大型车混入率 30%以内
100	3.5	3.0	2.5
80	4.5	3.5	3.0
60	5.0	4.0	3.5
40	6.0	5.0	4.0

注：1.大型车指中型货车、大型货车及拖挂车。

2.表中为折算为标准车后的交通量比例。

3 当隧道纵坡大于 4%时，应对隧道行车安全、通风方案和运营费用等方面进行技术、经济分析。

4 隧道内纵坡的变换不宜过大、过频，以保证行车的安全视距和舒适性。凸形竖曲线和凹形竖曲线的最小半径和最小长度应符合表 5.3.6-2 的规定。

表 5.3.6-2 竖曲线最小半径和最小长度 (m)

设计速度 (km/h)		100	80	60	40
凸形竖曲线半径	一般值	10000	4500	2000	700
	极限值	6500	3000	1400	450
凹形竖曲线半径	一般值	4500	3000	1500	700
	极限值	3000	2000	1000	450
竖曲线长度		85	70	50	35

【条文说明】盾构隧道的线型选择要根据地质、地形条件及隧道的最大坡度条件确定。隧道内纵坡的最小值一般以隧道建成后洞内水(包括漏水、涌水、渗水等)能自然排泄为原则，同时考虑到隧道施工误差，要求不宜小于 0.5%。盾构隧道的最大允许纵坡一般有隧道交通量决定，欧洲修建盾构隧道时，考虑到地质条件因素，纵坡最大值达 7%；根据挪威的统计资料，最大纵坡一般在 6%~8%之间，最大可达 10%。但对于大纵坡的盾构隧道，欧洲往往采取交通管制，禁止排污较大的货车、柴油车驶入，或者增大机械通风规模。最大纵坡的确定应系统分析纵坡与汽车排污量的关系，基于我国已有建设经验及现实国情，要求隧道最大纵坡不大于 6%。特殊条件下，应根据不同类型的隧道，对行车安全、环境影响及运营费用等方面进行综合论证后确定。

5.3.7 盾构隧道纵面应根据以下因素综合分析确定：

- 1 纵面设计应考虑规划航道深度、河床冲刷及航道疏浚的影响。
- 2 通航水域的最小覆土厚度应大于通航船只抛锚入土深度要求。
- 3 隧道施工期间顶部覆盖层厚度在水域段不宜小于 1.0D (D 为隧道外径)，并不应小于 0.65D；隧道运营期间最小覆盖层厚度应满足隧道抗浮及结构稳定需要。

- 4 始发及接收工作井附近的覆盖层厚度不宜小于 0.6D。

【条文说明】盾构隧道覆土厚度的要求是在考虑了盾构施工阶段和隧道正常运营阶段的安全性而提出的。盾构隧道覆土厚度除应满足远期规划设计要求，仍应满足隧道抗浮及结构稳定的需要。在相关的盾构隧道抗浮设计规定中，要求水浮力分项系数：施工阶段取 1.1，运营阶段取 1.2，因此隧道顶部必需要有一定的覆土

厚度。根据上海已有工程中相关设计数据统计（数据参考《道路隧道设计规范》DG/TJ08-2033-2008），工作井处最小覆土厚度为 0.50D，工作井之间区段的最小覆土厚度为 0.54D。工程设计中，隧道覆土厚度越小，工程长度越小，接线处理也较方便，但最小覆土应在设计中根据需要与可能来寻求最佳处理方式，因此本条中从确保工程安全的角度提出工作井处最小覆土厚度不宜小于 0.65D；水域段地貌相对变化较大，一般不宜小于 1.0D，在技术上确有保证时，不应小于 0.65D。

5.3.8 当隧道与既有隧道或地下构筑物距离较近或交叉时，其合理间距应根据地质条件、地下水发育程度、结构安全、地层变形要求以及施工工艺等综合研究确定。

【条文说明】在考虑距离较近或交叉隧道的净距时，因作用于隧道上的荷载已与单条隧道情况完全不同，为防止由于相互影响引起地面较大下沉、隧道较大变形等情况的发生，必须综合考虑隧道间合理间距的问题。在有条件的情况下，新建隧道与既有地下构筑物间应留有较大的净距；但由于地下空间开发力度的加大，很多情况下已无法满足此要求，此时在设计中应综合考虑地质条件、地下水发育程度、结构安全性、地层变形要求以及施工工艺等因素，对近接的关键部位先后施工隧道的相互影响进行分析计算，并以此为依据在设计中提出相应的工程措施。

5.3.9 隧道出入口的平纵设计应充分考虑洞口景观效果、行车安全、洞口防洪等需要。接地点附近可设置为反向坡，形成“驼峰”，以防止地面水汇入隧道内。

5.3.10 长度大于 1000m 的盾构隧道，应在洞口外的中央分隔带设置开口或“X 型”转向车道，以方便紧急救援或特殊情况下隧道双向通行的交通组织。

5.4 隧道横断面设计

5.4.1 隧道横断面设计应根据使用功能进行明确分区，满足行车安全、事故疏散迅速、日常维护检修方便等的要求，在满足建筑限界要求的前提下，应充分利用空间、合理布置运营设备和安全疏散设施，适当控制断面的规模尺寸。

【条文说明】盾构隧道受特殊环境限制，施工难度相对较大，此类交通设施一般是不可能扩建的，因此在一定程度上，属于不可再生的资源。另外由于资金、技术等条件的限制，隧道的规模往往是有限的。因而，高效、合理地利用盾构隧道资源，适应公路交通可持续发展的要求。对隧道空间的充分利用一般集中体现在横断面设计中，即在有限的结构断面中合理组织隧道功能，最大限度的提高隧道

通行能力和行车安全性。横断面设计不仅不能脱离隧道的具体条件和实际使用要求，还应该提供适应今后发展变化的可能性。因而把握水下隧道空间利用的两个基本原则：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。

5.4.2 各级公路盾构隧道的建筑限界标准应符合现行《公路工程技术标准》（JTG B01）的规定，建筑限界内不得有任何部件（包括通风照明、安全监控和内装饰等附属设施）侵入。服务隧道、紧急逃生通道、车行横洞、人行横洞等附属通道的建筑限界及净空断面应根据使用要求确定。

【条文说明】公路盾构隧道的建筑限界，不仅要提供汽车行驶的空间，还要考虑汽车行驶的安全、快捷、舒适和防灾等，因此要求设计中应充分研究各种车道与公路设施之间所处的空间关系，任何部件均不得侵入隧道建筑限界之内。水下隧道建筑限界高度、宽度应根据隧道功能、连接道路的等级确定。建筑限界高度，隧道功能为客货车两用并通行超大型车可取 5.0m；客运为主，货运为辅隧道可取 4.5m。盾构隧道、沉管隧道可不设置紧急停车带、检修道、人行道及车行横通道。

5.4.3 城市道路盾构隧道的建筑限界应根据隧道两端连接道路的等级及交通量组成等因素确定。当隧道为小汽车专用通道时，其建筑限界应通过专项论证，并结合路网、交通管理和行车安全措施确定。

【条文说明】一般情况下，隧道建筑限界高度、宽度应符合现行规范要求。但在盾构隧道中，由于受到工程建设条件的限制，在需设置小汽车专用道时，可经过专题分析论证、专门评审，在能确保隧道行车安全的情况下，慎重选用适当的标准。

5.4.4 隧道内轮廓设计除应符合隧道建筑限界的规定外，还应为隧道通风、照明、消防、监控等营运管理设施及内部装修提供安装空间，同时还应考虑施工误差、测量误差、结构受力变形及后期沉降的影响。

1 盾构隧道的净空断面，与行车限界控制点的间距不宜小于 15cm，与检修（行人）道限界控制点的间距不宜小于 10cm。

2 当有可靠措施可保证结构内轮廓不倾入限界时，富裕量也可适当降低。

【条文说明】盾构隧道的结构内壁与建筑限界角点之间净距，考虑设备管线及被动消防设施安装需要，不宜小于 15cm。当有可靠措施保证盾构隧道结构内轮廓不倾入限界时，富裕量可适当降低。

5.4.5 公路盾构隧道应根据规划区的隧道长度、交通量及交通安全等因素确定检修道的设置方案，并符合以下规定：

- 1 两车道隧道可设置单侧或双侧检修道，三车道隧道不宜设检修道。
- 2 长度大于 1000m 的盾构隧道不宜设置人行道。
- 3 当隧道设计行车速度大于 80km/h 时，检修道宽度不宜小于 1m。
- 4 仅单侧设置检修道的隧道，检修道宜设置隧道左侧或服务隧道（逃生通道）一侧，以方便检修与逃生。
- 5 设有管线管廊的盾构隧道可不设检修道。

【条文说明】本条主要针对隧道防灾与救援及当前工程实例给出的规定。

5.4.6 隧道内检修道（人行道）高度宜为 25~40cm，最大高度不应大于 80cm，并应综合考虑以下因素：1）检修人员（行人）使用时的安全；2）紧急情况时，驾乘人员拿取消防设备方便；3）满足其下放置电缆、光缆、给水管等空间尺寸的要求。当人行道高度大于 40cm 时外侧应设置安全护栏。

【条文说明】检修道的主要功能为：1）养护人员、隧道使用者可以在与交通相互不干扰的情况下处理紧急事件；2）步道的路缘石可以阻止车辆爬上检修道，是步行者的安全限界，同时是保证隧道设备的安全限界；3）从交通管理和安全行走的观点出发，检修道的路缘石可作为驾驶员的行驶方向线；4）检修道除安全功能外，其下部空间还常被用来安装管道、缆线等。根据上述功能，条文中提出检修道高度取值范围和设计原则，一般来讲，单按设计车速考虑，可参照表 5.4.6 取值。

表 5.4.6 步道高度 h

设计速度 (km/h)	100	80	60	40
h(cm)	80-65	65-50	50-40	40

5.4.7 盾构隧道侧向宽度、余宽设置应符合以下规定：

1 左、右两侧侧向宽度取值应符合《公路隧道设计规范》要求。当隧道为城市范围内的新建或改建工程道路时，侧向宽度可按《城市道路工程设计规范》取值。

2 当不设检修道时，应设置不小于 25cm 的余宽。

【条文说明】为了消除或减少隧道边墙给驾驶员带来恐之冲撞的心理影响（“侧墙效应”），保证一定车速的安全通行，应在行车道两侧设置一定宽度的侧向宽度或余宽。

5.4.8 公路盾构隧道横断面布置应符合以下规定：

1 隧道宜采用并行双洞方案。

2 特长盾构隧道宜设置横向联络通道，并利用人行及车行横通道与行车隧道连接。

3 盾构隧道宜利用断面下部空间设置独立逃生通道。

【条文说明】二级路及以下的盾构隧道应采用单洞方案。

5.4.9 设置为并行双洞的盾构隧道的左右洞净距应符合以下规定：

1 隧道不宜小于 1.5 倍开挖直径。

2 在隧道进出口及特殊地段可减小左右洞净距，但应有特殊处置措施。

3 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（直径）的 3 倍。

【条文说明】高速公路、一级公路的水下隧道宜设计为上、下行分离的独立双洞。独立双洞的最小净距，应按对两洞结构彼此不产生有害影响的原则，结合隧道工法、路线线形、围岩地质条件、断面形状、几何尺寸、工期要求等因素确定。盾构法施工的隧道由于影响因素众多，而且十分复杂，采用标准值来明确量化双洞间的最小净距是比较困难的。条文中的取值是根据目前国内外科科研成果、工程实践提出的经验值。

5.4.10 隧道路面横坡，应结合隧道内路面排水方案确定，当隧道单向行车时，应取单面坡，坡度应根据隧道长度，平、纵线形等因素综合分析确定，一般可采用 1.0%-2.0%，且建筑限界底边线与路面重合；当隧道双向行车时，可取双面坡，建筑限界底边线应水平置于路面最高处，并应与路段拱坡顺接过渡。

5.4.11 各级公路隧道建筑限界如图 5.4.11，在建筑限界内不得有任何部件侵入。各级公路隧道建筑限界最小宽度（表中只列两车道隧道）应按表 5.4.11 执行，并符合以下规定：

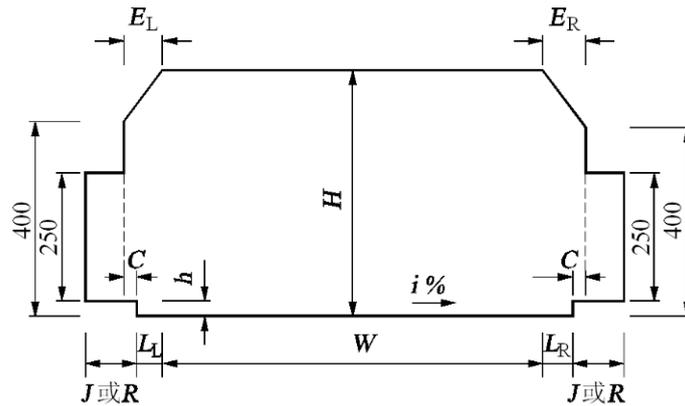


图 5.4.11 公路隧道建筑限界 (单位: cm)

H—建筑限界高度, W—行车道宽度, L_L —左侧向宽度, L_R —右侧向宽度, C—余宽, J—检修道宽度, R—人行道宽度, h—检修道或人行道的高度, E_L —建筑限界左顶角宽度, E_R —建筑限界右顶角宽度, E 应包含余 C。当 $L_L+C \leq 1m$ 时, $E_L=L_L+C$; 当 $L_L+C > 1m$ 时, $E_L=1m$; 当 $L_R+C \leq 1m$ 时, $E_R=L_R+C$; 当 $L_R+C > 1m$ 时, $E_R=1m$ 。

表 5.4.11 公路隧道建筑限界横断面组成最小宽度 (单位: m)

公路等级	设计速度 (km/h)	车道宽度 W	侧向宽度 L		余宽 C	隧道建筑限界净宽
			左侧 L_L	右侧 L_R		
高速公路 (城市快速路)	100	3.75×2	0.50	1.00	0.25	9.50 (9.0)
	80	3.75×2	0.50	0.75	0.25	9.25 (9.0)
	60	3.50×2	0.50	0.75	0.25	8.75 (8.0)
二级公路	80	3.75×2	0.75	0.75	0.25	9.5
	60	3.50×2	0.50	0.5	0.25	8.5
	40	3.50×2	0.25	0.25	0.25	8.0

注: 1.三车道隧道除增加车道数外, 其他宽度同表; 增加车道的宽度不得小于 3.5m。

2.括号里数据为城市快速路的宽度。

3.本表为不设检修道的隧道建筑限界净宽。

【条文说明】公路隧道的建筑界限, 不仅要提供汽车行驶的空间, 还要考虑汽车行驶的安全、快捷、舒适和防灾等, 因此要求设计中应充分研究各种车道与公路之间所处的空间关系, 任何部件 (包括通风、照明、安全、监控和内装等附属设施) 均不得侵入隧道建筑界限之内。

5.4.12 防灾救援通道布置应符合以下规定:

1 人行横通道设置间距宜取 250m, 但不应大于 500m; 设有独立逃生通道的隧道, 人行横通道间距可增加到 800m。

2 车行横通道设置间距宜取 500m, 但不应大于 750m; 设有辅助疏散设施、水喷雾设施、横向排烟设施可取消车行横通道。

4 下滑逃生口设置间距不应大于 50m，疏散楼梯设置间距不应大于 100m。

5 人行横通道及车行横通道内轮廓断面应采用曲墙式断面形式。

【条文说明】除本条文规定外，横向通道还应满足《公路隧道交通工程设计规范》的有关要求。

5.4.13 常见公路盾构隧道典型断面型式见附录 A。

【条文说明】公路隧道的建筑限界，不仅要提供汽车行驶的空间，还要考虑汽车行驶的安全、快捷、舒适和防灾等，因此要求设计中应充分研究各种车道与公路设施之间所处的空间关系，任何部件(包括通风、照明、安全、监控和内装等附属设施)均不得侵入隧道建筑限界之内。

5.5 合理覆盖层厚度确定

5.5.1 隧道的覆土厚度应同时满足施工阶段与运营阶段的安全，并具有经济性，并应满足下列要求：

1 覆土厚度可以满足隧道施工期和运营期隧道抗浮要求；对于水下隧道，还需要考虑可能遭遇的最不利冲刷条件。

2 覆土厚度可以保证在给定的盾构最小支护压力和最大支护压力情况下，保证盾构掘进安全，既能控制开挖面稳定，又能避免水力劈裂。

3 根据合理覆土厚度确定的隧道线形，应能保证隧道具有较高经济效益。

5.5.2 隧道合理的覆盖层厚度应取保证施工期安全要求的覆土厚度 H_s 和运营期要求的合理覆盖层厚度 H_y 之大值，即 $H=\max(H_s, H_y)$ 。 H_s 由本标准 5.5.3 条确定， H_y 由本标准 5.5.4 条确定。

5.5.3 隧道施工期安全要求的覆土厚度 H_s 应保证盾构掘进安全，并满足相应于施工阶段河床冲刷的结构抗浮要求，并应符合下式：

$$H_s=\max(H_j, H_{fs}+H_{cs}) \quad (5.5.3)$$

式中：

H_j 为保证盾构掘进安全的覆盖层厚度

H_{fs} 为施工期满足抗浮要求的覆盖层厚度，

H_{cs} 为施工期河床冲刷深度

【条文说明】隧道运营期安全要求的覆土厚度 H_y 应保证考虑隧址断面处河床在

最不利水沙组合条件下的最大冲刷深度、通航锚击入土安全深度等因素后，隧道仍能满足运营阶段的抗浮安全。通常，锚击入土深度较容易满足， H_y 主要考虑河床冲刷情况下满足抗浮要求，并应符合下式：

$$H_y = H_{fy} + H_{cy} \quad (5.5.4)$$

式中： H_{fy} 为满足运营期抗浮要求的覆盖层厚度，可以按照本标准 9.5 节的规定进行计算。

H_{cy} 为运营期河床冲刷深度，分别考虑工程河段在 100 年一遇与 300 年一遇水沙系列条件下河床的冲刷情况，应根据河工模型试验确定。

5.6 施工组织设计

5.6.1 在盾构隧道设计过程中，应根据项目总体方案、隧道工法、环境条件以及施工工期等制订安全、经济、合理的指导性施工筹划方案，为隧道施工及建设管理提供参考，保障工程的顺利实施。施工筹划应包括建议总工期、标段划分、施工及交通组织、场地布置、便道布置、施工供水供电方案、取土及弃渣场布置、施工进度计划以及环境保护对策等内容。

【条文说明】隧道施工前，应编制施工组织设计，并做好施工准备和组织落实工作。编制时，应根据隧道长度、跨度、工期、地质和自然条件、重点及难点工程、施工方法、施工进度等因素，配备适宜、充足的施工机械，组织均衡生产，提高劳动生产效率。

5.6.2 施工筹划前应对隧道周边环境条件进行广泛深入的收集、调查和核实，以保障施工计划的合理性与可实施性。应包括以下主要内容：

- 1 隧址区域气象、水文条件和航运要求。
- 2 周边交通条件、施工用水及用电条件。
- 3 周边建（构）筑物及地下管线分布情况。
- 4 建筑材料产地、产量及性能。
- 5 周边环境敏感点分布及要求。
- 6 当地环境保护相关的法律法规等。

【条文说明】为确保盾构施工的正常进行，施工前在原设计调查资料的基础上对工程地质及水文地质、地表环境及建（构）筑物、地下管线和地下构筑物、工程用地及施工用电和给排水条件等进行补充调查，为制订施工组织设计提供足

够的依据。

5.6.3 隧道施工工期应根据以下条件综合分析确定：

- 1 项目环境条件，应注意施工场地及敏感建构筑物对施工进度的影响。
- 2 隧道施工工法。盾构隧道只能单向或双向推进。
- 3 长度与断面大小，应注意独头掘进长度、双车道隧道与三车道隧道施工效率的差别。
- 4 地质条件。应充分考虑岩层对盾构隧道的影响。
- 5 建设单位及周边环境要求。

【条文说明】隧道施工安全与建设质量需有合理的施工工期作保证，本条强调隧道合理 施工工期应根据工程实际条件分析确定。

5.6.4 隧道施工标段划分及场地布置应根据以下条件综合分析确定：

- 1 应根据隧道长度、进洞工作面、工期要求等确定施工标段划分或施工场地的布置方案，必要时可设置施工辅助导坑，力求均衡高效。
- 2 应充分考虑便道、施工用水用电以及周边环境等方面对施工的影响，尽可能减少各标段或各施工场地之间的相互干扰。
- 3 施工标段划分应考虑隧道地质条件、隧道纵坡、弃渣场和土石方平衡等综合因素。

【条文说明】施工场地布置应统筹考虑场地大小、形状、周边环境，及现场需要的设备、设施等情况。充分利用施工场地，以达到满足现场施工需要，提高作业效率的目的。为了提高施工的安全性、施工效率，合理布置 施工场地。特别是在市区，由于用地困难，往往很难得到充足的场地。当不能利用地面场地或防止噪声和振动时，可以考虑利用竖井或已施工的结构等。

5.6.5 盾构法施工方案、施工组织设计应包括下列内容：

- 1 施工现场平面布置图；
- 2 盾构机的现场组装、安装及吊装方案；
- 3 工作井的施工方法与检查井的施工方法；
- 4 盾构法施工的临时给水、排水、照明、供电、消防、通风、通讯等设计；
- 5 管片运输、贮存、防水、拼装与一次注浆、二次注浆方案；

6 配套辅助施工机构设备的选型、规格、数量与现场及工作竖井垂直运输及水平运输等机构设备布置；

7 盾构机的入土、穿越土层、出土的条件以及掘进与运土方案；

8 防漏电、防缺氧、防爆、防毒等安全监测和保护措施；

【条文说明】盾构法施工组织设计的主要内容包括：工程地质概况，盾构掘进的施工方法和程序，盾构始发、接收和特殊段的施工技术措施，隧道沿线环境保护技术，主要质量标准及质保措施，安全和文明施工要求，材料用量与使用计划，劳动力组织和计划，施工进度网络计划，施工的主要辅助设备及其使用计划等。

5.6.6 盾构现场设施的平面布置包括：盾构工作竖井、竖井防雨棚及防淹墙、垂直运输设备、管片堆场、管片防水处理场、拌浆站、料具间及机修间、两回路的变配电间、电机车电瓶充电间等设施以及进出通道。一般应遵循以下原则：

1 工作井施工需要采取降水措施时，应设相当规模的降水系统（水泵房）。

2 采用气压法盾构施工时，施工现场应设置空压机房，以供给足够的压缩空气。

3 采用泥水平衡盾构机施工时，施工现场应设置泥浆处理系统（中央控制室）、泥浆池。

4 采用土压平衡盾构施工时，应设置电机车电瓶充电间等设施。

【条文说明】施工场地布置应统筹考虑场地大小、形状、周边环境，及现场需要的设备、设施等情况。充分利用施工场地，以达到满足现场施工需要，提高作业效率的目的。

为了不影响施工进度，材料堆置和仓库应具有可储存管片等衬砌材料、临时设备、施工用具配件等所需要的面积。材料堆放场地的四周应以防护栏或隔墙进行防护。为了便于材料、砂土运输车辆进入，可修筑施工便道。为了防止粉尘，应铺上碎石或简易路面，做好排水设施等，以改善工作条件。

管片的临时放置场地应与盾构计划进度相适应，储存必要的环数，所存管片环数至少应满足3d左右的需要量。根据需要，当临时堆放管片时需要搭设防雨防晒棚，并用罩布覆盖，避免遇水膨胀式止水条受潮，或管片钢材部分生锈。

5.6.7 盾构隧道施工前应结合工程地质特点及断面型式对盾构主机、推进系统、刀盘系统、螺旋输送机、皮带运输机、管片起吊机、管片拼装机、盾尾密封系

统和壁后注浆系统等主要系统进行采购。

【条文说明】盾构机选型一般是在对工程地质、水文地质条件研究的基础上，初选类型一般针对敞开式、半敞开式及密闭式盾构进行。水下盾构法公路隧道由于受水文地质及工程地质条件的影响，一般采用密闭式盾构。对于密闭式盾构，根据地层的渗透系数、颗粒级配、地下水压、环保要求、辅助施工方法、施工安全等因素对土压平衡盾构和泥水平衡盾构进行比选；在确定盾构基本类型后，再根据详细的地质勘察资料，对盾构的主要功能部件（如刀盘结构形式、开口率、刀具种类与配置等）进行选择与设计；然后确定盾构的主要技术参数（如盾构机推力、掘进速度、刀盘扭矩等）；最后结合其他制约因素（如设备采购、施工场地、运输条件、动力条件和资金状况等）通过技术经济综合比选确定盾构参数。

5.6.8 隧道施工用盾构机主机的总重量一般较大，在盾构机设计制造阶段均需结合工程的实际条件，进行分块设计。一般需考虑以下几个因素：

1 盾构机进入施工现场的运输。必须调查陆运沿途道路状况，特别要考虑所经桥梁的承载力、限高、限宽等因素；

2 进场后的下井吊装及调试。这主要考虑可供使用场地的大小、起吊设备的能力以及两者之结合；

3 转场或转入新工程的施工。此时需要考虑的影响因素与前两项相同。盾构机分块组装的质量，宜满足可能多次转场解体的要求。

5.6.9 盾构组装前必须制定详细的组装方案与计划，同时组织有经验的经过技术培训的人员组成组装班组。盾构组装前应准备组装所需工种及人员配备、盾构机组装所需机具、电力供应设备、盾构机组装期间的通讯设备及组装所需材料等。并注意以下事项：

1 组装前应对始发基座进行精确定位。

2 履带吊机工作区应铺设钢板，防止地层不均匀沉陷。

3 大件组装时对始发井端头墙进行严密的观测，掌握其变形与受力状态。

4 盾构机吊装由具有资历的专业队伍负责起吊。

5.6.10 盾构机调试分空载调试和负荷调试，空载调试主要内容为：液压系统，润滑系统，冷却系统，配电系统，注浆系统，以及各种仪表的校正。着重观测刀盘转动和端面跳动是否符合要求。负荷调试的主要目的是检查各种管线及密

封的负载能力。使盾构机的各个工作系统和辅助系统达到满足正常生产要求的工作状态。通常试掘进时间即为对设备负载调试时间。负荷调试时将采取严格的技术和管理措施保证工程安全、工程质量和工程精度。

- 1 根据电气线路图以及配电箱说明书进行电气线路的检查。
- 2 根据液压配线图及各连接图进行液压管线的检查。
- 3 根据辅助系统的配管图以及各部件的连接图和使用说明书进行辅助系统管线的检查。
- 4 确认集中润滑和盾尾油脂管线的正确性。
- 5 确认水、气路管线连接的正确性。

【条文说明】盾构调试包括各系统调试及整机调试(空载运行),是盾构试掘进(负载运行)前的一项重要工作。应制订详细的调试方案,确定合格验收标准,按规范与合同要求进行,确保各系统正常运行及盾构正常运行。

盾构组装完毕并确定无误后,即可进行空载调试。主要调试内容为液压系统、润滑系统、冷却系统、配电系统、注浆系统,以及各种仪表、传感器的校正。

(1)空载调试证明盾构具有工作能力后,即可进行负载调试。负载调试的主要目的是检查各种管线及密封的负载能力,使盾构的各个工作系统和辅助系统达到满足正常生产要求的工作状态。通常试掘进时间即为对设备进行负载调试的时间。

(2)负载调试时采取严格的技术和管理措施保证工程安全、质量和工作精度,调试按系统进行,即对电气、液压、机械三大部分进行调试。

(3)各系统调试完成后,应进行整机联机运转调试

(4)盾构试掘进 100m 调试。在试掘进过程中,对各参数进行调整。

5.6.11 管片与预制件宜采用工厂化生产,施工前应复核设计图纸和资料,熟悉管片项目有关技术标准、规范的要求,结合施工条件、气候条件,编制管片生产实施性施工组织设计,并对施工方案进行充分论证和优化。管片生产工艺流程图如下:

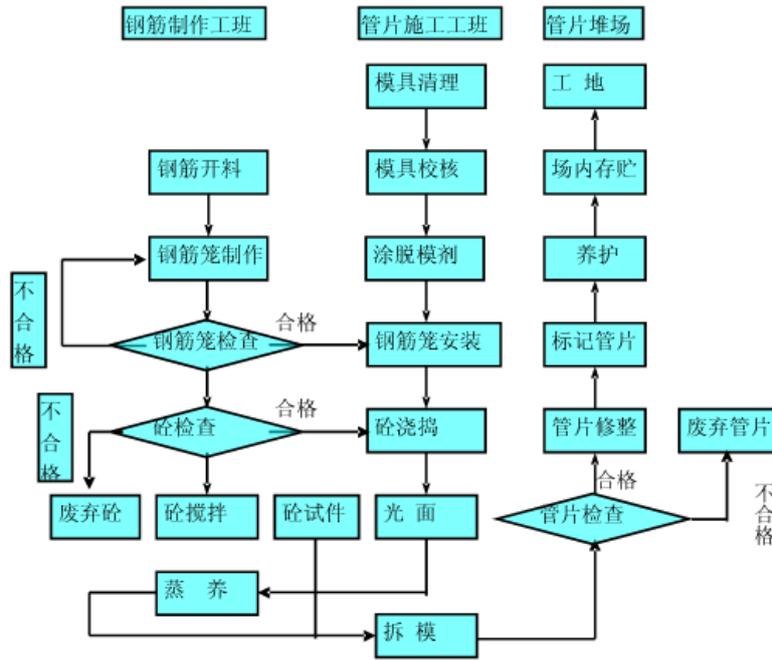


图 5.6.11 管片生产工艺流程图

【条文说明】无论采用何种方式进行管片生产，技术方案和生产计划的接力编制都是生产获得成功的重要方面，由于各地的施工条件、气候条件等不尽相同，因此生产控制措施也存在很大的差异，需要在施工前应复核设计图纸和资料，熟悉管片项目有关技术标准、规范的要求，编制施工组织设计。

5.6.12 在施工现场临时设施布置时，应服从于环保要求，满足水土保持的要求，选用科学合理，简单易行的方法，采取有力的措施，做好施工区的环境保护工作，防止由于工程施工而造成施工区及周边地区环境遭到破坏，实现环境保护目标。

1 噪音排放应符合《城市区域环境噪声排放标准》的 I 类标准，施工场内宜使用低噪音设备，在居民区附近禁止夜间使用高噪声机械设备，减少深夜运输，避免影响居民休息。对施工人员进行文明施工教育。

2 水环境保护是工程环保的重点，应将生活污水、修理机械废水、洗车废水经过沉淀净化后排入现况污水管线内。对于场区雨水、施工降水、泥浆池及盾构机产生的废水，应设立清理沉淀池，以保持沉淀系统的功能发挥，保持流入河道水的清洁。

3 施工时尽量使用低能耗、低污染排放的机械、车辆。加强车辆管理、维修保养，选用对大气影响小的燃料，以减少空气中污染物排放。

4 修建临时设施、道路应避让林地、草地，尽可能保护树木并将其移栽。

5 为达到防治水土流失，对于草地、林地的地段，在基坑开挖时，先将表层植被土剥离，单独存放，以备完工后土地复垦之用。对于场区内空地要进行临时绿化或混凝土面层硬化处理，以保持水土稳定、减少水土流失。

【条文说明】按照环境保护相关的法律法规和地方政府的措施制度，应该切实做到建设以防，建好一方，保护一方。

征求意见稿

6 建筑材料

6.1 一般规定

6.1.1 公路盾构隧道的工程材料应根据结构类型、受力条件、施工工艺、使用要求和所处环境等因素选用，并考虑可靠性、耐久性和经济性，主要受力结构应优先选用钢筋混凝土材料，有特殊需要时可采用金属材料或其他复合材料。

6.1.2 混凝土的原材料和配比、最低强度等级、抗渗指标等应符合耐久性要求，并满足抗裂、抗渗、抗冻和抗侵蚀的需要。一般环境条件下盾构隧道管片结构混凝土强度等级不低于 C50，二次衬砌混凝土强度等级不低于 C35，其余内部结构混凝土强度等级不低于 C30。

【条文说明】根据目前国内公路大直径盾构隧道管片混凝土强度等级统计，结合铁路、地铁等不同行业盾构管片混凝土强度等级要求，结合抗渗及耐久性，要求管片结构混凝土强度等级不低于 C50。二次衬砌结构作为安全储备及防水层，按照 I-C 环境作用等级考虑，强度等级不低于 C35。其余内部结构如口型件、电缆槽、烟道板、牛腿等，环境作用等级为 I-A，可按强度等级不低于 C30。

6.1.3 普通钢筋混凝土结构中的钢筋、预应力混凝土中的非预应力钢筋，宜采用 HPB300、HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500、RRB400 钢筋；预应力混凝土结构中的预应力筋宜采用预应力钢丝、钢绞线，中小型构件或竖、横向用预应力钢筋，可选用预应力螺纹钢筋。

【条文说明】根据国家“四节一环保”要求，提倡应用高强、高性能钢筋。根据混凝土构件对受力性能要求，规定了各种牌号钢筋的选用原则。现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB 1499.2 中，已不再列入 HRBF335 钢筋和 HRB335 钢筋；对 HPB300 光圆钢筋从产品供应与实际应用中已基本不采用直径不小于 16mm 的规格。

6.1.4 钢管片宜选用 Q235、Q345 钢及以上，球墨铸铁管片宜选用 QT400。

6.1.5 连接件的机械性能等级宜选用 4.6、5.8、6.8 和 8.8 级，应有较好耐腐蚀性和抗冲击韧性，表面应进行防腐蚀处理。

6.1.6 管片结构应采用防水混凝土，抗渗等级不低于 P8，且应满足现行《地下工程防水技术规范》（GB 50108）的抗渗等级要求。

6.2 混凝土

6.2.1 混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 应按表 6.2.1 采用。

表 6.2.1 混凝土强度标准值 (MPa)

强度种类	强度等级											
	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{ck}	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
f_{tk}	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64	2.74	2.85	2.93	2.99	3.05	3.11

注：计算现浇钢筋混凝土轴心受压和偏心受压构件时，如截面长边或直径小于 30cm 时，表中强度值应乘以系数 0.8，当构件质量(混凝土成型、截面和轴线尺寸等)确有保证时可不受此限制；当混凝土采用离心法成型或养护温度超过 60℃ 时，其强度应专门研究。

6.2.2 混凝土轴心抗压强度标准值 f_{cd} 和轴心抗拉强度标准值 f_{td} 应按表 6.2.2 采用。

表 6.2.2 混凝土强度设计值 (MPa)

强度种类	强度等级											
	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{cd}	11.5	13.8	16.1	18.4	20.5	22.4	24.4	26.5	28.5	30.5	32.4	34.6
f_{td}	1.23	1.39	1.52	1.65	1.74	1.83	1.89	1.96	2.02	2.07	2.10	2.14

6.2.3 混凝土受压或受拉时的弹性模量 E_c 应按表 6.2.3 采用，剪切弹性模量可按照表 6.2.3 中的数值乘以 0.40 采用，泊松比可采用 0.2。当温度在 0℃ 到 100℃ 范围内时，混凝土线膨胀系数 α_c 可采用 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

表 6.2.3 混凝土的弹性模量 (GPa)

混凝土强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
E_c	25.5	28.0	30.0	31.5	32.5	33.5	34.5	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0

注：当采用引气剂及较高砂率的泵送混凝土且无实测数据时，表中 C50~C80 的 E_c 值应乘以折减系数 0.95。

6.2.4 防水混凝土所选用的材料应满足表 6.2.4 的规定。

表 6.2.4 防水混凝土选材指标或要求

材料名称	项目	指标或要求
水泥	品种	硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、其它应通过试验确定
	用量 (kg/m^3)	≥ 260
粉煤灰	级别	$\geq \text{II}$ 级
	烧失量	$\leq 5\%$
	用量	$(20\% \sim 30\%) \times \text{胶凝材料总量}$
硅粉	比表面积 (m^2/kg)	≥ 15000
	二氧化硅含量	$\geq 85\%$
	用量	$(2\% \sim 5\%) \times \text{胶凝材料总量}$

粒化高炉矿渣粉	品质	符合《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046
石子	粒径 (mm)	≤40
	吸水率	≤1.5%
	品种	非碱活性
	品质	符合《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》JGJ 53
砂	品种	中粗砂、不宜采用海砂
	品质	符合《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》JGJ 52
总碱量 (Na ₂ O 当量) (kg/m ³)		≤3
氯离子含量		≤0.1%×胶凝材料总量
胶凝材料总量 (kg/m ³)		≥320, 当强度要求高或地下水有腐蚀性时, 由试验确定。
水胶比		≤0.5
其它掺入材料		试验确定, 并符合国家相关技术标准。

注: 其它掺入材料指减水剂、膨胀剂、防水剂、密实剂、引气剂、复合型外加剂、水泥基渗透结晶型材料、合成纤维或钢纤维。

6.3 钢筋

6.3.1 普通钢筋的抗拉强度标准值 f_{sk} 、抗拉强度设计值 f_{sd} 、抗压强度设计值 f_{sd}' 应按表 6.3.1 采用。

表 6.3.1 普通钢筋强度标准值 (MPa)

种类	符号	公称直径 (mm)	f_{sk}	f_{sd}	f_{sd}'
HPB300	Φ	d=6~14	300	250	250
HRB400 HRBF400 RRB400	Φ _F Φ _R	d=6~50	400	330	330
HRB500 HRBF500	Φ _F	d=6~50	500	415	400

6.3.2 预应力钢筋的抗拉强度标准值 f_{pk} 应按表 6.3.2-1 采用, 抗拉强度设计值 f_{pd} 、抗压强度设计值 f_{pd}' 应按表 6.3.2-2 采用。

表 6.3.2-1 预应力钢筋抗拉强度的标准值 (MPa)

种类	符号	直径(mm)	f_{pk}	f_{pd}	f_{pd}'
钢绞线	1×7 (七股) Φ _S	d=9.5、12.7、 15.2、17.8	1720、1860、 1960		
		d=21.6	1860		
消除应力钢丝	光面 螺旋 肋 Φ _P Φ _H	d=5	1570、1770、 1860		
		d=7	1570		
		d=9	1470、1570		
预应力螺纹钢筋	Φ _T	d=18、25、32、 40、50	785、930、 1080		

表 6.3.2-2 预应力钢筋抗拉、抗压强度的设计值 (MPa)

种类	f_{pk}	f_{pd}	f_{pd}'
钢绞线 1×7(七股)	1720	1170	390
	1860	1260	
	1920	1330	
消除应力钢丝	1470	1000	410
	1570	1070	
	1770	1200	
	1860	1260	
预应力螺纹钢筋	785	650	400
	930	770	
	1080	900	

6.3.3 普通钢筋和预应力钢筋的弹性模量 E_s 应按表 6.3.3 采用。

表 6.3.3 钢筋的弹性模量 (GPa)

种类	弹性模量 E_s
HPB300 钢筋	210
HRB400、HRB500 钢筋 HRBF400、HRBF500 钢筋 RRB400 钢筋 预应力螺纹钢筋	200
消除应力钢丝	205
钢绞线	195

6.3.4 玻璃纤维筋(GFRP 筋)强度标准值及弹性模量应符合表 6.3.4 的规定。

表 6.3.4 GFRP 筋的力学参数项目

强度种类	抗拉强度标准值 (MPa)	剪切强度标准值 (MPa)	伸长率 (%)	弹性模量 (GPa)
代号	f_{kf}	f_{vf}	ε_f	E_f
d < 16mm	≥600	≥110	≥1.8	≥40
16mm ≤ d < 25mm	≥550		≥1.5	
25mm ≤ d < 34mm	≥500			
d > 34mm	≥480		≥1.3	

注：1 玻璃纤维筋的表面质地应均匀、无气泡、裂纹及其它缺陷。

2 GFRP 筋弯曲加工应在工厂进行。

3 GFRP 筋密度可按 1.9~2.1g/cm³ 采用。

6.3.5 混凝土的拉压强度、钢筋及 GFRP 筋的抗拉强度，其标准值保证率均不应不
低于在 95%。

6.4 紧固件

6.4.1 盾构管片及其它预制构件间螺栓等紧固件的连接形式及其机械性能等级应
满足构造及结构受力要求，表面应进行防腐蚀处理，并应达到规定的耐久性。

常用螺栓等级的物理性质可参见表6.4.1。

表 6.4.1 常用螺栓的机械和物理性能

机械或物理性能		性能等级								
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9
							d≤16	d>16	d≤16	
抗拉强度 R_m /MPa	公称	400		500		600	800		900	1000
	min	400	420	500	520	600	800	830	900	1040
下屈服强度 R_{el}^d /MPa	公称	240		300						
	min	240		300						
规定非比例延伸 0.2% 的应力 $R_{p0.2}$ /MPa	公称						640	640	720	900
	min						640	660	720	940
紧固件实物的规定非比例延伸 0.0048d 的应力 R_{Pf} /MPa	公称		320		400	480				
	min		340		420	480				

注：螺栓性能等级代号点左边的数字表示公称抗拉强度的 1/100，单位 MPa；点右边的数字表示公称的下屈服强度或相应比例延伸对应的应力与公称抗拉强度的比值的 10 倍。

6.4.2 螺栓连接的强度设计值根据螺栓的抗拉强度换算确定，其中普通螺栓根据公称抗拉强度换算确定，高强度螺栓（8.8及以上等级）根据最小抗拉强度换算确定，具体参见表6.4.2。

表 6.4.2 常用螺栓的强度设计值 (MPa)

强度设计值	性能等级								
	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9
						d≤16	d>16	d≤16	
抗拉 f_t^b	170	170	210	210	250	385	400	430	480
抗剪 f_v^b	140	140	190	190	230	240	250	270	300

6.4.3 螺母的性能等级不应低于与其相配的螺栓等级，确保螺栓螺母组合件的应力高于螺栓的屈服强度或保证应力。

6.4.4 螺母的机械性能包括保证应力（或保证荷载）和维氏硬度两个指标，普通螺栓和高强度螺栓相配的螺母机械性能应符合表6.4.4-1~6.4.4-2。

表 6.4.4-1 螺母的保证应力 (MPa)

性能等级	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9
						d≤16	d>16	d≤16	
保证应力(公称) S_p^f /MPa	225	310	280	380	440	580	600	650	830

表 6.4.4-2 螺母硬度 (HV30) 的规定

性能等级	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9
						d≤16	d>16	d≤16	

螺母 硬度	min	120	130	155	160	190	250	255	290	320
	max	220	220	220	220	250	320	335	360	380

6.4.5 高强度螺栓所配用的垫圈的硬度为329~436 HV30。

6.5 防水材料

6.5.1 盾构隧道采用的弹性橡胶密封垫成品的物理性能指标应满足下表 6.5.1 的要求。弹性橡胶密封垫是通过氯丁橡胶或三元乙丙橡胶制成的特殊断面，借助橡胶体压缩应力反弹弹性实现止水。

表 6.5.1 弹性橡胶密封垫成品物理性能

项 目		指标		
		氯丁橡胶	三元乙丙橡胶	
硬度（邵尔 A）（度）		50±5~60±5	I 型	II 型
			50±5~60±5	60±5~70±5
拉伸强度（MPa）		≥10.5	≥9.5	≥10
拉断伸长率（%）		≥350	≥350	≥330
压缩永久 变形 ^o /%	70°C×24 ₂ h，压缩 25%	≤30	≤25	≤25
	23°C×72 ₂ h，拉伸 25%	≤20	≤20	≤15
热空气老化 70°C×96h	硬度变化（度）	≤8	≤6	≤6
	拉伸强度降低率（%）	≤20	≤15	≤15
	拉断伸长率降低率（/%）	≤30	≤30	≤30
防霉等级		不低于二级	不低于二级	不低于二级

注：I 型为无孔密封垫，II 型为有孔密封垫。

6.5.2 盾构隧道采用的遇水膨胀橡胶密封垫胶料的物理性能应满足表 6.5.2 的要求。遇水膨胀橡胶密封垫是具有遇水膨胀特性的橡胶类弹性体制成，借助弹性体反弹弹性及与水反应产生的膨胀应力及膨胀后的体积增加来实现止水。

表 6.5.2 遇水膨胀橡胶密封垫胶料物理性能

项 目		技术指标	
硬度（邵尔 A）（度）		42±10	45±10
拉伸强度（Mpa）		≥3.5	≥3
拉断伸长率（%）		≥450	≥350
体积膨胀倍率（%）		≥250	≥400
反复浸水试验	拉伸强度（/Mpa）	≥3	≥2
	拉断伸长率（%）	≥350	≥250
	体积膨胀倍率（%）	≥250	≥300
低温弯折(-25°C×2h)		无裂纹	无裂纹

注：①成品切片测试应达到本指标的 80%；

②接头部位的拉伸强度指标不得低于本指标的 50%；

③体积膨胀倍率是浸泡后与浸泡前的试样质量的比率；

④低温弯折的试样条件为-25°C下 2h。

6.5.3 复合密封垫弹性橡胶物理性质指标应符合表 6.5.1 的规定，遇水膨胀橡胶物理性能指标应符合表 6.5.2 的规定。

6.5.4 盾构隧道采用的遇水膨胀止水胶的物理性能应满足表 6.5.4 的要求。遇水膨胀止水胶是以聚氨酯预聚体为基础、含有特殊接枝的脲烷膏状体，固化成形后具有遇水体积膨胀密封止水作用。

表 6.5.4 遇水膨胀止水胶的物理性能

项目		指标	
		PJ-220	PJ-400
固含量/%		≥85	
密度/(g/cm ³)		规定值±0.1	
下垂度/mm		≤2	
表干时间/h		≤24	
7d 拉伸粘结强度/MPa		≥0.4	≥0.2
低温柔性		-20℃, 无裂纹	
拉伸性能	拉伸强度/MPa	≥0.5	
	断裂伸长率/%	≥400	
体积膨胀倍率/%		≥220	≥400
长期浸水体积膨胀倍率保持率/%		≥90	
抗水压/MPa		1.5, 不渗水	2.5, 无渗水
实干厚度/mm		≥2	
浸泡介质后体积膨胀倍率保持率/%	饱和 Ca(OH) ₂	≥90	
	5%NaCl 溶液	≥90	
有害物质含量	VOC/(g/L)	≤200	
	游离甲苯二异氰酸酯 TDI/(g/kg)	≤5	

6.6 防火材料

6.6.1 盾构隧道管片结构、排烟道结构及其它有防火要求的内部结构可采用防火涂料来提高结构的耐火极限，防火涂料不应掺加石棉等对人体有害的物质，涂层实干后不应有刺激性气体，防火涂料的技术要求应满足表 6.6.1。

表 6.6.1 隧道防火涂料的技术要求

检验项目	技术指标	缺陷分类
在容器中的状态	经搅拌后呈均匀稠厚流体，无结块	C
干燥时间（表干）/h	≤24	C
黏结强度/MPa	≥0.15	A
干密度/(kg/m ³)	≤700	C
耐水性/h	≥720, 试验后，涂层不开裂、起层、脱落，允许轻微发胀和变色	A
耐酸性/h	≥360, 试验后，涂层不开裂、起层、脱落，允许轻微发胀和变色	B
耐碱性/h	≥360, 试验后，涂层不开裂、起层、脱落，允许轻微发胀和变色	B
耐湿热性/h	≥720, 试验后，涂层不开裂、起层、脱落，允许轻微发胀和变色	B
耐冻融循环试验/次	≥15, 试验后，涂层不开裂、起层、脱落，允许轻	B

	微发胀和变色	
产烟毒性	不低于 GB/T 20285-2006 规定产烟毒性危险分级 ZA ₁ 级	B
耐火性能/h	≥2.00 (标准升温)	A
	≥2.00 (HC 升温)	
	升温≥1.50, 降温≥1.83 (RABT 升温)	

注：①A 为致命缺陷，B 为严重缺陷，C 为轻缺陷；

②试验参照 GB 28375-2012。

6.6.2 盾构隧道管片结构也可采用防火保护板来提高耐火极限，防火保护板分为单一隧道防火保护板和复合隧道防火保护板，复合隧道防火板的饰面板若为金属材料，应对金属面板进行防腐处理，防火保护板的技术指标应满足表 6.6.2。

表 6.6.2 隧道防火涂料的技术要求

项目		技术指标	缺陷分类
尺寸	长度/mm	≤3000, 偏差±3	C
	宽度/mm	≤1250, 偏差±3	C
	厚度/mm	≤70, 5≤d<10, 偏差±1.0; 10≤d<20, 偏差±1.3; 20≤d<30, 偏差±1.5; d≥30, 偏差±2.0。	C
	边缘平直度	<0.3%, 与参考直线最大距离<0.3%	C
面密度/(kg/m ²)		≤25	C
抗弯强度	干态/MPa	≥6	B
	吸水饱和/MPa	≥干态抗弯强度×70%	B
吸湿变形率/%		≤0.2	B
抗反卤性		试验后板材无水珠, 无返潮。	B
产烟毒性		不低于 GB/T 20285-2006 规定产烟毒性危险分级 ZA ₁ 级	B
耐水性/h		≥720, 试验后, 板材不开裂、起层、脱落, 允许轻微发胀和变色	B
耐酸性/h		≥360, 试验后, 板材不开裂、起层、脱落, 允许轻微发胀和变色	B
耐碱性/h		≥360, 试验后, 板材不开裂、起层、脱落, 允许轻微发胀和变色	B
耐湿热性/h		≥720, 试验后, 板材不开裂、起层、脱落, 允许轻微发胀和变色	B
耐冻融循环试验/次		≥15, 试验后, 板材不开裂、起层、脱落, 允许轻微发胀和变色	C
耐盐雾腐蚀性试验/次		≥30, 试验后, 板材不开裂、起层、脱落, 允许轻微发胀和变色; 如面板为金属材料, 其金属表面应无锈蚀。	B
燃烧性能	燃烧增长速率指数/(W/s)	≤250, 根据 GB/T 20284	B
	600s 内总热释放量/MJ	≤15, 根据 GB/T 20284	
	火焰横向蔓延长度/m	未达到试样边缘, 根据 GB/T 20284	
	火焰高度/mm	≤150, 试验方法根据 GB/T 8626	
吸水率/%		≤12	C
耐火性能	标准升温/h	≥2.00	A
	HC 升温/h	≥2.00	

项目	技术指标	缺陷分类
RABT 升温/h	升温 ≥ 1.50 ，降温 ≥ 1.83	

注：①A 为致命缺陷，B 为严重缺陷，C 为轻缺陷；

②试验参照 GB 28376-2012。

6.7 装饰材料

6.7.1 隧道装饰材料除嵌缝材料外，应采用燃烧等级为 A 级的不燃性材料。

6.7.2 隧道侧墙装饰材料宜采用高强、防火、防水、耐腐蚀、耐洗刷、耐久性好的材料，漫反射系数不宜小于 70%。

6.7.3 隧道侧墙装饰材料耐久年限宜达到 25 年以上。

6.7.4 隧道内装饰材料在日常使用及高温下不得分解出有毒、有害气体。

6.7.5 隧道内装饰材料主要有涂料、瓷砖和装饰板。装饰板的种类较多，有铝塑复合板、纤维混凝土板、搪瓷钢板等。隧道内装饰材料类型的选择可参考表 6.7.5 的性能比较。

表 6.7.5 装饰材料性能比较

材料类型	涂料	瓷砖	铝塑复合板	纤维混凝土板	搪瓷钢板
表面涂层	表面粗糙	无表面涂层，表面光滑	表面喷涂氧化膜或喷塑处理，表面光滑	多种材料合成，表面光滑	优质钢板与非金属材料合成，表面光滑
颜色选择	颜色单一	浅色	较丰富	较丰富	丰富
光反射性	光泽暗淡	漫反射	光泽中到高	漫反射，有吸光效果	光泽较高，有一定眩光效应
降噪性能	好	差	不好	不好	一般
抗腐蚀性	差	一般	一般	优异	优异
耐火性	不燃或阻燃	不燃	高温下变软熔化	不燃	不燃
有害气体	不产生	不产生	产生碳化烟雾	不产生	不产生
抗冲击性	一般	差	较差，易变形	一般	优异
防潮防水	一般	一般	不好	好	较好
使用寿命	≥ 20 年	≥ 5 年	≥ 10 年	≥ 20 年	≥ 30 年
安装	直接涂刷，方便	较方便，现场拼接	较方便，材料轻便，现场切割	不方便，材料笨重，现场切割	安装复杂，工厂成型，现场无法切割
拆卸更换	易重新涂刷	容易拆卸	容易拆卸	容易拆卸	不易拆卸
维护养护	不易污染，易清洗	易污染，不易清洗	易污染，清洗时易变形	不易污染，易清洗	不易污染，易清洗
价格	低	中等	稍高	高	极高
性价比	高	高	中等	中等	低

6.7.6 隧道内涂料、瓷砖、铝塑复合板、搪瓷钢板的性能指标应满足表 6.7.6-

1~6.7.6-4。

表 6.7.6-1 隧道内装饰涂料的性能指标

项目	性能指标
外观	均匀流体
颜色	白、黄、灰、棕、蓝等
干燥时间	≤1.5h
耐水性能	≥96h
耐碱性能	≥48h

表 6.7.6-2 隧道内装饰瓷砖的性能指标

项目	性能指标
吸水率	0.5%~1.5%
可见光反射率	0.7~0.75
抗热震性	20 次抗热震性试验不出现炸裂或裂纹
抗冻性	经-5℃~15℃，130 次循环无裂纹或剥落

表 6.7.6-3 隧道内装饰铝塑复合板的性能指标

项目		技术要求	
弯曲弹性模量/MPa		≥2.0×10 ⁴	
贯穿阻力/KN		≥7.0	
剪切强度/MPa		≥22.0	
剥离强度/ (N•mm/mm)	平均值	≥130	
	最小值	≥120	
耐温差性	剥离强度下降率/%		≤10
	涂层附着力/级	划格法	0
		划圈法	1
	外观		无变化
热膨胀系数/℃ ⁻¹		4.00×10 ⁻⁵	
热变形温度/摄氏度		95	
耐热水性		无异常	

表 6.7.6-4 隧道内装饰搪瓷钢板的性能指标

项目	规定
耐盐水性	不生锈
耐酸性	2 级及以上
耐碱性（定性）	不失光
光泽度	高光≥85，亚光 60~85
密着性	网状以上
耐磨性	无明显擦伤
耐硬物冲击性	瓷面无裂纹，无掉瓷
耐软重物撞击性能	板面无明显变形，瓷面无裂纹
抗风压性能	瓷面无裂纹，板面无明显变形，背衬不折断或开裂，挂件不松动

注：①耐软重物撞击性能指标值由隧道内车速及车辆类型确定，但不宜小于 300N•m。

②抗风压性能指标值由隧道内风压确定，但不应小于 1.0kPa。

6.7.7 纤维混凝土板分为低密度、中密度和高密度板，隧道行车道两侧的装饰板

应采用高密度纤维混凝土板，其它部位可根据需要采用低、中密度纤维混凝土板。不同密度的纤维混凝土板的物理性能指标应满足表 6.7.7。

表 6.7.7 隧道内装饰纤维混凝土板的物理性能指标

类别	密度 D (g/cm ³)	吸水率 (%)	含水率 (%)	不透水性	湿胀性 (%)	不燃性	抗冻性
低密度	0.8~1.1	-	≤12	-	蒸压养护制品 ≤0.28, 蒸气养护制品≤0.50	A级	-
中密度	1.1~1.4	≤40	-	24h 检验允许板反面出现湿痕, 但不得出现水滴			-
高密度	1.4~1.7	≤28	-				经 25 次冻融循环不得出现破裂、分层

6.7.8 纤维混凝土板根据抗折强度分为I、II、III、IV、V五个等级，隧道行车道两侧的装饰板的抗折强度应根据需要设计，且不宜低于IV级。

表 6.7.8 纤维混凝土板的抗折强度分级

强度等级	抗折强度	
	气干状态	饱和状态
I	4	-
II	7	4
III	10	7
IV	16	13
V	22	18

6.8 其它材料

6.8.1 管片内侧嵌缝可采用聚硫、聚氨酯、硅酮密封膏等柔性填料来密封，嵌缝密封材料的技术指标应满足表 6.8.1。

表 6.8.1 嵌缝密封材料的技术指标

项目		单位	指标
浸泡质量损失率 常温×3600h	水	%	≤2
	饱和 Ca(OH) ₂ 溶液	%	≤2
	10%NaCl 溶液	%	≤2
拉伸黏结性能	常温, 干燥	断裂伸长率	≥125
		黏结性能	不破坏
	常温, 浸泡	断裂伸长率	≥125
		黏结性能	不破坏
	低温, 干燥	断裂伸长率	≥50
		黏结性能	不破坏
300 次冻融循环	断裂伸长率	≥125	
	黏结性能	不破坏	
流动止水长度		mm	≥130

流淌值（下垂度）	mm	≤2
施工度（针入度）	mm	≥10
密度	g/cm ³	≥1.15

注：①常温指（23±2）℃，低温指（-20±2）℃；

②气温温和地区可以不做低温试验、冻融循环试验。

6.8.2 植筋锚固材料宜采用改性环氧树脂作为胶粘剂，主要构件间植筋连接应采用 A 级，次要构件间植筋连接可采用 B 级，胶粘剂的安全性能指标应满足表 6.8.2-1，界面剂用胶粘剂的安全性能指标应满足表 6.8.2-2。

表 6.8.2-1 锚固用胶粘剂的安全性能指标

性能项目		性能要求		试验方法标准
		A 级	B 级	
胶体性能	劈裂抗压强度/MPa	≥8.5	≥7.0	GB 50367-2006
	抗弯强度/MPa	≥50	≥40	GB/T 2570
	抗压强度/MPa	≥60	≥60	GB/T 2569
粘结能力	钢-钢（钢套筒法）拉伸抗剪强度标准值/MPa	≥16	≥13	GB 50367-2006
	约束拉拔条件下带肋钢筋与混凝土的粘结强度/MPa（C30，Φ25，l=150mm）	≥11	≥8.5	GB 50367-2006
不挥发物含量（固体含量）（%）		≥99	≥99	GB/T 2793

表 6.8.2-2 界面剂用胶粘剂的安全性能指标

性能项目		性能要求	试验方法标准
胶体性能	抗拉强度/MPa	≥40	GB/T 2568
	受拉弹性模量/MPa	≥2500	
	伸长率/%	≥1.5	
	抗弯强度/MPa	≥50，且不得呈脆性（碎裂状）破坏	GB/T 2570
	抗压强度/MPa	≥70	GB/T 2569
粘结能力	钢-钢拉伸抗剪强度标准值/MPa	≥14	GB/T 7124
	钢-钢不均匀撤离强度 KN/m	≥20	GJB 94
	与混凝土的正拉粘结强度/MPa	≥2.5，且为混凝土内聚破坏	GB 50367-2006
不挥发物含量（固体含量）（%）		≥99	GB/T 2793

7 衬砌及管内结构

7.1 管片类型

7.1.1 盾构隧道管片类型可划分为箱型管片与平板型管片两种基本类型，公路盾构隧道宜采用平板型管片，管片结构一般采用钢筋混凝土结构。

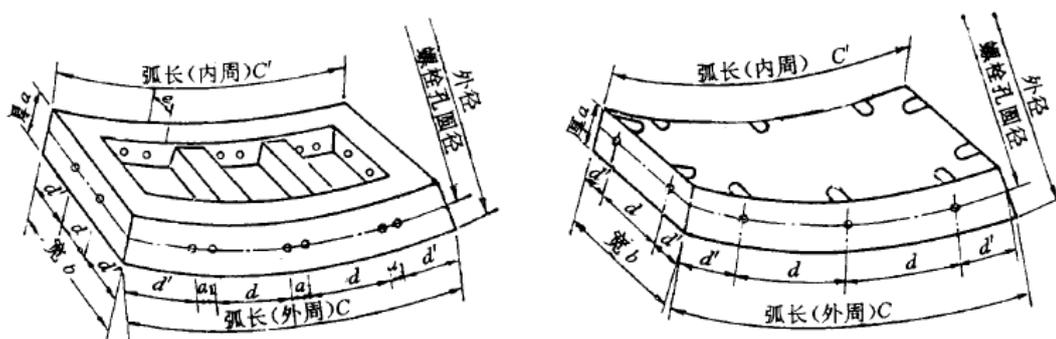


图 7.1.1 管片衬砌类型（左-箱型管片、右-平板型管片）

7.1.2 铸铁管片质量轻、搬运安装较方便，管片强度高，但由于耗费金属量大、机械加工量大、造价高，特别是具有脆性破坏的特性，一般不宜用作永久性隧道衬砌。

7.1.3 钢管片由型钢或钢板加工而成，具有强度高、延性好，质量轻的特点，但由于管片刚度较小、耐腐蚀性差、造价高、耗费金属量大等特点，一般仅适宜在联络通道、废水泵房等特殊场合采用。

7.1.4 盾构段进出洞、联络通道处、变形缝处或其他需加强连接的特殊部位，应允许在一般类型管片结构基础上增加预埋措施，但需结合管片预制方式一并考虑。

7.1.5 盾构隧道管片结构一般要求采用高精度预制构件；特殊部位设置了二次衬砌的隧道段，二次衬砌可采用现浇钢筋混凝土衬砌类型。

7.2 楔形环类型

7.2.1 公路盾构隧道应考虑管片种类、环宽、直径、曲线半径、曲线区间楔形管片环使用比例、管片制作的方便性、盾尾操作空隙因素综合确定管片楔形量。

7.2.2 一般隧道段，公路盾构隧道宜设置为错缝拼装结构，管片环类型可采用通用楔形环、直线环+转弯环等组合形式，在盾构设备允许的条件下优先选用通用

楔形环类型。

7.2.3 管片楔形量设置形式可选用单侧楔形或两侧楔形，宜采用两侧楔形的设计方案，如图 7.2.3 所示。

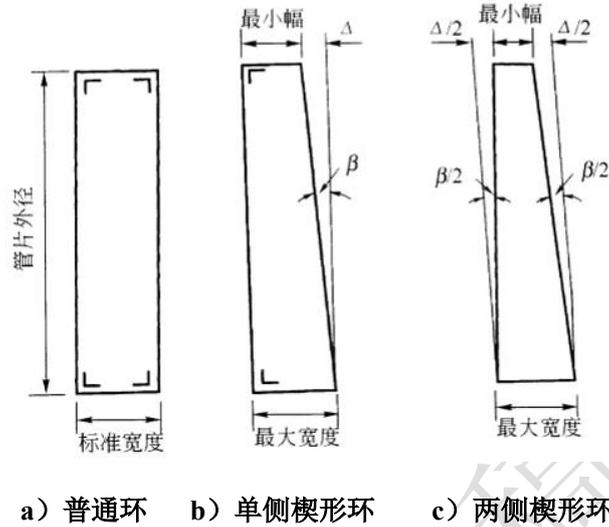


图 7.2.3 楔形衬砌环（ β -楔形角、 Δ -楔形量）

7.2.4 通用管片拟合曲线时，最小转弯半径的计算可采用如下公式计算：

$$R = \frac{BD}{\Delta}$$

错缝拼装时，最小转弯半径的计算可采用如下公式计算：

$$R = \frac{BD}{\Delta \left(1 - 2 \sin \left(\frac{\pi}{n} \right) \right)}$$

式中： R ——管片理论上的最小转弯半径；

n ——沿圆周均匀分布的纵向螺栓分组数，即拼装点位总数；

B ——管片环宽；

D ——管片外径；

Δ ——楔形量；

7.2.5 施工前宜根据设计轴线的走向和管片的几何特征对管片预先进行设计排版；施工时，应根据测得的盾构走势和管片姿态重新确定每一环管片的拼装点位。

7.3 管片分块与环宽

7.3.1 对于钢筋混凝土平板型管片，外径在 10~12m 的盾构隧道，分块数量宜为

8~10 块；外径在 14~15m 的盾构隧道，分块数量宜为 9~11 块。

7.3.2 不同的分块形式对管片结构也有一定的影响，设计中应对管片分块数量以及形式进行综合研究，确定分块数量、封顶块大小等。

7.3.3 对于钢筋混凝土平板型管片，外径在 10~12m 的环宽宜取为 1500mm~2000mm；外径在 14~15m 的环宽宜取为 2000mm 左右。

7.3.4 管片环宽的取值需结合管片搬运、拼装、曲线拟合、接缝数量、盾构机千斤顶行程、管片制作成本等要素综合确定。

7.4 管片接头构造

7.4.1 管片接头一般包括接头构造形式、连接方式。接头构造设计需要从力学性能、防水方案及施工运输等方面进行考虑。接头的构造一般有连接件、榫槽、传力衬垫、弹性密封垫沟槽和嵌缝沟槽等部分组成。

7.4.2 管片接头的对接方式主要有全面对接式、部分表面对接式、键式、搭接式和凹式等。公路盾构隧道管片宜采用面对接式或设凹凸榫对接形式。当采用凹凸榫槽对接方式时，应结合盾构推进油缸的作用区域一并考虑。

7.4.3 接头紧固件按照紧固方法不同，可分为有螺栓连接（直螺栓、弯螺栓、斜插螺栓等）、无螺栓连接以及销钉连接等，公路盾构隧道的接头宜采用螺栓连接形式，通常环间螺栓的尺寸小于等于管片与管片之间的连接螺栓直径。采用螺栓连接进行设计时，尚应注意如下方面：

1 对于混凝土平板型管片，需考虑接头的应力传递、配筋制约、楔形量等因素，结合管片脱模工艺和截面缺损部分的平衡因素，确定管片宽度方向的螺栓配置。

2 管片沿宽度方向一般宜均匀配置 2~3 根螺栓，管片厚度较大时，也可按照双排布置。

3 对于环间接头螺栓，宜采用一排螺栓，配置在离管片内侧 $1/4\sim 1/2$ 的位置上。

钢管片的接头螺栓设计结合结构计算确定其布置位置与数量。

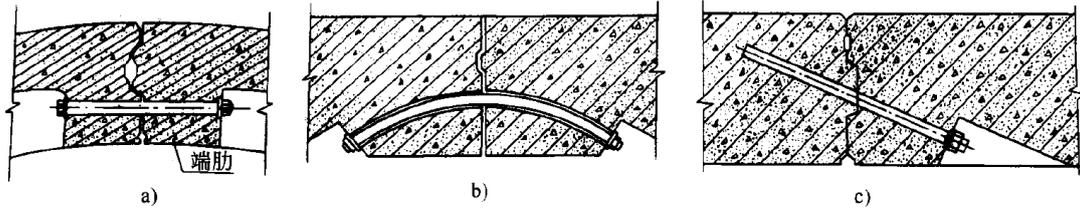


图 7.4.3 管片螺栓连接方案图

7.4.4 在接缝处设置可设置柔性的传力衬垫可作为管片接头受力的缓冲，控制管片开裂。在管片刚度接头要求高的特殊隧道，如承担高水头压力的隧道衬砌，在确保管片制作精度的前提下，也可以采用混凝土凸面替代传力衬垫，凸面高度宜取 2~4mm，不宜超过 5mm。

7.4.5 管片结构宜在内侧设置嵌缝槽，在槽内添加止水材料来达到防水的目的。

7.4.6 盾构管片接缝需结合防水密封垫的要求进行沟槽预留，并根据防水密封垫的指标对沟槽的尺寸进行力学分析，综合确定防水方案。管片防水可根据隧道尺寸、设计水压力的不同，可沿管片厚度方向设置一道或两道密封垫防水。

7.5 封顶块设计

7.5.1 封顶块的拼装方式有径向插入型、轴线插入型和两者并用的混合型。

1 径向插入型由于管片自锁能力差，目前已较少采用。

2 轴向插入型、轴向插入与径向插入混合型成为目前盾构隧道封顶块拼装方式的主要类型。

3 通常在确定封顶块插入类型时需综合管片分块方式、盾构设备推进油缸行程、封顶块管片拼装时所需的最小施工间隙等综合确定。一般来说，封顶块圆心角较小时、管片采用轴向插入即可满足要求。而当封顶块圆心角较大时，如采用轴向插入型，则封顶块梯形斜边与隧道轴线的角度较大，既不利于盾构施工期推进油缸作用力的传递，也不利于隧道环向轴力的传递，而径向与轴向混合的插入方式可以减小梯形斜边与隧道轴线的夹角，改善管片力学性能。

4 纵向插入角度设计主要取决于拼装时封顶块径向搭接长度及径向插入时管片施工间隙，根据设计施工经验，径向插入时管片施工间隙可取 20~30mm；封顶块插入角度取 1:5~1:10。

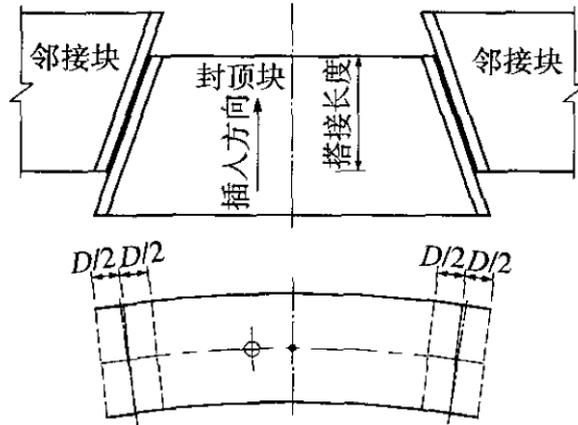


图 7.5.1 封顶块插入方式设计图

7.5.2 封顶块的大小

封顶块的大小可根据管片分块方案、螺栓的布设方案、拼装点位的选择方式等因素综合确定。大直径盾构隧道不宜采用与标准块等圆心角的大封顶块方案。

7.6 注浆孔设计

7.6.1 管片上的注浆孔的布置需保证可向衬砌背后均匀压浆；一般应在每块管片设置至少一个注浆孔。需要取消注浆孔时，应进行专项论证。

【条文说明】注浆孔应可靠锚固在管片内。为了防止在打开注浆孔塞时来自地层水与土砂的喷入，一般在注浆孔中设置反向停止阀，或者在插塞与盖帽上安装 O 型环。在混凝土管片中因注浆孔采用与混凝土相异的材料，二者之间容易产生界面，应采用有效的防水方法保证水密性。近年来，长距离大深度水下公路隧道为了降低注浆孔渗漏的风险，也有采用不设置注浆孔的方案。当取消注浆孔时，隧道周边一旦发生不利情况，就无法利用注浆孔进行处置，建议开展专项论证。

7.6.2 压浆孔的直径需根据使用的压浆材料决定，一般采用内径约 50mm 的压浆孔。

【条文说明】因在混凝土管片与铸铁管片中多将注浆孔与起吊孔兼用，多使用直径比钢管片大的注浆孔。注浆孔塞多使用标准产品及 ABS 树脂，聚苯醚树脂等合成树脂及铸铁产品。有必要考虑在使用铸铁及钢制品时长期使用的劣化及合成树脂制品的拧紧力。

7.6.3 如把压浆孔作为起吊环使用时，应根据作业安全性、施工便利性等因素合理确定其位置及孔径。

【条文说明】当衬砌为钢管片时，宜另外设置起吊环。

7.7 吊装方案设计

7.7.1 管片设计需结合盾构设备配置相应的吊装装置，通常可选用真空吸盘吊装或螺栓举重吊装两种方式。

【条文说明】考虑到管起吊时的平衡，多尽力将起吊环布置在管片中心附近。根据管片的种类，可将压浆孔或螺栓孔作为起吊环使用。不论采用何种吊装方案，设计时都必须保证起吊环在搬运、施工荷载作用下的安全性。

7.7.2 采用真空吸盘装置进行吊装时，应结合真空吸盘构造确定管片内弧面的设计方案，并对吊装过程的安全性进行验算。

【条文说明】真空吸盘需要安装报警装置，一旦真空泵失效或者吸力不足的时候，即进行报警，相关技术人员应立即排查原因，检修装置，待问题排除后，方可使用。

7.8 盾构设备推进作用方案设计

7.8.1 管片结构迎千斤顶面需选择与盾构设备推进系统匹配的结构方案。

1 迎千斤顶面一般可设置局部凸面，将推进油缸的顶推作用均匀传递到凸面上，凸面宜保持与管片边缘不小于 50mm 距离，以保证顶推作用对管片边缘的混凝土的不利作用。

2 迎千斤顶凸面高度不宜过大，宜采用 2~5mm。

3 迎千斤顶面应进行混凝土结构局部承压能力进行验算。

7.8.2 盾构管片纵缝宜避开推进油缸撑靴作用区。

7.8.3 盾构隧道管片旋转拼装时，对应推进千斤顶撑靴作用的传力凸面一般不宜随管片旋转而调整方位；

7.9 管片制作误差要求

7.9.1 衬砌管片应采用高精度管片，管片精度应达到以下要求：

1 单块管片制作的允许偏差：宽度 $\pm 0.5\text{mm}$ （错缝拼装时宜取 $\pm 0.4\text{mm}$ ）；厚度 $\pm 1.0\text{mm}$ ；弧、弦长 $\pm 1.0\text{mm}$ ；纵、环向螺栓孔孔径及孔位 $\pm 1.0\text{mm}$ 。

2 整环拼装检验的允许偏差：相邻环的环面间隙小于 1.0mm、纵缝相邻块间

隙为小于 1.5mm、对应的环向螺栓孔不同轴度小于 1.0mm、衬砌环外半径-0.0~+3.0mm，内半径-3.0~+0.0mm。

3 管片沟槽误差控制应与防水材料、剪切构造等要求相匹配。

【条文说明】单块衬砌管片制作误差检验应采用游标卡尺测量，采集点数不少于 6 点，读数精确至 0.1mm。环宽不小于 2m 的管片宜采用二环水平拼装检验，环宽小于 2m 的管片宜采用三环水平拼装检验。整环拼装检验应采用钢卷尺在同一水平测量断面上选择间隔 45°的四个方向进行测量，精确至 1mm。对于直径大于 12m 及形状特殊的衬砌，可另行设定允许误差。

7.10 盾构隧道特殊部位设计

7.10.1 盾构隧道与工作井宜采用刚性连接，并在工作井外侧加密设置 2~5 条变形缝。

【条文说明】盾构段与工作井结构形式不同，隧道结构刚度在纵向存在突变的情况，为为了防止隧道加大的不均匀沉降，需要采取能够适应较大纵向变形的构造措施。

7.10.2 盾构隧道在设置横向连接通道的位置前后宜设置变形缝，横向连接通道与主隧道之间宜采用刚性连接。

【条文说明】盾构隧道与横通道连接部位，为防止差异沉降对结构产生的不利影响，同时保证隧道结构不漏水，通常在连接部位附近设置变形缝。

7.10.3 盾构隧道的变形缝宽度应结合防水方案综合确定，缝宽一般可取 2~4mm；变形缝内宜设置高弹性模量软木衬垫，并粘贴在背千斤顶面处。

【条文说明】变形缝内粘贴软木衬垫，需要对松木衬垫的设置和粘贴提出具体要求，管片拼装前应逐块对粘贴的松木衬垫进行检查。同时，在管片调运和拼装过程中要采取保护措施，防止损坏。

7.10.4 盾构隧道进出洞段宜采用环、纵向拉紧措施。

【条文说明】在盾构始发掘进过程中，为防止负环管片拆除后，正洞管片拾取反力松弛，需将已经拼装的管片安装纵向拉紧装置。在盾构到达的过程中，为了防止管片随隧道向前移动，使管片纵向环缝拉开，需要在到达衬砌环间采用拉紧措施。

7.10.5 盾构隧道与工作井刚性连接部位，宜在首尾节管片预制时预埋钢板，以利于盾构隧道与工作井的刚性连接。

【条文说明】首尾节管片预埋钢板能够在洞圈拆除后，实现快速钢板焊接密封，起到快速封水效果。

7.10.6 管片边角应设计为不易损坏的倒角形状。

【条文说明】管片运输和拼装过程中管片的边角易被碰撞损坏，影响管片美观，严重时会影响管片功能，因此设计中通常将管片边角设计为不易损坏的倒角形状。

7.10.7 管片应根据要求设置管片型号、定位标记、主筋位置等方便施工的标记符号。

【条文说明】管片预制时就预留各种标记可方便管片运输和拼装，给施工人员操作带来极大的方便。

征求意见稿

8 荷载

8.1 一般规定

8.1.1 公路盾构隧道结构可采用荷载结构法或地层结构法计算，并符合以下规定：

1 当盾构穿越土质地层时，宜采用荷载结构法进行内力计算。

2 当围岩质量较好，围岩和隧道结构共同承担外荷载时，宜采用地层结构法进行内力计算。

3 当盾构穿越的环境较复杂，需要考虑盾构与周边建构筑物的相互影响时，宜采用地层结构法进行计算。

【条文说明】荷载结构法认为隧道开挖后地层的作用主要是对衬砌结构产生荷载，衬砌结构应能安全可靠地承受地层压力等荷载的作用。地层结构法时将衬砌和地层视为整体共同受力的统一体系，在满足变形协调条件的前提下分别计算衬砌与地层的内力。荷载结构法仍然是我国目前广为采用的一种地下结构计算方法，主要适用于软弱围岩中的浅埋隧道。地层结构法虽仍处于发展阶段，但目前一些重大的或大型特定工程的研究分析中也普遍采用。由于地下结构的特殊性，盾构隧道的设计在很多情况下还需要借助经验。

8.1.2 公路盾构隧道结构计算必须根据施工中各阶段及使用过程中可能出现的环境条件进行，并充分考虑各类荷载组合、地质差异及周边条件变化对结构的不利影响。结构计算应符合以下规定：

1 隧道结构计算模式与计算工况应根据其工作条件、施工工序及受力特点确定；

2 当内部结构需承受车辆荷载时，其计算及构造应符合现行《公路桥涵设计通用规范》的相关要求；

3 地层对结构的弹性抗力应根据结构形式、地层特性、加固方法、施工参数以及结构内力对弹性抗力的敏感程度等因数确定。

4 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。

8.1.3 公路盾构隧道的结构验算应符合以下规定：

1 隧道管片和主体结构承载力、变形和裂缝验算宜采用基于分项系数的极限状态法验算；

2 管片螺栓孔，嵌缝等局部构造的验算，可采用容许应力法。

8.2 作用

作用的确定是工程结构计算的先决条件，衬砌设计不仅应满足隧道投入使用后，而且必须满足施工过程中的安全性和工艺的要求。从这种观念出发，对于隧道设计根据作用组合方法分类，应考虑的作用种类主要分三种，即永久作用、可变作用和偶然作用等三种。

8.2.1 公路盾构隧道的设计荷载应按表 8.2.1 选用，设计过程中应根据施工和使用阶段可能发生的变化，按可能出现的最不利情况，进行组合分析。

表 8.2.1 作用分类

编号	作用分类		作用名称
1	永久作用		竖向及水平岩土压力
2			水压力
3			结构自重
4			装修或设备自重
5			地面建筑物的影响力
6			地面超载
7			混凝土收缩及徐变作用
8			结构基础变位作用
9	可变作用	基本可变作用	地面车辆影响力
10			隧道内车辆及人群影响力
11			水位变化（潮汐）及波浪的影响力
12		其他可变作用	风机等设备引起的动荷载
13			温度作用
14			地面施工影响力
15			隧道施工影响力(顶推力、注浆压力等)
16	偶然作用		地震作用
17			爆炸力
18			火灾影响力
19			撞击力
20			沉船及抛锚影响力

【条文说明】在决定荷载的数值时，应满足现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB50009 等的有关规定。由于作用在盾构隧道结构上的荷载有许多不确定因素，所以必须考虑每个施工阶段的变化及使用过程中荷载的变动，选择使结构整体或构件的工作状态为最不利的荷载组合及加载状态来进行设计。

8.2.2 水下盾构隧道结构计算应按承载能力极限状态基本组合（ULS）、承载能力

极限状态偶然组合（ALS）、正常使用极限状态标准组合（SLS）分别进行计算与验算，荷载组合的具体表达式按照《建筑结构荷载规范》（GB50009）执行，并满足以下规定：

- 1 隧道主体结构应按作用最不利工况进行组合校核。
- 2 当计入地震或其他偶然作用时，不需验算结构的变形及裂缝宽度。
- 3 当基坑围护结构兼作上部建筑物基础时，应进行垂直承载能力、地基变形及稳定性计算。

【条文说明】本条规定盾构隧道结构采用极限状态法验算。

1 由于盾构法隧道的建造是多步骤复杂施工过程，且在运营阶段的荷载工况与施工阶段有所不同，设计中一般针对施工和运营过程中的荷载组合进行分析，特别强调某些关键荷载的作用工况不能忽视。

2 由于偶然荷载作用时间短暂，不要求对正常使用阶段极限状态进行验算。

3 围护结构充当主体结构时，其竖向承载能力、地基变形及稳定性计算非常重要。因此设计过程中要弄清维护结构与主体结构的受力关系，分别按照施工期与运营期工况进行验算。

8.2.3 盾构隧道承载能力极限状态基本组合（ULS）、承载能力极限状态偶然组合（ALS）、正常使用极限状态标准组合（SLS）的荷载分项系数可按表 8.2.3 选取。

表 8.2.3 作用分项系数

编号	作用分类		作用名称	作用分项系数 γ_F		
				ULS	ALS	SLS
1	永久作用		竖向及水平岩土压力	1.35	1.0	1.0
2			水压力	1.1	1.0	1.0
3			结构自重	1.35	1.0	1.0
4			装修或设备自重	1.35	1.0	1.0
5			地面建筑物的影响力	1.2	1.0	1.0
6			地面超载	1.2	1.0	1.0
7			混凝土收缩及徐变作用	1.35	1.0	1.0
8			结构基础变位作用	1.2	0.5	1.0
9	可变作用	基本可变作用	地面车辆影响力	1.4	—	0.5
10			隧道内车辆及人群影响力	1.4	1.0	0.5
11			水位变化及波浪的影响力	1.4	1.0	—
12			风机等设备引起的动荷载	1.4	1.0	—
13		其他可变作用	温度作用	1.4	1.0	1.0
14			地面施工影响力	1.4	—	—
15			施工影响力(千斤顶推力、注浆压力等)	1.4	—	—
16	偶然作用		地震作用	—	1.0	—

编号	作用分类	作用名称	作用分项系数 γ_f		
			ULS	ALS	SLS
17		爆炸力	—	1.0	—
18		火灾影响力	—	1.0	—
19		撞击力	—	1.0	—
20		沉船及抛锚影响力	—	1.0	—

注：1 永久作用对结构的承载能力有利时，其分项系数可降低 0.2。

2 水压力对结构的承载能力有利时，其分项系数可取 1.0。

3 竖向土压力与水平土压力应按相互独立的荷载进行组合。

4 偶然作用相互之间不组合。

5 有条件时，可根据作用的概率分布确定作用分项系数。

【条文说明】表中的作用分项系数主要参考《建筑结构荷载规范》GB50009 确定。

公路盾构隧道结构承载能力极限状态设计，对持久设计状况和短暂设计状况采用作用的基本组合，对偶然设计状况采用作用的偶然组合。按正常使用极限状态设计时，按作用的标准组合验算结构构件的容许应力、变形、裂缝宽度。在某些情况下，如果根据判断，上述三项中的某项能毫无疑问地得到满足，则可只作其他项目的校核，或不进行校核。

8.2.4 土压力的计算应符合以下规定：

1 当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容重，地下水位以下的土体应采用饱和容重。水土合算的方法，适用于土体渗透性很差的情况，一般适用于软粘土，施工期的水土压力计算；

2 当水土压力采用水土分算时，地下水位以下的土体应采用浮容重。水土分算的方法适用于土孔隙中存在自由的重力水的情况或土的渗透性较好，一般适用于砂土、粉土中，主体结构施工期的水土荷载计算或者地层中主体结构运营期的水土压力计算。

3 深埋隧道的竖向土压力可根据 Terzaghi 松散土压力理论确定。

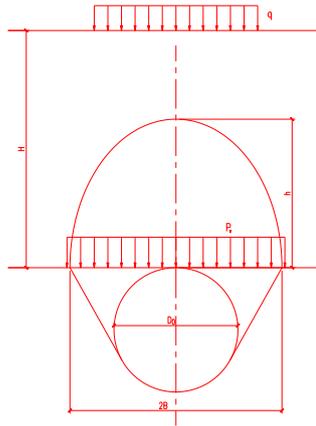


图 8.2.4 松散土压力计算简图

考虑长期作用于隧道上的土压力时，宜针对地质条件、隧道埋置深度，分成两种情况来计算：当覆土厚度小于隧道外径时，一般不考虑地层的拱效应；当覆土厚度大于隧道的外径时，地层产生拱效应的可能性比较大，可以考虑在设计时采用松弛土压力。在砂性土中，当覆土厚度大于 $1\sim 2D$ (D 为管片环外径) 时采用松散土压力；在粘性土中，如果是由硬质粘土 ($N\geq 8$) 构成的良好地层，当覆土厚度大于 $1\sim 2D$ 时多采用松散土压力。对于中等固结的粘土 ($4\leq N < 8$) 或软粘土 ($2\leq N < 4$)，宜将隧道的全覆土重量作为土压力考虑。

对于松散土压力的计算方法一般多采用太沙基 (Terzaghi) 公式。其计算图见图 8.2.4

$$P_v = \frac{B\gamma - C}{K \tan \phi} \left(1 - e^{-\frac{Kh}{B} \tan \phi} \right) + q e^{-K \frac{h}{B} \tan \phi} \quad (8.2.4-1)$$

$$B = \frac{D}{2} \cot \left(\frac{45^\circ + \phi/2}{2} \right) \quad (8.2.4-2)$$

其中：

P_v 为松弛土压力

$2B$ ：为衬砌顶部的松弛宽度

K ：一般取 $K=1.0$

γ ：为土体单位重度

C ：为土体粘聚力

ϕ ：为土体内摩擦角

H: 为覆盖层厚度

D: 为衬砌环外径

松散土体高度的计算一般可采用下式计算:

$$h = \frac{B \left(1 - \frac{C}{\gamma B} \right)}{K \tan \phi} \left(1 - e^{-K \tan \phi \frac{H}{B}} \right) \quad (8.2.4-3)$$

对于水平土压力,可以取垂直土压力乘以水平土压力系数,对隧道同时还要考虑从隧道顶部到隧道底部的水平土压力的作用,所以隧道的水平荷载为一个梯形荷载。针对盾构隧道所修建的地段基本上均属于软弱地段,所以根据 N 值的不同而选择不同的系数。

【条文说明】作用于管片衬砌上的土压力较为复杂,难以精确计算。本标准规定采用一般通用的方法计算设计土压。首先,在作用于隧道上的土压力中,规定采用与隧道变形无关的设计计算土压力。作用于隧道底部的土压力,即使是根据余变形无关的假定计算的,但仍作为反力上压,按地层反力来对待。

本条针对水土分算、水土合算提供了简易的判断标准。但是,准确掌握土壤中水的动态,地下水位等较为困难,计算方法需要根据围岩条件、隧道使用目的等因素慎重考虑。

本条第 3 条中提到“对于中等固结的粘土 ($4 \leq N < 8$)或软粘土 ($2 \leq N < 4$),宜将隧道的全覆土重量作为土压力考虑”,根据调研,国内满足此类土层条件的盾构隧道大多采用隧道上方全部土柱重量作为土压作用。如果设计中,有类似地质条件的工程案例,可借鉴其土压力计算方法。

与垂直土压力情况相同,难以准确计算水平土压力。设计时,确认结构安全前提条件下,可用本标准推荐的计算方法。侧向压力系数不仅与土层性质有关,也与计算方法相关。本标准推荐采用标准贯入度 N 估算侧压力系数。

8.2.5 盾构隧道衬砌上作用的水压力应符合以下规定:

1 水压力是在水土分算时必须考虑的荷载,取全水头水压力进行计算,水压的确定应保证所设计的结构物在施工期间和使用期间的安全。

2 在选择用于计算水压力的地下水位时应进行充分的论证。可以通过分别取各种水位进行计算,取最不利的情况进行设计。

3 对于地下水、洪水或潮汐引起的水压力荷载，20 年一遇水位条件下的水压力可按永久荷载计算，20 年一遇水位至设计最高（最低）水位产生的水压力可按可变荷载计算。

【条文说明】盾构隧道衬砌上作用的水压力大小及计算方法与土层性质相关，如隧道位于承压水层中，需要考虑承压水头引起的环向压力。

在圆形盾构隧道设计计算中，采用较高的水压力值，并不一定是偏于安全的设计，因此，选取计算水压的地下水位时，需要进行充分研究。

我国现行的防洪标准分为设计一级标准和设计、校核两级标准两种情况。根据防护对象的不同，其防洪标准可采用设计一级或设计、校核两级。公路盾构隧道由于技术复杂、修复困难，其防洪标准宜采用设计、校核两级执行。这里的设计标准是指当出现小于或等于这种标准的洪水（设计洪水）时，应保证防护对象的安全或防洪设施的正常运行。校核标准是指遇该标准相应的洪水（校核洪水）时，才去非常用的措施，在保障主要防护对象和主要建筑物安全的前提下，允许次要建筑物不同程度的损坏及次要防护对象受到一定的损失。

8.2.6 结构自重应符合以下规定：

1 在自重计算中，认为材料是均匀的介质，自重沿衬砌轴线分布的垂直荷载。箱形管片如果自重沿衬砌轴线的分布变化不同的话，可以采用平均自重。

2 对于衬砌结构计算中采用的材料的重度，在无实际明确的重度时可以参照下表考虑。

表 8.2.6 衬砌管片计算常用材料重度 (kN/m³)

	一次衬砌			二次衬砌	
	钢筋混凝土	钢制	铸铁制	素混凝土	钢筋混凝土
重度	25.0	78.5	72.5	24.0	25.0

【条文说明】衬砌自重依下式计算：

$$g = \frac{W}{2\pi R} (\text{kN/m}^2)$$

式中， W ——单位长度衬砌的重量

R ——衬砌的轴心半径

二次衬砌的施工时间一般多在管片衬砌环已稳定后才进行浇筑。故当二次衬砌与一次衬砌同时承受荷载时，必须考虑二次衬砌的自重。其中，二次衬砌本身来承受其自重，一次衬砌设计时可不予考虑二次衬砌的自重。

8.2.7 装修或设备自重荷载为隧道内部装修、设备安装或分割空间而产生的荷载，应根据设计基准期内可能发生的实际情况计算。

【条文说明】需要注意的是，从盾尾脱离的管片衬砌环，进行回填压浆之前，是按照圆筒型梁或薄壳的形式工作的。此时，盾构的后方台车、运渣斗车等各种施工设备位于此部分时，必须将它们作为内部荷载来验算结构安全性。

8.2.8 地面永久建筑荷载影响力为隧道施工前或施工完成后，在隧道上方或两侧影响范围内施做的永久建筑物或永久构筑物。应根据结构设计基准期内隧道周边的建设规划，确定建筑荷载影响力的作用位置与量值。

地面永久建筑物对隧道结构的影响可按以下方法计算：将建筑物重力换算为地表（或地层内）的分布荷载（或集中荷载），应用应力扩散理论分析其对隧道结构的作用力。对于无粘性的砂性土可采用扩散角理论计算；对于粘性土及岩体可采用土力学中应力传递理论公式计算。

【条文说明】地面永久建筑荷载对土壤中应力影响是随着深度的增加而减少，且上覆荷载也将随着距荷载作用点的距离加大而减小。但由于土层性质变化、基础形式等客观因素，难以对此类荷载做出明确的规定。本条中推荐采用应力扩散理论分析。如果工程区域有可靠的经验计算方法，也可以采用经验计算方法。

8.2.9 地面超载应符合以下规定：

1 作用在地面的超载（汽车荷载及地面结构物的作用而产生的荷载）应作为集中力或附加分布荷载作用在隧道衬砌上。

2 陆域地段的隧道结构，地面超载可按 20kPa 考虑；当隧道上方为车行道时，地面超载可按 30kPa 考虑；盾构工作井周边地面超载可按 30kPa 考虑；当施工期间地面有特殊使用要求或运营期间地面有特殊使用规划时，地面超载应按实际情况计算。

3 对于一般地面荷载可以直接根据布辛尼斯克（Boussinesq）所推导的公式进行计算。地面结构物荷载对衬砌结构的影响，应根据结构物产生的荷载的大小、基础类型、基础与衬砌间的土层等情况进行计算。

【条文说明】地面超载对盾构法隧道结构设计的影响主要体现在施工期及运营期两方面。

施工期：(1) 上部混凝土施工荷载导致下部混凝土结构超载；(2) 施工中材料堆放超过结构设计荷载。(3) 施工设施基础坐落于隧道结构上超过结构设计荷载。

运营期：隧道上部和破坏棱体范围内的设施及建筑物压力要考虑现状及以后的变化，凡规划明确的，均依其设计方案确定；凡不明确的，均在设计要求中予以规定。

8.2.10 当结构为超静定体系时，应计入混凝土收缩和徐变的影响力。可作为混凝土整体温度降低考虑：对于整体现浇的素混凝土衬砌可按降温 20℃考虑；对于整体现浇的钢筋混凝土衬砌可按整体降温 15℃考虑；对于分次浇筑的整体式素混凝土或钢筋混凝土结构可按整体降温 10℃考虑；对于装配式钢筋混凝土结构可按整体降 5℃~10℃考虑。

8.2.11 结构基础变位作用的计算，应考虑基础有可能出现的变位差。当基础不均匀或荷载存在较大不对称时，结构计算过程中可适当增大基础相对变位值进行验算。

8.2.12 基本可变荷载标准值的计算应符合以下规定：

1 公路车辆荷载、人群荷载应根据结构设计基准期内，隧道净空道路的荷载标准确定其作用位置与量值，计算方法可采用《公路桥涵设计通用规范》JTGD60 的相关规定。

2 立交公路车辆荷载及其产生的冲击力、土压力，应根据结构设计基准期内隧道周边道路建设规划确定其作用位置与量值，计算方法可采用《公路桥涵设计通用规范》JTGD60 的相关规定。

3 立交铁路荷载及其产生的冲击力、土压力应根据结构设计基准期内隧道周边建设铁路规划确定其作用位置与量值，计算方法可采用《铁路桥涵设计基本规范》TB 10002.1 的相关规定。

4 水位变化（潮汐）及波浪的影响力可以参照《海港水文规范》和《港口工程荷载规范》的规定进行计算。

5 风机等设备引起的动荷载可按以下规定计算：

1) 对于射流风机，可按其静止重量的 10~15 倍计算其对隧道结构的动荷载作用；

2) 对于轴流风机, 可按有关规范的经验公式计算, 或根据机械振动理论分析后确定;

3) 对于架空结构, 除计入标准设备荷载外, 还应计入不小于 $200\text{Pa}/\text{m}^2$ 的使用期分布荷载。

8.2.13 当隧道结构受到温度影响显著时, 结构计算中应考虑温度作用。温度变化影响力可按式计算:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta t \quad (8.2.13)$$

式中: ΔL ——构件的温度变化引起的变形值 (m)

α ——构件材料的线膨胀系数, 混凝土及钢筋混凝土的线膨胀系数为 1.0×10^{-5} 。

L ——构件的计算长度 (m)。

Δt ——构件的计算温度差, 一般可取构件施工时温度与设计基准期内最冷月平均气温或最热月平均气温之差 ($^{\circ}\text{C}$)。

8.2.14 地面施工荷载为工程建设期中, 短期堆放物体或临时开挖覆土层导致隧道周边荷载的短期变化, 应根据实际或预计发生的情况计算。当堆放或开挖引起的荷载变化可能长期存在时, 应作为永久荷载考虑; 浅埋隧道之上的大面积施工荷载, 可简化为覆土厚度。

8.2.15 隧道施工荷载为盾构施工过程中产生的荷载, 主要有千斤顶推力、壁后注浆压力、盾尾脱离后的土压力、管片装配器的操作荷载及其它施工荷载。

计算应符合以下规定:

(1) 千斤顶推力

千斤顶推力是在盾构推进过程中以盾构千斤顶推力的反力的形式作用于管片上的临时荷载, 在施工荷载中对管片的影响最大。盾构的总推力是根据各种推进阻力的总和及其所需富裕量决定的。在一般情况下, 盾构千斤顶的设备总推力可以参照下式计算:

$$P = (70 \sim 100)A$$

P: 盾构千斤顶的设备总推力 (t);

A: 开挖面的面积 (m^2)。

但是, 地质条件及施工方法对推力有很大影响。在一般情况下, 当开挖面不

能自稳时采用上限值；能够自稳时，采用下限值。施工时的使用推力多为此值的30~60%。

每台千斤顶的推力和台数应根据盾构外径、总推力、管片结构和隧道路线等因素确定。

尤其是在急转弯曲线段及盾构纠偏时，不但由于千斤顶的操作会产生偏心荷载，还会出现曲线内外侧的压力暂时性不平衡，从而出现纵向弯曲应力等在直线上不可能出现的应力状态。这时，要结合地层抗力的评价和隧道纵向结构模型等因素，对于这些荷载进行仔细地研究。由于作用在环与环之间接头断面上的弯曲应力需由螺栓来承担，螺栓容易发生剪切破坏。

（2）壁后注浆压力

向盾尾空隙进行壁后注浆时，由于注浆压力在管片注浆孔周围形成一个暂时作用的偏心荷载，在此荷载作用下，容易出现钢制管片面板的损伤、半径方向插入的K型管片会向隧道内滑移、接头螺栓破损、管片环变形等现象。

设计管片时，除围岩条件外，也要考虑施工的实际情况来确定注浆压力，并在这一压力下对管片的各部分进行验算。壁后注浆入口的压力应稍大于该处的静止水、土压力之和。注浆压力不能过大，以免管片背后土层受劈裂扰动，而造成过大的后期沉降与跑浆；注浆压力过小，则浆液填充过慢，间隙充填不密实，地表变形也将加大。实践上多取注浆压力为1.1~1.2倍静止水、土压力。日本《盾构隧道设计施工指南》中推荐注浆压力采用0.3MPa，以此压力检算B和K型管片的接头及面板的强度，在上海市已建的盾构隧道中，注浆压力通常用0.3~0.4MPa。

（3）盾尾脱离后的土压力

如果压浆工作完成前，盾尾脱出后形成的空间外的围岩稳定，则可不考虑此项荷载。但是，在软粘土类和松散易流动的砂层中，随着盾尾的前进，围岩坍落到衬砌环顶部，在衬砌环上可能作用有较大的压力，应该检算在盾尾前进后作用在衬砌上的土压力。

盾尾前进后出现的土压力，一般按20~30kPa考虑。但在竖井附近和围岩受到很大扰动的地区，应根据实际情况，将上述数值适当地予以增加。

（4）管片装配器荷载

管片装配器的操作荷载即作用于管片上的装配器荷载，除用此荷载计算起吊环之外，也要用来计算管片装配器对于管片各部分的影响。最近由于管片的自动装配、大口径盾构隧道管片的大型化使管片装配器的装备能力有增大的倾向。此荷载的数值可根据装配器的额定能力与动态效应进行推求。但因装配器的代用等情况的存在，采用额定能力不合适时，则需要进行合理的判断。

对于钢筋混凝土类的管片，将螺栓孔或注浆孔作为管片起吊孔使用的场合较多，也有在螺栓孔或注浆孔内安装拉杆作为反力座在施工时进行设备材料吊装的做法。在日本《盾构工程用标准管片（1990）》中，考虑到这种因素对于混凝土管片的影响，要求注浆孔的抗拔承载力超过 1.5 倍管片环重量。在采用自动装配装置时，为了使组装置固定牢靠，会对起吊环产生较大的抗拔力，因此必须对起吊环的抗拔承载力进行验证。

（5）其它施工荷载

除以上施工荷载外，还有一些需要考虑的对象，如后方台车自重的影响、真圆保持器等的千斤顶荷载、刀盘旋转力的影响、盾构型式及开挖面的各种设备等。另外，切削出碴搬运车及管片搬运车的反力有时也会对管片产生影响。如果这些影响较大时，根据需要设定合适的荷载，有必要时对结构稳定性进行计算。

【条文说明】凡是从组装管片开始，直到向盾尾空隙中压注的浆液硬化，或为改良围岩而压注的化学浆液硬化为止这一期间内，作用在衬砌上的临时荷载统称为施工荷载。设计管片时，其值需要根据施工的关系确定。施工荷载因围岩条件和施工条件而异，难以确切地计算出其具体数值，但应注意，在进行盾构施工时，假定施工荷载、验算管片的使用条件时，均应以有利于隧道施工为原则。

8.2.16 地震对结构的作用力应根据隧道设计使用寿命期内 10%超越概率条件下地震动参数设计，按超越概率 2%的地震动参数验算。验算可采用拟静力法、反应位移法和地震波时程分析法。

【条文说明】地震荷载参照现行行业标准《公路工程抗震设计规范》及国家标准《建筑抗震设计规范》的规定计算确定。在下述条件中，地震对隧道影响较大，需进行慎重研究：（1）围岩条件或衬砌结构突变时；（2）覆盖层厚度突变时；（3）软弱地层中；（4）隧道和工作井的连接部分；（5）在松散的饱和砂

层且覆盖层薄时；(6) 隧道下方的基岩深度变化显著时。

8.2.17 隧道承受的由炸药、燃气、粉尘等引起的爆炸力宜按等效静力荷载采用。在常规炸药爆炸动荷载作用下，结构构件的等效均布静力荷载标准值，可按下列式计算：

$$q_{ce}=K_{dc}p_c \quad (8.2.17)$$

式中： q_{ce} ——作用在结构构件上的等效均布静力荷载标准值；

K_{dc} ——作用在结构构件上的均布动荷载最大值，可按现行国家标准《人民防空地下室设计规范》(GB 50038) 中第 4.3.2 条和 4.3.3 条的有关规定采用；

p_c ——动力系数，根据构件在均布动荷载作用下的动力分析结果，按最大内力等效的原则确定。

注：其他原因引起的爆炸，可根据其 TNT 装药量，参考本条方法确定等效均布静力荷载。

【条文说明】爆炸一般是指在极短时间内，释放出大量能量，产生高温，并放出大量气体，在周围介质中造成高压的化学反应或状态变化。爆炸的类型很多，例如炸药爆炸(常规武器爆炸、核爆炸)、煤气爆炸、粉尘爆炸、锅炉爆炸、矿井下瓦斯爆炸、汽车等物体燃烧时引起的爆炸等。爆炸对建筑物的破坏程度与爆炸类型、爆炸源能量大小、爆炸距离及周围环境、建筑物本身的振动特性等有关，精确度量爆炸荷载的大小较为困难。本规范对目前工程中较为常用且有一定研究和应用经验的炸药爆炸和燃气爆炸荷载进行规定。

爆炸荷载的大小主要取决于爆炸当量和结构离爆炸源的距离，本条主要依据《人民防空地下室设计规范》GB 50038-2005 中有关常规武器爆炸荷载的计算方法制定。确定等效均布静力荷载的基本步骤为：(1) 确定爆炸冲击波波形参数，即等效动荷载；(2) 按单自由度体系强迫振动的方法分析得到构件的内力；(3) 根据构件最大内力(弯矩、剪力或轴力)等效的原则确定等效均布静力荷载。

8.2.18 隧道承受的汽车撞击力标准值在车辆行驶方向取 1000kN，在车辆行驶垂直方向取 5010kN，两个方向的撞击力不同时考虑，撞击力作用于行车道以上 1.2m 处，直接分布于撞击涉及的构件上。对于设有防撞设施的结构构件，可视防撞设施的防撞能力，对汽车撞击力标准值予以折减，但折减后的汽车撞击力

标准值不应低于上述规定值的 1/6。

【条文说明】本规范规定的骑车撞击荷载设计值参考了《公路桥涵设计通用规范》(JTG/D 60)。为防止或减少因撞击而产生的破坏,对易受汽车撞击的结构构件的相关部位可采取相应的构造措施,并增设钢筋或钢筋网。

8.2.19 隧道如需要考虑平战结合,一般只涉及 5 级或 6 级人防设计。在核爆动荷载作用下,结构构件变形极限已由允许延性比的控制,且在确定各种构件允许延性比时,已考虑了对变形的限制,因而在防空地下室结构设计中,不必再单独对结构构件的变形与裂缝开展进行验算,一般只进行强度的验算。

如果人防管理部门明确公路隧道必须按人防工工程设计,则其人防荷载应根据现行《人民防空地下室设计规范》(GB50038)有关规定办理,且需办理相关审批手续。如果仅仅因为工程的重要性而考虑人防荷载,一般也可直接参照表 8.2.19-1~8.2.19-3 取值进行结构设计。

表 8.2.19-1 顶板等效静荷载标准值 (kN/m²)

覆土厚度 (m)	防常规武器抗力级别	
	5	6
0.0<h≤0.5	110~90(88~72)	50~40(40~32)
0.5<h≤1.0	90~72(72~56)	40~30(32~24)
1.0<h≤1.5	70~50(56~40)	32~15(24~12)
1.5<h≤2.0	50~30(40~24)	—
2.0<h≤2.5	30~15(24~12)	—

- 注: 1、顶板弹塑性工作阶段计算,允许延性比[β]取 4.0。
2、h 较小时,荷载取大值。
3、()内为考虑上部建筑影响的取值。

表 8.2.19-2 非饱和土中外墙等效静荷载标准值 (kN/m²)

顶板埋置深度 (m)	土的类别	防常规武器抗力级别			
		5		6	
		砌体	钢筋砼	砌体	钢筋砼
0.0<h≤1.5	碎石土、粗砂、中砂	85~60	70~40	45~25	30~20
	细砂、粉砂	70~50	55~35	35~20	25~15
	粉土	70~55	60~40	40~20	30~15
	粘性土、红粘土	70~50	55~35	35~25	20~15
	老粘性土	80~60	65~40	40~25	30~15
	湿陷性黄土	70~50	55~35	35~20	25~15
	淤泥质土	50~40	35~25	25~15	15~10
1.5<h≤3.0	碎石土、粗砂、中砂	40~30		20~15	
	细砂、粉砂	35~25		15~10	
	粉土	40~25		15~10	
	粘性土、红粘土	35~25		15~10	
	老粘性土	40~25		15~10	
	湿陷性黄土	35~20		15~10	
	淤泥质土	25~15		10~5	

注：1.砌体按弹性工作阶段计算，净高 $\leq 3.0\text{m}$ ，开洞 $\leq 5.4\text{m}$ ，钢筋砼按弹塑性工作阶段计算， $[\beta]$ 取 3.0 计算高度 5.0m。

2. h 较小时，荷载取大值。

表 8.2.19-3 饱和土中外墙等效静荷载标准值 (KN/m²)

顶板埋置深度 (m)	饱和土含气量 $\alpha_1(\%)$	防常规武器抗力级别	
		5	6
0.0< h ≤1.5	1	100~50	50~30
	≤0.05	140~100	70~50
1.5< h ≤3.0	1	80~60	30~25
	≤0.05	100~80	50~30

注：1.钢筋砼外墙计算高度 5.0m。允许延性比 $[\beta]$ 取 3.0。

2. α_1 大于 1 时按非饱和土取值。0.05-1.0 内插法取值。

3. h 较小时，荷载取大值。

【条文说明】常规武器地面爆炸时，防空隧道拱顶区域主要承受空气冲击波感生的地冲击作用。一般来说，距常规武器爆心越远，拱顶上受到的动荷载越小。另外，盾构隧道外径不同，其等效静荷载值也不一样。为便于设计，本规范对同一覆土厚度不同区格跨度顶板的等效静荷载取单一数值。相关试验和数值模拟研究表明：常规武器爆炸空气冲击波在松散软土等非饱和土中传播时衰减非常快。当防空地下室顶板覆土厚度对于常 5 级、常 6 级分别大于 2.5m、1.5m 时，动荷载值相对较小，拱顶设计通常由平时荷载效应组合控制，故此时拱顶可不计入常规武器地面爆炸产生的等效静荷载。

8.2.20 隧道结构应进行施工阶段荷载组合分析，且应符合以下规定：

1 一般情况下，施工阶段可不考虑偶然荷载的作用。必要时，可考虑施工期火灾对隧道衬砌和防水材料的影响。

2 应考虑盾构顶进压力、注浆压力及其浮力对结构受力的影响。

【条文说明】施工阶段荷载组合分析，重点需明确：盾构法隧道施工过程中可能出现的作用形态及分布；这些作用引起的结构内力存在着与使用阶段作用引起结构内力叠加的可能性；结构强度安全系数检查引用的内力值应该是各种工况及使用阶段内力的包络线。

9 结构计算

9.1 管片结构计算

9.1.1 隧道管片横断面结构计算必须根据设计区段中最不利条件确定，宜对下列关键断面进行分析计算：

- 1 覆盖层最薄及最厚的断面。
- 3 (地下) 水位最低及最高的断面。
- 2 下穿建筑物、道路附加荷载大的断面。
- 3 偏压荷载较大的断面。
- 4 横向地形或地质变化较大的断面。
- 5 管片拼装位错较大的断面。
- 6 临近既有或规划的建(构)造物断面。

9.1.2 不同的设计阶段，管片内力计算可采用不同的计算方法，并符合以下规定：

- 1 预工可设计阶段，或者围岩条件较好时，可采用均质圆环法计算；
- 2 初步设计及施工图设计阶段，宜采用修正惯用法和梁弹簧法计算，对于大直径、大埋深的隧道，有条件时，可采用壳弹簧法计算。

【条文说明】盾构隧道管片由于接头的存在，对衬砌内力分布会造成一定的影响。衬砌环计算对接头的处理常用的有两种方法：第一种是将衬砌环看做刚度均匀的结构，但考虑到接头的存在，将结构的刚度进行折减；第二种是将接头看做可以承受轴力和一定弯矩的弹性铰。目前，关于盾构隧道衬砌的计算方法有很多的研究，设计中常用的有：惯用法、修正惯用法、多铰圆环法、梁-弹簧法和壳-弹簧法。

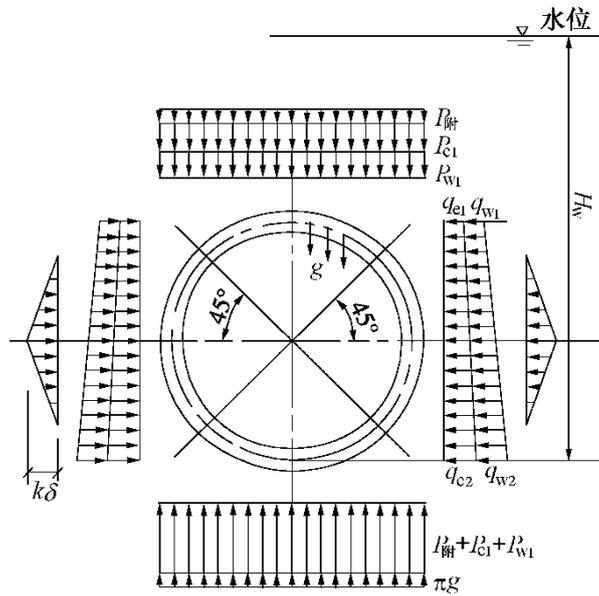
1 惯用法

惯用法是将管片环作为刚度均匀的环来考虑的设计算法,此方法不考虑管片接头部分的弯曲刚度下降,管片环和管片主截面具有同样刚度并且弯曲刚度均匀的方法。

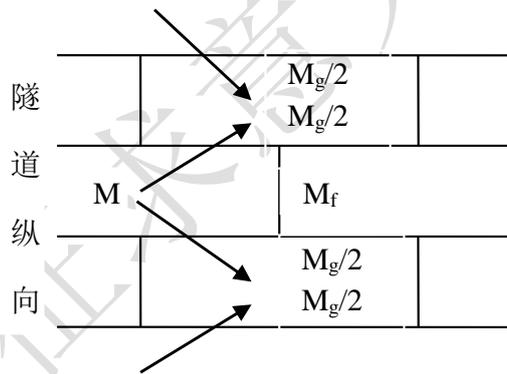
2 修正惯用法

结构按均质圆环考虑，考虑接头对结构刚度的影响，管环整体结构刚度取

为 $(1-\eta)EI$ ， η 为刚度折减系数，通常 $\eta = 0.2 \sim 0.3$ ，同时考虑错缝拼装管片接头部位弯矩的传递效应，对管片弯矩进行重分配。



9.1.2-1 修正惯用法荷载计算图式



9.1.2-2 弯矩传递及分配示意

$$\text{接头处内力: } M_f = (1-\zeta)M \quad N_f = N$$

$$\text{管片: } M_g = (1+\zeta)M \quad N_g = N$$

式中： ζ ——弯矩调整系数，通常取 0.2~0.3

M 、 N ——分配前按均质圆环计算弯矩及轴力

M_f 、 N_f ——分配后接头弯矩和轴力

M_g 、 N_g ——分配后管片本体弯矩和轴力

3 多铰圆环法

该法适用于具有一定强度的良好地层，把管片接头看作铰构造进行计算。

多铰环自身属于不稳定构造，但在周围地层土体的支撑围护作用下成为稳定构造。作用于管环上的荷载以主动土压力方式作用，与惯用法的荷载形式一致，伴随环的变形和变位产生的地层反力，通常按照文克勒假定进行计算。

4 弹性铰圆环法

装配式钢筋混凝土管片是由多块管片拼装而成的圆形衬砌环，管片与管片之间采用环向螺栓连接，衬砌环与环之间采用纵向螺栓连接。在考虑管片结构横向受力时，可近似按平面应变模型考虑，取延米衬砌进行计算分析。在管片接头处，其圆环刚度小于管片本体截面刚度，但仍能传递一定弯矩，因此，将管片接缝视为一个弹性铰，整个衬砌圆环是一个含多个弹簧铰的衬砌圆环。

计算过程中，接头处的弹性铰采用一个旋转弹簧模拟，并假设铰接弹簧所传递的弯矩 M 与转角 θ 成正比，即： $M = K_\theta \theta$ ，式中， K_θ 为旋转弹簧刚度。地基弹簧采用文克勒的假定弹簧，对地基弹性抗力进行模拟，衬砌周边全周均作用地基弹簧，但当弹簧出现受拉则弹簧自动解除。管片环接头处采用径向、切向不发生错位考虑（即假定接头处径向、切向变位为 0），但采用回转弹簧模拟管片接头抗弯刚度折减，回转弹簧的刚度取值对计算结果影响较大。管片纵缝接头形式、隧道所处的地层地质条件、隧道埋深等均对 K_θ 有较大影响， K_θ 的取值合理范围通常在 $30MN \cdot m / rad \leq K_\theta \leq 3000MN \cdot m / rad$ 。在计算过程中，采用不同的 K_θ 值对进行结构分析，分析其变化规律，得出确保结构安全可靠的内力值。

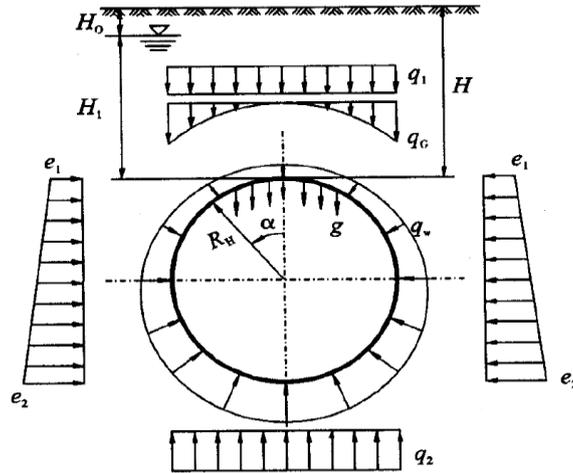


图 9.1.2-3 弹性铰圆环法荷载作用模式

5 梁-弹簧法

梁-弹簧法又称 M-K 法，由日本学者村上（Murakami）和小泉（Koizumi）提出，该法利用地基弹簧模拟荷载，将管片主截面简化为圆弧梁或直线梁，将管片接头考虑为旋转弹簧，将管片环接头考虑为剪切弹簧，以评价错缝拼装效应。由于环间接头将引起管片环间的相互咬合作用，此时除考虑计算对象的环外，将对其有影响的前后环的 1/2 环也作为对象，采用空间结构进行计算。此模型同时考虑了管片接头刚度、接头位置及错缝拼装效应，在各种地层中均能得到较为理想的计算结果，是一种较为合理的计算模型。

如将该方法剪切弹簧常数和旋转弹簧常数同时设定为零时，则基本上与多铰环算法相同；如将剪切弹簧常数设定为零，将旋转弹簧常数设为无限大时，则与刚度均匀环的算法相同。所以可以认为这一方法不但包含了上述两个方法，同时还可以利用管片环接头剪切刚度的大小表征错接接头的拼装效应。所以从力学机理上讲是解释管环承载机制的有效方法。

该算法使用的荷载基本上都是惯用荷载系统，然而也有将地基抗力全部或者部分转换成地基弹簧进行计算的方法。

用梁-弹簧模型可以对任意一种管片环的组装法以及接头的位置进行解析，也可以计算出环接头上产生的剪力。旋转弹簧常数和剪切弹簧常数除了可用试验求得外，对于一般性的管片接头，也可通过计算求出。

如果对剪切弹簧常数取值偏小，则主截面的计算弯矩也会偏小，所以，为了安全起见，也常采用将其设定为无穷大的方法。

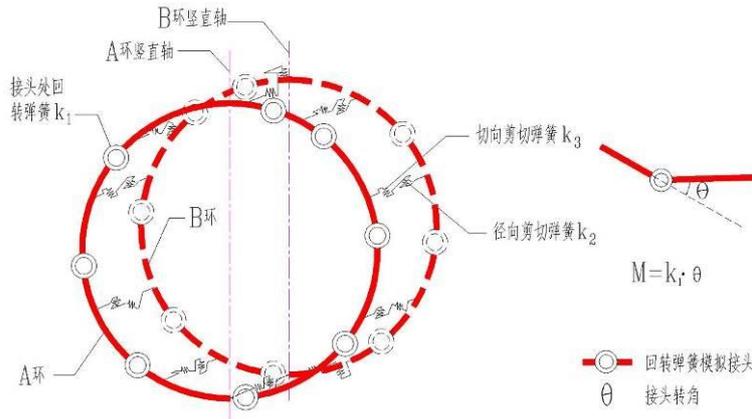


图 9.1.2-4 梁-弹簧模型计算示意图

6 壳-弹簧法

壳-弹簧法采用三维弧形弹性壳单元模拟单个管片体。三维壳面衬砌模型由 1 个整环和 2 个半环组成。以中间整环为研究对象。管片接头采用抗弯弹簧模拟，该弹簧沿管片接缝密布，抗弯刚度之和等于管片接头抗弯刚度值。环间接头采用环间径向剪切弹簧和环向剪切弹簧两种，对应布置在环间螺栓部位，将地层与管片环之间的相互作用用地层弹簧来表示。壳-弹簧法克服了用梁单元模拟管片壳体的不足，可以体现出管片内力沿幅宽的三维分布，是一个比梁-弹簧模型更接近实际情况的设计计算方法。

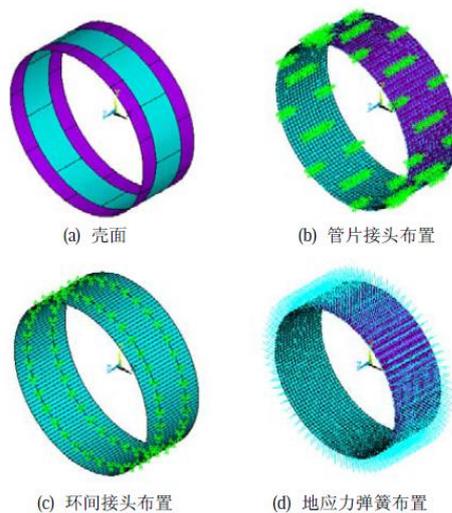


图 9.1.2-5 壳-弹簧计算模型

不管是那一种方法，在自重、上覆荷载、垂直土压力、水平土压力及上部垂直荷载抗力的设定是基本一致的。主要的区别在于水平地层抗力的设定方法上，惯用法和修正惯用法是将水平地层抗力作为一个三角形均布荷载来考虑，

而多铰环法、梁-弹簧法及壳-弹簧法是通过地层弹簧来考虑的。

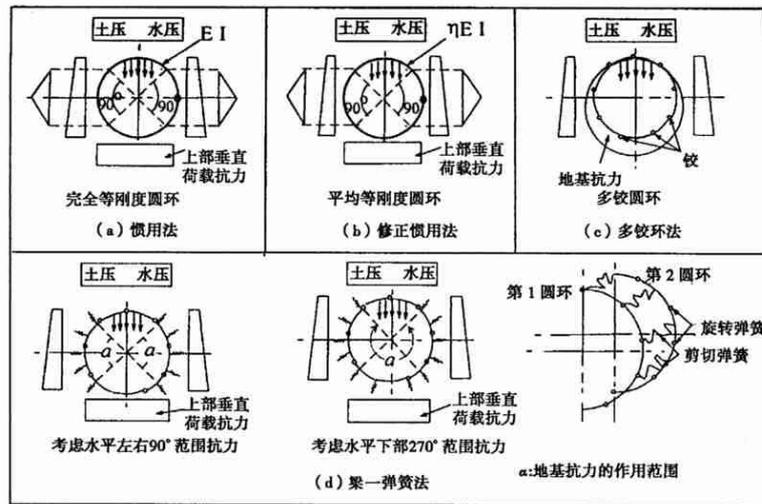


图 9.1.2-6 盾构衬砌常用计算模型

9.1.3 管片的刚度计算应符合以下规定：

1 管片横断面内力计算时，接头抗弯刚度系数应根据模型试验、管片接头三维有限元分析、经验公式或理论公式计算等方法分析确定。

2 当无条件时，接头抗弯刚度可根据盾构直径、分块形式、环宽、螺栓配置情况，参照类似工程对比确定。

3 当采用梁-弹簧法和壳-弹簧法进行计算时，环与环之间的径向剪切弹簧和切向剪切弹簧刚度值宜根据试验结果确定，在无条件时，可按最不利情况考虑。

【条文说明】当采用工程类比确定接头抗弯刚度时，可参考下表中的数据。

表 9.1.3 国内部分盾构隧道管片接头抗弯刚度值统计

工程名称	管片 外径 (m)	管片			环向螺栓	接头抗弯刚度 ($\times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{rad}$)
		厚度 (cm)	环宽 (cm)	分块 形式		
南京纬三路过江通道	14.5	60	200	7+2+1	3M36 斜	$3^{\sim}4$ (数) $-3^{\sim}-4$ (数)
南京长江隧道	14.5	60	200	7+2+1	3M36 斜	$3^{\sim}7.5, -4^{\sim}-9.5$
武汉长江隧道	11	50	200	9 等分	4M36 弯	4, -2.4(模)
上海长江隧道	15.0	0.65	200	7+2+1	2M36	2.72 \sim 7.04 (模), 5.70 \sim 6.18 (数)
广州港狮子洋隧道	10.8	50	200	5+2+1	3M36 斜	4, -5(模)
南水北调中线穿黄隧道	8.7	40	160	4+2+1	4M30 直	0.45 \sim 0.61 (数)

南京地铁南北线	6.2	35	120	3+2+1		0.52, -0.63 (模)
广州地铁	6	30	150	3+2+2	2M24 弯	0.012, -0.023 (模)
上海地铁	6.2	35	120	3+2+3		0.06~0.2 (数)
武汉地铁	6.2	35	150	3+2+1		0.8, -0.5

注：表中“模”表示模型试验，“数”表示数值模拟。

9.1.4 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。弹性抗力的大小可用如下公式计算：

$$F_d = K_d \delta \quad (9.1.4-1)$$

式中：

F_d ——弹性抗力 (kN/m²)

K_d ——弹性抗力系数 (kPa/m)

δ ——结构变形量 (m)

【条文说明】地层抗力的确定，需要注意一下特点：

(1) 弹性抗力需在注浆硬化后才产生，因此在设计时一方面对施工阶段的计算需要慎重处理，同时对同步注浆的浆液材料应有较好的早期强度。

(2) 当弹性抗力系数 K 为 $0 \sim 10 \text{ MN/m}^3$ 时，它对内力的影响很大，必须仔细研究土质和施工情况后选用。

(3) 在砂土中，如开挖面的稳定性好，背部注浆可得到比较好的质量，围岩的松散程度不太严重，可取用表中的高值。反之，如开挖面不稳定，即使 N 值比较大，也应该用表中的低值。下表为根据标准贯入试验 N 值而定的土体侧压力系数和地层反力系数。

表 9.1.4 土体侧压力系数和地层反力系数与标准贯入试验 N 值的关系

土体种类	λ	k (MN/m ³)	N
极密类的砂	0.35~0.45	30~50	$N \geq 30$
非常坚硬的粘性土			$N \geq 25$
密实砂性土	0.45~0.55	10~30	$15 \leq N < 30$
硬粘性土			$8 \leq N < 25$
中硬粘性土			$4 \leq N < 8$
松砂性土	0.50~0.60	0~10	$N < 15$
软粘土	0.55~0.65	0~5	$2 \leq N < 4$
极软粘土	0.65~0.75	0	$N < 2$

9.1.5 结构内力计算时，地层抗力宜采用“抗压不抗拉”的地层弹簧模拟。在采用数值分析时中，可以用抗压不抗拉的杆单元或者非线性弹簧单元模拟。

9.1.6 地层弹簧的弹性抗力系数应根据土质条件来确定。在一般地下工程勘测中可以通过试验提供抗力系数，在资料不具备时可参考《公路隧道设计细则》（JTG/TD70）选取。盾构隧道计算中在使用抗力系数时应注意盾构隧道的自身特点。

9.1.7 纵断面方向结构计算应满足以下规定：

1 当隧道埋置深度沿纵向变化较大，地质条件沿纵向变化较大，上部附加荷载沿隧道纵向分布变化较大，小半径曲线施工，宜对结构纵向强度与变形进行计算。

2 隧道的纵向计算按弹性地基梁进行，在施工图阶段将以考虑接头影响的弹性地基梁进行复核。

【条文说明】纵断面方向结构计算可采用图 9.1.7-1、9.1.7-2 的计算模型。

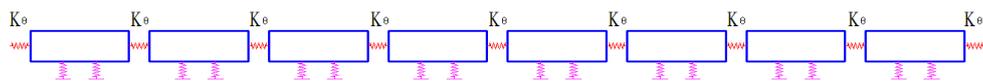


图 9.1.7-1 管片环间接头模拟

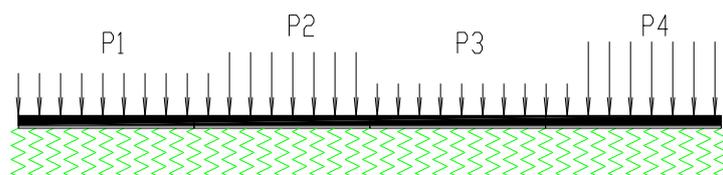


图 9.1.7-2 隧道纵向计算模型

9.1.8 接头计算应满足以下规定：

1 采用修正惯用法设计接头截面的内力时，对于弯矩可参照弯矩提高率，做折减处理。

2 当作为多铰圆环计算管片的截面内力时，管片接头只需要传递剪力和轴力。但从便于施工出发，接头必须能够抵抗组装管片过程中产生的弯矩。

3 当采用梁弹簧或壳弹簧模型进行计算时，通过计算可直接得到接头位置的截面内力，可选择其中最大的内力，将弯矩、轴力和剪力进行适当的组合进

行设计。此时，接头必须能满足计算截面内力所采用的弹簧刚度。

4 对于管片接头的剪应力计算一般可以省略，但在径向插入型 K 管片上，如果接头角度较大，则需要对 K 管片的脱落进行研究。

5 管片环接头宜考虑地震影响、隧道纵向错位和施工的影响。

6 宜对管片接头接缝沟槽的抗剪承载力进行计算，从而确定弹性密封垫的最大允许装配力。

9.2 施工计算

9.2.1 应对管片施工过程中管片堆放、管片单点吊装时的受力情况进行验算。管片堆放计算示意图见图 9.2.1-1，管片单点吊装计算示意图见图 9.2.1-2。

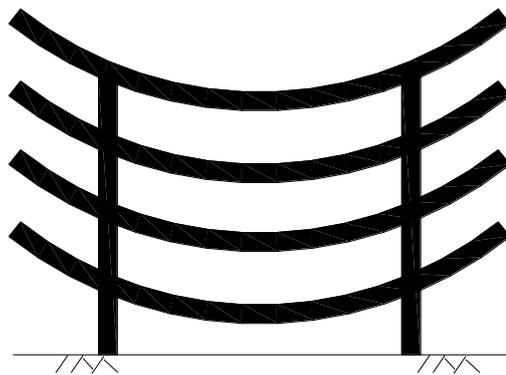


图 9.2.1-1 管片堆放计算示意图

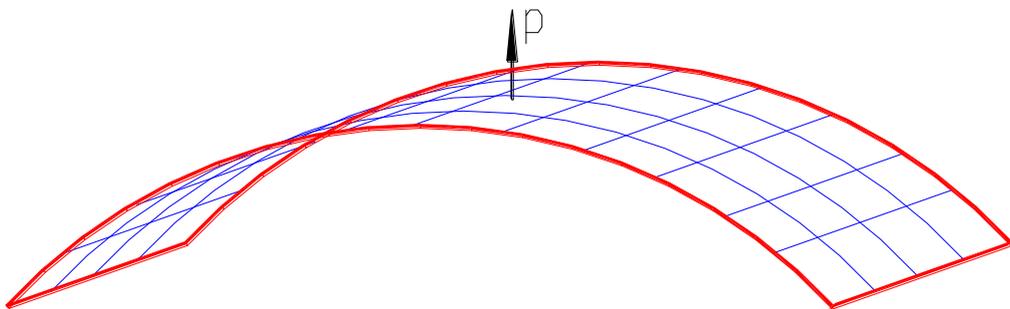


图 9.2.1-2 管片单点吊装计算示意图

9.2.2 设计中应考虑千斤顶荷载对管片结构配筋的影响，采用容许应力法进行计

算。千斤顶荷载安全系数取 1.75。

9.2.3 始发前应进行反力架刚度、稳定性、加工质量验算及检查，对地面配套设备进行同步联机调试。

9.3 管内主体结构计算

9.3.1 设置二次衬砌时，应考虑水压力作用在不同界面时对结构可靠性的影响。

1 管片衬砌防水完好时，地层荷载和水荷载等外荷载都直接作用在管片衬砌上。

2 管片衬砌出现防水渗漏时，全部地层荷载和部分水荷载直接作用在管片衬砌上，其余水荷载则直接作用在二次衬砌上。

9.3.2 由管片衬砌和二次衬砌构成的隧道衬砌应视为双层结构式衬砌，其受力计算应满足以下规定：

1 构件内力按其完成后施加在衬砌上的荷载来进行计算。

2 当双层衬砌层间具有足够大的抗剪强度时，可按整体结构进行计算，其它情况按仅传递径向压力的重合板进行结构计算。

【条文说明】二次衬砌多用于保护管片的防腐蚀、防渗、校正中心线偏离、改善内表面平滑和内部装饰、加固一次衬砌的管片和防止不可预测的荷载变化引起隧道变形的措施、防止隧道浮起、防振、防噪的压重措施、耐火防管片老化、内部设施的设置与固定及隔墙措施等，根据上述用途，对二次衬砌构件可不计截面力。另一方面，考虑到隧道建成后来自新建的相邻结构物（隧道、建筑物基础和填土荷载）的影响，以及隧道分叉处断面补强或不均匀沉降处理和地震时的动力特性，在轴向设计中，有时必须将二次衬砌也当作主体结构予以考虑。

当双层衬砌按重合板计算时，可假定内外层之间只传递法向压力而没有剪力和弯矩，双层之间的作用沿周向均布的不抗拉压缩弹簧模拟。对于层间压缩弹簧，可假定其压缩刚度等于内外层压缩区混凝土柱的抗压刚度。

9.3.3 对于非结构型构件的二次衬砌，可以仅用其自重作为加荷条件予以设计计算。

9.3.4 对于承受内水压力的隧道，应选择适当的包括二次衬砌在内的结构模型，考虑应力历史与应力路径进行研究。

【条文说明】根据地下水位和内水压力等条件，作用的土压力越大未必衬砌应

力越大，应考虑土水压力范围的最大值与最小值条件下结构的截面内力。

9.3.5 管内主体结构计算

1 隧道车道板的内力与变形计算，宜与侧墙、立柱一同考虑，按照空间板壳结构进行计算，荷载的选取应符合《公路桥涵设计通用规范》的规定。

2 口字件可以按箱型结构进行计算，应考虑施工荷载的影响。

9.4 抗浮验算

9.4.1 隧道抗浮验算应符合以下规定：

1 抗浮验算仅考虑永久荷载的作用效应。

2 覆土厚度应考虑设计寿命期内的变化，如疏浚、冲刷以及后期人工开挖等因素。

3 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容重计算；

4 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。

5 盾构施工期的抗浮验算，宜考虑注浆的影响。

【条文说明】永久荷载术语的含义参考《建筑结构荷载规范》(GB 50009)，应包括结构构件、围护构件、面层及装饰、固定设备、长期储物的自重，土压力、水压力，以及其他需要按永久荷载考虑的荷载。

覆土厚度在设计寿命期内有可预见的变化时应考虑验算最危险工况，包括人工开挖、河床冲刷或海床演变等引起的变化。

对盾构施工期的抗浮验算，宜考虑同步注浆的浆液未凝固时的重度。

9.4.2 盾构隧道抗浮验算：

在工程实践中，对盾构隧道抗浮验算常采用简化计算的方法，通过简单分析管片上浮力与上部土柱重量的平衡来估计需要的上覆土层厚度，偏安全考虑，不考虑土体侧摩阻力的有利作用。

$$\frac{W_s + W_a + F_{z,3}}{F_f} \geq K_f \quad (9.4.2-1)$$

$$F_f = r_b r_w V \quad (9.4.2-2)$$

式中： F_f ——浮力设计值（kN/m）。

r_b ——浮力作用分项系数，取 1.0。

r_w ——水或液化土体的标准容重（kN/m³）；

V ——计算单元中隧道结构封闭外轮的体积（m³/m）；

W_s ——隧道结构自重标准值（kN/m）；

W_a ——隧道上覆土层的有效压重标准值（kN/m）；

F_z ——结构基桩或抗浮构造的抗浮力设计值（kN/m）；

K_f ——抗浮安全系数，按 9.4.3 条确定。

9.4.3 盾构隧道使用过程中的抗浮安全系数不宜低于 1.2，在施工过程中的抗浮安全系数不宜低于 1.1。对地震液化及其他超设计标准工况进行抗浮校核时，抗浮安全系数可取 1.05。

【条文说明】关于隧道抗浮安全系数，尚无统一规定，本条根据相关规范及工程实践经验确定。目前，不同规范对抗浮验算有不同的规定。根据《道路隧道设计规范》(DGT J08- 2033)，盾构隧道的抗浮安全系数，施工阶段取 1.1，使用阶段取 1.2；沉管隧道的抗浮安全系数，沉放、对接阶段取 1.02，使用阶段取 1.2。《地铁设计规范》(GB50157)规定：“抗浮安全系数当不计地层侧摩阻力时不应小于 1.05；当计及地层侧摩阻力时，根据不同地区的地质和水文地质条件，可采用 1.10~1.15 的抗浮安全系数。”《给水排水工程管道结构设计规范》(GB 50332)规定：“对埋设在地表水或地下水以下的管道，应根据设计条件计算管道结构的抗浮稳定。计算时各项作用均应取标准值，并应满足抗浮稳定性抗力系数不低于 1.10”。

《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50332)规定，构筑物在基本组合作用下的设计稳定抗力系数 K_s 上浮时不小于 1.05，验算时，抵抗力应只计入永久作用，而可变作用和侧壁上的摩擦力不应计入；抵抗力和滑动、倾覆力应均采用标准值。

对于盾构隧道结构，其线路较长，场地条件及地下水位的变异性较大；与单体地下建筑物相比，其侧壁摩擦所能提供的安全储备偏低，同时，由于防水等影响对差异变形要求较严格。本规范根据不同类别的隧道结构特点，参照各地工程

实例，分别按不同工法隧道与不同施工阶段，推荐采用相应抗浮安全系数作为设计最低限值。

9.5 结构验算

9.5.1 结构验算应符合以下规定：

1 公路盾构隧道衬砌结构应同时对结构承载能力极限状态及正常使用极限状态进行验算。

2 当隧道支护或结构构件出现下列状态之一时，应认为超过了承载能力极限状态：

1) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡，如洞门或始发接收井支护倾覆等。

2) 支护结构或连接因超过材料强度而破坏(包括疲劳破坏)，或因过度变形而不适于继续承载，如衬砌开裂或出现过大收敛变形。

3) 地基丧失承载能力而破坏，如基础出现过大沉降或地基出现滑移等。

3 当隧道支护或结构构件出现下列状态之一时，应认为超过了正常使用极限状态：

1) 影响正常使用或外观的变形，如超过规定的错台、收敛变形或差异沉降。

2) 影响正常使用或耐久性能的局部破坏，如应力过大产生开裂。

4 应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。

5 当隧道埋深或地基沿纵向变化较大时，应对纵向强度、刚度及差异沉降进行验算。

【条文说明】载能力极限状态可理解为结构或结构构件发挥允许的最大承载功能的状态。结构构件由于塑性变形而使其几何形状发生显著改变，虽未达到最大承载能力，但已彻底不能使用，也属于达到这种极限状态。

疲劳破坏是在使用中由于荷载多次重复作用而达到的承载能力极限状态。

正常使用极限状态可理解为结构或结构构件达到使用功能上允许的某个限值的状态。例如，某些构件必须控制变形、裂缝才能满足正常使用要求。因过大的变形会造成隧道衬砌结构破坏等后果；过大的裂缝会影响结构的耐久性；

过大的变形、裂缝会造成使用者心理上的不安全感。

9.5.2 隧道结构应按承载能力极限状态校核计算，结构上的作用（荷载）效应组合应符合式（9.5.2）的规定：

$$\gamma_0 \gamma_1 S(\gamma_m f_r, \alpha_k) \leq R\left(\frac{f_k}{\gamma_f}, \alpha_k, C\right) \quad (9.5.2)$$

式中： $S(\cdot)$ ——与作用在结构之上的荷载相关的作用效应函数。

$R(\cdot)$ ——与结构材料强度及几何尺寸相关的结构抗力效应函数。

f_r ——作用在结构之上的作用组合标准值。

f_k ——结构材料性能的标准值或极限值。

α_k ——结构的几何参数标准值。

C ——结构的极限约束值。

γ_0 ——结构重要性系数，见表 9.5.3。

γ_1 ——结构附加安全系数，见表 9.5.4-1。

γ_m ——作用在结构之上的荷载分项系数，见表 9.5.4-2。

γ_f ——结构材料性能的分项系数，见表 9.5.5。

【条文说明】为了使所设计的结构构件在不同情况下具有比较一致的可靠度，本规范采用了多个分项系数的极限状态设计表达式，即根据各种极限状态的设计要求，采用有关的荷载代表值、材料性能标准值、几何参数标准值以及各种分项系数等表达

9.5.3 隧道的结构重要性系数（ γ_0 ）应按表 9.5.3 取值。

表 9.5.3 结构重要性系数（ γ_0 ）

结构安全等级	重要性系数
一级	1.1
二级	1.0
三级	0.9

9.5.4 隧道支护结构附加安全系数 (γ_1) 应按表 9.5.4-1 取值, 作用在结构之上的荷载分项系数 (γ_m) 应按表 9.5.4-2 取值。

表 9.5.4-1 支护结构附加安全系数 (γ_1)

结构类型	分项系数
明洞、洞门等的现浇结构	1.05
盾构隧道的预制结构	1.0

对于隧道承载能力极限状态基本组合 (ULS)、承载能力极限状态偶然组合 (ALS)、正常使用极限状态标准组合 (SLS), 作用在结构之上的荷载分项系数 (γ_m) 应按表 9.5.4-2 取值。

表 9.5.4-2 荷载分项系数

编号	荷载分类		荷载名称	荷载分项系数 (γ_m)		
				ULS	ALS	SLS
1	永久荷载		竖向及水平土压力	1.4	1.0	1.0
2			水压力	1.1	1.0	1.0
3			结构自重	1.4	1.0	1.0
4			装修或设备自重荷载	1.4	1.0	1.0
5			地面建筑物的影响力	1.2	1.0	1.0
6			地面超载	1.2	1.0	1.0
7			混凝土收缩及徐变	1.4	1.0	1.0
8			结构基础变位影响力	1.2	0.5	1.0
9	可变荷载	基本可变荷载	地面车辆影响力	1.4		0.5
10			隧道内车辆及人群荷载影响力	1.4	1.0	0.5
11			水位变化及波浪的影响力	1.4	1.0	
12			风机等设备引起的动荷载	1.4	1.0	
13		其他可变荷载	温度变化影响力	1.4	1.0	1.0
14			地面施工荷载	1.4		
15			施工荷载(千斤顶推力、注浆压力等)	1.4		
16	偶然荷载		地震作用力		1.0	
17			爆炸荷载		1.0	
18			火灾影响力		1.0	
19			撞击荷载		1.0	
20			沉船及抛锚荷载		1.0	

注: 1、当永久荷载对结构的承载能力有利时, 其分项系数可降低 0.2 (水压力除外)。

2、竖向土压力与水平土压力应独立组合。

3、偶然荷载相互之间不组合。

9.5.5 结构材料强度标准值除以材料性能分项系数可得到材料强度设计值。考虑到不同种类材料强度值的离散性, 故采用其不同的分项系数。隧道材料性能的分项系数 (γ_f) 应按表 9.5.5 取值。

表 9.5.5 材料的分项系数 (γ_f)

强度类型		分项系数
钢筋混凝土	混凝土抗压强度	1.45
	混凝土抗拉强度	1.60
	钢筋抗压强度	1.25
	钢筋抗拉强度	1.25
	钢绞线及钢丝	1.50
钢结构	抗压强度	1.25
	抗拉强度	1.25

【条文说明】材料性能分项系数，用以通过结构材料强度标准值求得材料强度设计值，考虑到不同种材料强度值的离散性，故采用其不同的分项系数。本规范材料分项系数的取值，接近于按一级安全等级结构分析的目标可靠指标要求。

9.5.6 钢筋混凝土结构构件的承载能力极限状态计算

1 钢筋混凝土轴心受压构件，其正截面强度应符合式（9.5.6-1）的规定：

$$\gamma_0 \gamma_1 N \leq 0.9 \varphi \left(\frac{f_{ck}}{\gamma_{ck}} A + \frac{f_{sk}}{\gamma_s} A_s' \right) \quad (9.5.6-1)$$

式中： φ ——钢筋混凝土构件的稳定系数，按表 9.5.6-1 查取；

表 9.5.6-1 钢筋混凝土构件的稳定系数 φ

l_0/b	≤ 8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
l_0/d	≤ 7	8.5	10.5	12	14	15.5	17	19	21	22.5	24
l_0/r	≤ 28	35	42	48	55	62	69	76	83	90	97
φ	1.0	0.98	0.95	0.92	0.87	0.81	0.75	0.70	0.65	0.60	0.56
l_0/b	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
l_0/d	26	28	29.5	31	33	34.5	36.5	38	40	41.5	43
l_0/r	104	111	118	125	132	139	146	153	160	167	174
φ	0.52	0.48	0.44	0.40	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.21	0.19

注：（1）表中 l_0 为构件计算长度， b 为矩形截面短边尺寸， d 为圆形截面直径， r 为截面最小回转半径。

（2）构件计算长度 l_0 的确定：两端固定为 $0.5l$ ；一端固定，一端为不移动的铰为 $0.7l$ ；两端均为不移动的铰为 l ；一端固定，一端自由为 $2l$ （ l 为构件支点间长度）。

2 钢筋混凝土矩形截面或翼缘位于受拉区的 T 形截面受弯构件，其正截面承载力应符合式（9.5.6-2）的规定：

$$\gamma_0 \gamma_1 M \leq \frac{f_{ck}}{\gamma_{ck}} bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \frac{f_{sk}}{\gamma_s} A_s' (h_0 - a_s') \quad (9.5.6-2)$$

此时，中性轴的位置按下列公式确定：

$$\frac{f_{sk}}{\gamma_s} A_s - \frac{f_{sk}}{\gamma_s} A_s' = \frac{f_{ck}}{\gamma_{ck}} bx \quad (9.5.6-3)$$

混凝土受压区高度 x 应符合下列条件：

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (9.5.6-4)$$

$$x \geq 2a'_s \quad (9.5.6-5)$$

式中：

N ——轴向力设计值；

M ——弯矩设计值；

f_{ck} ——混凝土抗压强度标准值；

γ_{ck} ——混凝土抗压强度分项系数；

γ_s ——钢筋抗压、抗拉强度分项系数；

b ——矩形截面宽度或倒 T 形截面的腹板宽度；

h_0 ——混凝土截面有效高度；

f_{sk} 、 f'_{sk} ——钢筋抗拉、抗压强度标准值；

A ——构件毛截面面积，当纵向钢筋配筋率大于 3% 时， A 应改用 $A_n = A - A'_s$ ；

A_s 、 A'_s ——受拉区、受压区纵向钢筋截面面积；

a'_s ——受压钢筋合力点至受压区边缘的距离；

ξ_b ——混凝土受压区高度界限系数，按表 9.5.6-2 采用。

表 9.5.6-2 混凝土受压区高度界限系数 ξ_b

钢筋种类	混凝土标号		
	C50 及以下	C55、C60	C65、C70
HRB400	0.53	0.51	0.49
精轧螺纹钢	0.40	0.38	0.36

注：(1) 截面受拉区内配置不同种类钢筋时， ξ_b 值应选用相应于各种钢筋的较小者；

(2) $\xi_b = x_b/h_0$ ， x_b 为纵向受拉钢筋和受压区混凝土同时达到其强度设计值时的受压区高度。

3 钢筋混凝土矩形截面偏心受压构件的正截面承载力计算应符合下列规定：

$$\gamma_0 \gamma_1 N \leq \frac{f_{ck}}{\gamma_{ck}} bx + \frac{f'_{sk}}{\gamma_s} A'_s - \sigma_s A_s \quad (9.5.6-6)$$

$$\gamma_0 \gamma_1 Ne \leq \frac{f_{ck}}{\gamma_{ck}} bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \frac{f'_{sk}}{\gamma_s} A'_s (h_0 - a'_s) \quad (9.5.6-7)$$

(1) 当 $\xi = \frac{x}{h_0} \leq \xi_b$ 时，构件属于大偏心受压，应符合下列规定：

①式 (9.5.6-6) 中的 σ_s 应采用 f'_{sk}/γ_s ；

②在计算中计入纵向受压钢筋时，混凝土受压区高度应符合(9.5.6-5)的要求；不符合公式(9.5.6-5)的要求时，构件正截面承载力可按下式计算：

$$\gamma_0 \gamma_1 N e' \leq \frac{f_{sk}}{\gamma_s} A_s (h_0 - a'_s) \quad (9.5.6-8)$$

③按公式(9.5.6-8)求得的构件承载力比不考虑受压钢筋更小时，在计算中不应考虑受压钢筋的作用。

(2) 当 $\xi > \xi_b$ 时，构件属于小偏心受压，应符合下列规定：

① σ_s 则按式(9.5.6-9)计算，但不应大于 f_{sk}/γ_s 值。

$$\sigma_s = 0.003 E_s \left(\frac{\beta_1}{\xi} - 1 \right) \quad (9.5.6-9)$$

表 9.5.6-3 系数 β_1 值

混凝土强度等级	C50 及以下	C55	C60	C65	C70	C75	C80
β_1	0.8	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74

②当纵向力作用在钢筋 A'_s 的合力点与钢筋 A_s 的合力点之间时，尚应按式(9.5.6-10)进行验算：

$$\gamma_0 \gamma_1 N_f e' \leq \frac{f_{ck}}{\gamma_{ck}} b h \left(h'_0 - \frac{h}{2} \right) + \frac{f'_{sk}}{\gamma_s} A'_s (h'_0 - a_s) \quad (9.5.6-10)$$

式中：

σ_s ——小偏心受压构件中受拉（或受压较小边）钢筋的应力；

β_1 ——截面受压区应力图高度与实际受压区高度的比值，可按表 9.5.6-3 取值；

e, e' ——纵向力作用点至受拉或受压钢筋合力点之间的距离；

a_s ——受拉钢筋合力点至受拉区边缘的距离；

h'_0 ——受压钢筋 A'_s 合力点至靠近受拉钢筋 A_s 的截面边缘之间的距离。

9.5.7 隧道结构按正常使用极限状态设计时，应按荷载效应的正常使用极限状态标准组合（SLS）验算结构构件的容许应力、变形或裂缝宽度，采用下列极限状态表达式

$$S_d \leq C \quad (9.5.7)$$

式中：

C——结构构件达到正常使用要求所规定的限值，根据本标准第 10 章的相关规定取值。

Sd——正常使用极限状态的荷载效应(变形、裂缝和应力等)组合设计值。

9.5.8 隧道所用钢筋混凝土构件应进行裂缝宽度验算，裂缝宽度验算应符合以下规定：

- 1 裂缝宽度应符合耐久性的规定。
- 2 当偏心受压构件 $e_0/h_0 < 0.55$ 时，可不验算裂缝宽度。
- 3 当结构内外侧工作环境条件差别较大时，应分别进行裂缝验算。
- 4 矩形、T 形和工字形截面的钢筋混凝土受弯构件，其最大裂缝宽度可按公式(9.5.8-1)计算：

$$\delta_{f \max} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_s}{E_s} \left(\frac{30+d}{0.28+10\mu} \right) \quad (9.5.8-1)$$

式中：

$\delta_{f \max}$ ——最大裂缝宽度(mm)；

C_1 ——钢筋表面形状系数，对于光面钢筋 $C_1=1.4$ ，对于螺纹钢筋 $C_1=1.0$ ；

C_2 ——作用或荷载长期效应影响系数，短期静荷载（不考虑冲击荷载）作用时， $C_2=1.0$ ；长期荷载作用时， $C_2=1+0.5\frac{N_l}{N_s}$ ，其中 N_l 为长期荷载作用下的内力， N_s 为短期荷载作用下的内力（弯矩或轴力）；

C_3 ——与构件受力形式相关的系数：板式受弯构件 $C_3=1.15$ ，其他受弯构件 $C_3=1.0$ ；轴心受拉构件 $C_3=1.2$ ；偏心受拉构件 $C_3=1.1$ ；偏心受压构件 $C_3=0.9$ ；

d ——纵向受拉钢筋的直径(mm)。当用不同的直径的钢筋时，采用换算直径： $d = \frac{A_s}{s}$ （ s 为纵向受拉钢筋的总周长）；当使用钢筋束时，取用一束钢筋截面换算为一根钢筋的换算；

μ ——纵向受拉钢筋的配筋率， $\mu = \frac{A_s}{bh_0 + (b_f - b)h_f}$ ，当 μ 大于 0.02 时，取

$\mu=0.02$; 当 μ 小于 0.006 时, 取 $\mu=0.006$ 。对于轴心受拉构件, μ 按全部受拉钢筋的一半计算;

b_f —— 受拉翼缘宽度;

h_f —— 受拉翼缘厚度;

h_0 —— 受压边缘到受拉钢筋重心的距离。

σ_s —— 受拉钢筋在使用荷载作用下的应力, 可按下列公式计算:

$$\text{轴心受拉构件} \quad \sigma_s = \frac{N_s}{A_s} \quad (9.5.8-1)$$

$$\text{受弯构件} \quad \sigma_s = \frac{M_s}{0.87A_s h_0} \quad (9.5.8-2)$$

$$\text{偏心受拉构件} \quad \sigma_s = \frac{N_s e'_s}{A_s (h_0 - a'_s)} \quad (9.5.8-3)$$

$$\text{偏心受压构件} \quad \sigma_s = \frac{N_s (e_s - z)}{A_s z} \quad (9.5.8-4)$$

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma'_f) \left(\frac{h_0}{e_s} \right)^2 \right] h_0 \quad (9.5.8-5)$$

$$e_s = \eta_s e_0 + y_s \quad (9.5.8-6)$$

$$\gamma'_f = \frac{(b'_f - b) h'_f}{b h_0} \quad (9.5.8-7)$$

e_s —— 轴向压力作用点至纵向受拉钢筋合力点的距离;

e'_s —— 轴向拉力作用点至受压区或受拉较小边纵向钢筋合力点的距离;

z —— 纵向受拉钢筋合力点至截面受压区合力点的距离, 且不大于 $0.87h_0$;

η_s —— 使用阶段的轴向压力偏心距增大系数, 对于公路水下隧道结构, 可

取 $\eta_s=1.0$;

y_s ——截面重心至纵向受拉钢筋合力点的距离;

γ'_f ——受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值;

b'_f 、 h'_f ——受压区翼缘的宽度、厚度; 在公式(9.5.8-7)中, 当 $h'_f>0.2h_0$ 时, 取 $h'_f=0.2h_0$;

N_s 、 M_s ——按荷载的短期组合计算的轴向力值、弯矩值。

【条文说明】当结构内外侧工作环境条件差别较大时, 应分别进行裂缝验算, 内侧和外侧的裂缝宽度应分别符合各自的耐久性要求。

9.5.9 隧道结构变形应符合表 9.5.9-1 及表 9.5.9-2 的规定。

表 9.5.9-1 受弯构件的容许挠度

构件类型		容许挠度 (m)
吊车梁		$L_0/600$
结构跨度	$B_0 \leq 5\text{m}$	$L_0/250$
	$5\text{m} < B_0 \leq 8\text{m}$	$L_0/300$
	$B_0 > 8\text{m}$	$L_0/400$

注: 1、表中 L_0 为构件净计算跨度。2、如果为悬臂构件, 则上表中的容许挠度应乘以 2.0。

表 9.5.9-2 盾构隧道结构容许收敛值

隧道外径	容许收敛 (m)
$D \leq 8\text{m}$	$D/500$
$8\text{m} < D \leq 12\text{m}$	$D/400$
$D > 12\text{m}$	$D/300$

注: 表中 D 为盾构隧道外径。

9.6 防火计算

9.6.1 隧道施工期火灾工况验算宜符合以下规定:

火灾的持续时间设定为 30 分钟, 火灾的最高温度设定为 700°C , 相应的隧道火灾基准曲线如图 9.6.1 所示:

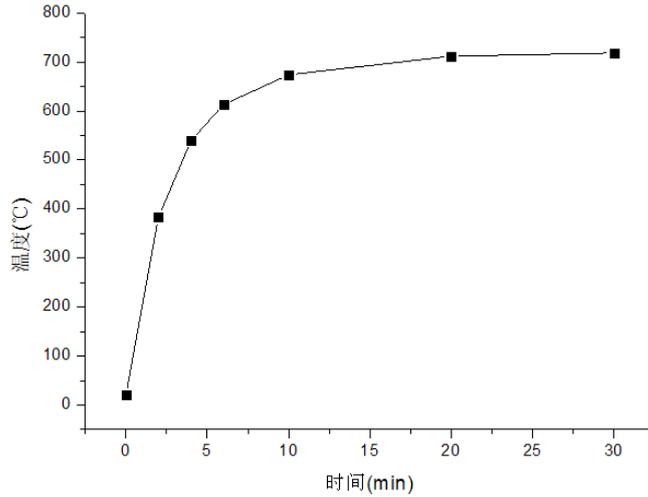


图 9.6.1 施工阶段火灾升温曲线图

火灾升温曲线的表达式为:

$$T_s = 20 + 700(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-0.5t}) \quad 0 \leq t \leq 30 \quad (9.6.1-1)$$

9.6.2 隧道施工期火灾工况验算应符合以下规定:

运营期隧道火灾基准曲线如图 9.6.2 所示:

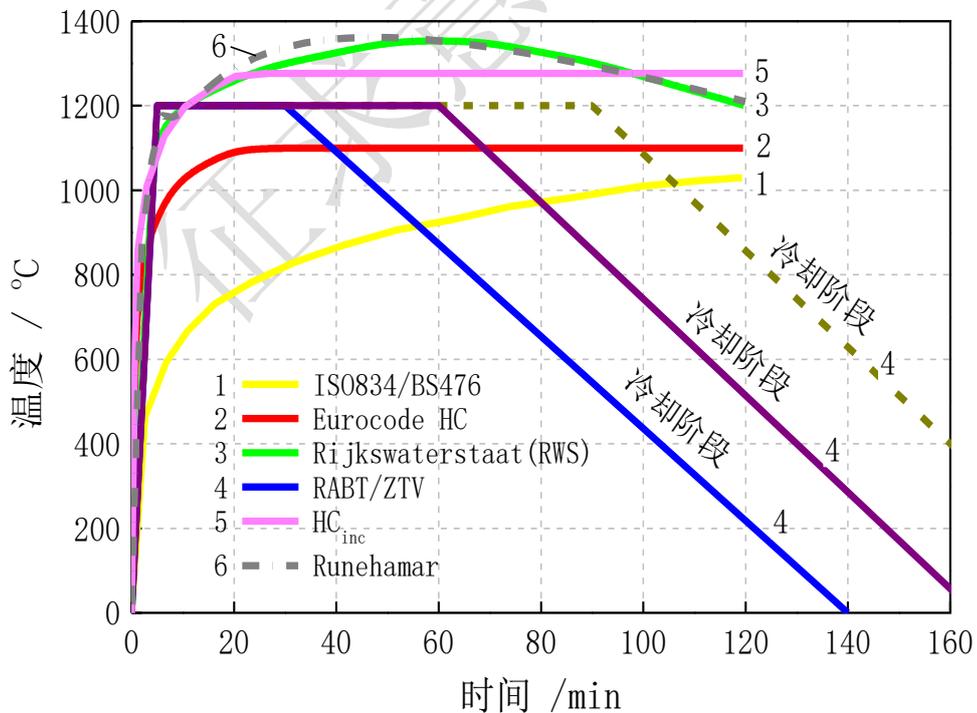


图 9.6.2 运营阶段火灾升温曲线图

1 ISO834 曲线 ISO834 曲线为标准建筑火灾曲线，曲线由普通建筑火灾实验得到，火灾的燃料主要为纤维质材料(木材，纸，织物等)，该火灾曲线被广

泛的用于建筑结构火灾场景分析中，在隧道火灾方面，可以用来描述一次小型隧道火灾，曲线的表达式为：

$$T=20+345\lg(8t+1) \quad (9.6.2-1)$$

2 HC 曲线起初用于石化工程和海洋工程，后被应用到隧道工程中。HC 曲线用来描述发生小型石油火灾（如汽油箱，汽油罐以及某些化学品运输罐）的燃烧特征。HC_{inc} 曲线用于模拟比较严重的火灾情况，在 HC 曲线的基础上，乘以系数 $\alpha=1300/1100$ 得到，HC 曲线的表达式为：

$$T=20+1080(1-0.325e^{-0.167t}-0.675e^{-2.5t}) \quad (9.6.2-2)$$

3 RABT 曲线是德国通过一系列实验的研究结果发展而来。该曲线假设火场温度在 5 min 内快速升高到 1 200 °C，并在持续较短时间后冷却 110 min，该曲线模拟一场简单的卡车火灾升温状况，但针对一些特殊的火灾类型，最高温度的持续时间也可延长到 60 min 或更长的时间，然后冷却 110 min，表 9.6.2-1 给出了 RABT 升温曲线控制坐标。

表 9.6.2-1 RABT 升温曲线坐标

时间 (min)	温度 (°C)
0	15
5	1200
30	1200
140	15

4 RWS 曲线由荷兰 Ministry of Public Works, the Rijswaterstaat (RWS) 及 TNO 火灾研究中心 1979 年共同建立。它假设在最不利的火灾情况下，潜热值为 300 MW 燃油或油罐车持续燃烧 120 min，并假设 120 min 后消防人员已经将火势控制，接近火源并开始熄灭火源。RWS 曲线的建立主要用于模拟油罐车在隧道中燃烧的情况，油罐车火灾具有热释放率大，升温速度快的特点，该曲线可以较好的模拟油罐车火灾的这些特点，同时曲线还考虑了当油料减少最高温度逐渐下降的降温过程，表 9.6.2-2 给出了 RWS 升温曲线控制坐标。

表 9.6.2-2 RWS 升温曲线控制坐标

时间 (min)	温度 (°C)
0	20
3	890
5	1140
10	1200
30	1300
60	1350
90	1300
120	1200

9.6.3 衬砌及防水、防火材料的热物理参数可按照下列规定取值：

1 衬砌混凝土的传热系数为：

$$\lambda_c = 1.16(1.4 - 1.5 \times 10^{-3}T + 6 \times 10^{-7}T^2) \quad (9.6.3-1)$$

2 衬砌混凝土的比热容为：

$$C_c = 900 + 80\left(\frac{T}{120}\right) - 4\left(\frac{T}{120}\right)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C} \quad (9.6.3-2)$$

3 丁晴橡胶密封条的导热系数为 0.256W/m.K，比热为 1700J/kg.K，密度为 1240kg/m³。

4 石纤维棉防火板的导热系数 1000℃为 0.226W/m.K，1300℃ 为 0.336W/m.K，比热为 1240J/kg.K，密度为 100kg/m³。

5 弹性模量和热膨胀系数火灾高温下的劣化规律根据下式确定：

(1) 弹性模量：

$$\begin{aligned} E(T)/E &= 0.83 - 1.1 \times 10^{-3}T \quad (60^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}) \\ E(T)/E &= 0.06 \quad (700^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (9.6.3-3)$$

(2) 热膨胀系数：

$$a_c = 6^{-6} + 4.92^{-9}T \quad (9.6.3-4)$$

6 火灾热烟气与衬砌混凝土间的对流换热系数按照下式计算：

$$h_T = 7.051 \times e^{(T/372.56)} + 0.842 \quad (9.5.3-5)$$

9.6.4 隧道火灾工况验算应符合以下规定：

- 1 火灾规模及升温曲线应符合本标准 9.6.1 和 9.6.2 条的规定。
- 2 对于受力钢筋，在设计火灾时间内表面温度不高于 250℃。
- 3 对于不可更换的橡胶止水带，在设计火灾时间内不高于 70℃，或连续一小时不高于 100℃，且最高温度不高于 150℃。

9.6.5 隧道防火设计应符合下列规定：

- 1 隧道顶部主体结构应设置抗热冲击、耐高温的防火保护层。
- 2 A+级和 A 级水下隧道承载结构体的耐火极限不应低于 2.0h，耐火极限应采用 RABT 标准升温曲线测试；B 级、C 级和 D 级隧道承载结构体的耐火极限

不应低于 2.0h，耐火极限应采用 HC 标准升温曲线测试。

3 水下隧道排烟风道结构体的耐火极限不应低于 60min，耐火极限宜采用 RABT 标准升温曲线测试。

4 送风管道、排烟管道应采用不燃材料制作。风道结构为主体结构的一部分时，其耐火要求应与主体结构相同。

征求意见稿

10 耐久性设计

10.1 一般规定

10.1.1 盾构隧道混凝土结构耐久性设计应包括下列内容：

- 1 确定隧道结构的设计使用年限、环境类别及环境作用等级。
- 2 提出对结构材料的耐久性基本要求。
- 3 确定构件中钢筋的混凝土保护层厚度。
- 4 提出构件的裂缝控制要求。
- 5 确定隧道的防水构造及防水材料要求。
- 6 提出隧道所处环境条件下的耐久性技术措施。
- 7 提出隧道施工阶段的养护及质量验收要求。
- 8 提出隧道使用阶段的检测和维护要求。

【条文说明】本条提出了隧道混凝土结构耐久性设计应包括的主要内容，隧道结构的设计使用年限是耐久性设计应达到的目标，隧道所处的环境类别和环境作用等级是耐久性设计基础资料，混凝土材料的耐久性能指标、钢筋的混凝土保护层厚度、混凝土构件的裂缝控制等级，以及防水构造和防水材料性能是影响结构耐久性的重要因素。另外，混凝土结构的耐久性在很大程度上还取决于混凝土的施工养护和使用阶段的维护质量，所以需要在耐久性设计中提出相应的要求。

耐久性基本要求包括混凝土最低强度等级、最大水泥用量、最大水胶比、最大氯离子含量、最大碱含量等材料配比控制要求，以及混凝土原材料品质、施工过程的质量控制等要求。提高混凝土耐久性的技术措施有采用高性能混凝土、混凝土构件封闭、改善钢筋材料及钢筋涂层、掺加阻锈剂等。

10.1.2 盾构隧道各部分结构及材料应根据其重要性进行耐久性设计，盾构隧道主体结构的设计使用年限应为 100 年，不可更换的附属构件设计使用年限应为 50 年，可更换构件的设计使用年限不应低于 30 年。

表 10.1.2 盾构隧道构件设计使用年限分级表

隧道结构分类	具体部位示例	设计使用年限
主体结构及重要材料	管片、横通道结构、地下泵房、螺栓、剪力销、管片接缝橡胶防水材料、洞门等。	100
不可更换附属构件	口字件、风道结构、车道板、纵缝定位杆	50

	等。	
可更换附属构件或材料	路面、边水沟、电缆沟沟壁及盖板、疏散通道盖板、嵌缝材料、回填混凝土等。	30

【条文说明】盾构隧道构件按重要性、维修难易程度分为主体结构、不可更换附属构件、可更换附属构件，分类确定设计使用年限，有利于细化设计、节约工程造价。不可更换附属构件主要是与结构使用功能密切相关，更换可能会中断交通、影响结构受力状态及结构安全，并且在运营过程中需要重点养护。可更换附属构件指易于更换，不影响结构安全的构件或材料。

10.1.3 隧道的环境类别及其作用等级划分应根据结构所处环境条件，通过现场勘察及化验分析确定，应充分考虑结构所处位置及隧道结构内外环境条件的差异。

【条文说明】环境作用是导致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。盾构隧道耐久性对地下水环境敏感，设计措施的可靠性依赖于分类及分级的准确性。在隧道设计前需充分调查和勘察结构所处环境的类型，通过现场调查收集资料了解项目场地的历史、现状及规划使用功能，原位测试试验水土的腐蚀性，确定对结构及其材料有损害物质的成分与含量。

10.1.4 隧道结构所采用的各类材料应与使用环境相适应，可结合结构安全等级、可维修性以及环境作用等级，采取适当的附加防护措施。

10.1.5 隧道结构布置和构造形式应有利于减轻环境作用效应，结构防排水措施应与结构耐久性设计相适应。

【条文说明】结构的布置、构造形式确定时除考虑受力及防水性能外，构件的形状、接头构造等要避免水汽及有害物质积聚在表面，设计时需确定合理的保护层厚度及裂缝控制标准。为有效防护、保护结构，防排水措施的使用年限也应与相应位置结构或构件的使用年限一致。

10.2 环境类别与作用等级

10.2.1 隧道的环境作用类别可按以下规定划分：

1 一般环境（I类）：非寒冷地区、不受氯盐影响的一般隧道或者下穿江河湖泊的水下隧道。

2 冻融环境（II类）：寒冷地区隧道的洞口段，主要为隧道结构及洞门的外

表面。

3 海洋氯化物环境（III类）：海底隧道或者江河入海口附近水下隧道管片结构的临土侧及敞开段隧道的内外侧。

4 除冰盐环境（IV类）：寒冷地区隧道的洞口段，主要为洞口结构内侧、结构底板、边沟与电缆沟。

5 化学腐蚀环境（V类）：地下环境中硫酸根离子、碳酸根离子或酸碱度及汽车尾气等，主要为结构临土侧及内侧。

【条文说明】本条内容主要结合《混凝土结构耐久性设计标准》GB50476、《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310)中关于环境作用类别的划分制定。

10.2.2 隧道的环境作用等级应按表 10.2.2 划分。

表 10.2.2 隧道环境类别的作用等级

环境类别	环境作用等级					
	轻微	轻度	中度	严重	非常严重	极端严重
一般环境（I类）	A	B	C			
冻融环境（II类）			C	D	E	
海洋氯化物环境（III类）			C	D	E	F
除冰盐环境（IV类）			C	D	E	
化学腐蚀环境（V类）			C	D	E	

10.2.3 处于一般环境（I类）条件下的隧道结构或构件，其所受到的环境作用等级可以参照表 10.2.3 确定。

表 10.2.3 隧道结构

作用等级	环境条件	结构构件示例
A	室内干燥环境	设置喷涂型防水或防火层的隧道结构内侧 消防楼梯（电梯）、管线通道等 通风机房、变电所等附属设备及管理用房
	永久的静水浸没环境	隧道排水泵房（消防水）
B	室内潮湿环境	隧道排水通道内侧、裸露的隧道结构内侧。
	长期湿润环境	隧道结构外侧与水或湿润土体接触的部位
C	干湿交替环境	水位变动区范围隧道结构； 隧道区段接缝的两侧部位； 隧道出入口光过渡带构件； 雨水及洗消水泵房集水池、排水管沟、泵房盖板。

10.2.4 隧道出入口至该地区冰冻线以上的隧道段宜考虑冻融环境(II类)的作用。冻融作用等级可以参照表 10.2.4 划定。

表 10.2.4 冻融环境对混凝土结构的环境作用等级

环境作用等级	环境条件
--------	------

	地区 ¹	地下水位	水质 ²
C	微冻	水位变动区	无盐
	严寒和寒冷	低于隧道结构	无盐
D	严寒和寒冷	水位变动区	无盐
	微冻	水位变动区	有盐
	严寒和寒冷	低于隧道结构	有盐
E	严寒和寒冷	水位变动区	有盐

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

2.指冻结水中所含有的盐类，包括海水中的氯盐、除冰盐或其他盐类。

10.2.5 在海洋氯化物环境（III类）下的水下隧道，其结构构件的环境作用等级应按表 10.2.5 确定。处于内陆盐湖、江河入海口附近水域的水下隧道应根据实测的含盐量确定环境等级。

表 10.2.5 海洋氯化物环境的作用等级

环境作用等级	环境条件 ¹	结构构件示例
C	水下区和土中区	隧道外侧
D	轻度盐雾区	陆上建筑的室内构件。
E	重度盐雾区	隧道出入口区段、海上通风塔室外构件
F	潮汐区和浪溅区	地层透水性较高的区段

注 1：水下区和土中区：周边永久浸没于海水或埋于土中；轻度盐雾区：距平均水位 15m 高度以上的海上大气区、涨潮岸线以外 100~300m 内的陆上室内环境；重度盐雾区：距平均水位上方 15m 高度以内的海上大气区、离涨潮岸线 100m 以内的陆上室外环境。

10.2.6 需要使用除冰盐（IV类）地区的隧道，其敞开的引道段、距离出入口 50 米以内的暗埋段宜参照表 10.2.6 划分环境作用等级。

表 10.2.6 除冰盐环境的作用等级

作用等级	环境条件	结构构件示例
C	轻度除冰盐盐雾	距离出入口 50 米的隧道段的行车道顶部
D	除冰盐水溶液轻度溅射	距离出入口 50 米的隧道段的行车道侧墙
E	直接接触除冰盐溶液或重度盐雾作用	路面、车道板、衬砌底板、防撞护栏、水沟等

10.2.7 直接与含硫酸盐等酸类物质水、土环境（V类）接触的隧道结构构件，其化学侵蚀作用等级应参照表 10.2.7 确定。

表 10.2.7 水、土中硫酸盐和酸类物质环境作用等级

作用等级	硫酸根离子 SO_4^{2-}		二氧化碳 CO_2	镁离子 Mg^{2+}	酸碱度
	水中(mg/L)	土中(mg/kg)	水中(mg/L)	水中(mg/L)	(pH 值)
C	200~1000	300~1500	15~30	300~1000	6.5~5.5
D	1000~4000	1500~6000	30~60	1000~3000	5.5~4.5
E	4000~10000	6000~15000	60~100	≥3000	<4.5

10.3 结构材料要求

10.3.1 盾构隧道结构材料的类型应根据结构所处的环境类别选择，应符合以下规定：

- 1 混凝土或钢筋混凝土构件应控制抵抗腐蚀性离子渗透的能力。
- 2 钢或其他金属结构与构件的使用可不受冻融环境（II类）的限制。
- 3 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（III类）及化学腐蚀环境（V类），必须使用时应采取附加防腐蚀处理措施。
- 4 聚合物类有机材料的结构或构件应避免直接暴露于高温或紫外线直射环境。
- 5 当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及耐久性。

【条文说明】1 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保护措施。

2 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，但金属材料则一般不用于腐蚀性环境（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，设计时需选取与环境类型相适应的结构材料以及附加防护措施的材料。

3 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、选用不锈钢钢筋、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侵蚀。

5 管片外表面设置涂层时，涂层要具有良好的耐磨性，保证在盾尾密封钢丝刷和钢板刷的挤压下不损伤。

10.3.2 混凝土构件应根据环境类别配制混凝土，控制原材料中侵蚀性物质的含量。并按要求检验混凝土试样的耐久性指标，并应符合下列规定：

- 1 根据环境作用等级确定混凝土最低强度等级、最大水胶比和最小胶凝材料的控制要求。
- 2 在海洋氯化物环境下，不宜单独采用硅酸盐或普通硅酸盐水泥作为胶凝材料配制混凝土，应掺加或大掺量掺加矿物掺合料，并宜加入少量的硅灰。
- 3 硫酸盐等化学腐蚀环境下应选用低 C3A 量的水泥并适当掺加矿物掺和

料，严重化学腐蚀环境下的耐久混凝土宜通过专门的试验研究确定。

10.3.3 钢筋混凝土构件除应满足 10.3.2 条之外，还应根据环境作用类型及等级选配防腐能力合适的钢筋。环境作用等级在 D 级以上时，可采用带防腐涂层的钢筋，或经论证后选用纤维聚合物筋材。

10.3.4 当隧道结构采用钢或其它金属结构时，应采取可靠的防腐蚀处理措施保证其设计使用寿命。化学腐蚀环境（V 类）不应采用普通钢结构或铸铁结构。采用其它有机类材料（如防水卷材、聚合物砂浆等）时，应合理应用其耐腐蚀特性。

10.3.5 盾构隧道内管线支架宜采用预埋件连接方式，不宜大量采用植筋和后锚固方式。

【条文说明】隧道内固定管线的支架，传统做法是在隧道衬砌上大量打孔后植筋或者化学螺栓。由于管片衬砌中钢筋布置较密，锚栓孔对衬砌混凝土甚至主筋都会造成一定的破坏，对隧道结构的承载力及耐久性能造成较大影响。后植锚栓与混凝土粘结的牢固程度远小于整体混凝土结构，化学锚栓的防火性能较差、施工不方便且造价高。由于后植锚栓缺陷较多，现在，普遍采用预埋槽道代替后植筋锚栓，在部分大直径盾构进行了尝试，可采用衬砌管片全环预埋槽道或直线段管片固定点位范围预埋槽道、预制箱涵内部预埋槽道等多种方式。采用预埋槽道当时代替传统的植筋和后锚固方式，不仅可以避免后期安装对隧道结构承载力和耐久性的影响，还可优化施工工艺、缩短施工工期。

10.4 防腐蚀附加措施

10.4.1 环境作用等级为E或E级以上的混凝土构件，可在优质混凝土的基础上选用环氧涂层钢筋，也可在混凝土中掺入钢筋阻锈剂。环氧涂层钢筋可与钢筋阻锈剂联合使用，但不得与阴极保护联合使用。

10.4.2 在碳化引起钢筋锈蚀的一般环境下，可选用镀锌钢筋延长结构物的使用年限。对于钢丝网和某些预埋件，也可选用热浸锌方法加强防护。

10.4.3 对于环境作用等级为E或E级以上的混凝土构件，设计使用寿命为100年的特殊重要工程，可选用不锈钢钢筋。

10.4.4 以沥青、环氧沥青、环氧加煤焦油为基的复合型涂层或厚涂层，可用于地下、水下部分混凝土结构的防护。以环氧树脂、聚氨醋为基的复合型涂层或厚涂层，可用于上部结构。复合型涂层或厚涂层与混凝土的粘结力不小于1.5N/m时，

自身的耐久性和对混凝土的有效防护时间不应低于20年。

10.4.5 隧道排风井内侧混凝土表面宜设置抗碳化涂层。

【条文说明】隧道排风道、排风井、风口、风塔等位置空气中 CO₂ 含量较高、空气湿度大，容易导致混凝土产生碳化问题，混凝土碳化将引发混凝土内钢筋的锈蚀，因此在这些位置内侧混凝土表面设置抗碳化涂层，以确保混凝土的耐久性使用年限。

10.4.6 隧道结构采用附加防护措施时，应注意其耐久性及施工和长期使用过程中材料的环境友好性。

10.5 管片耐久性设计

10.5.1 管片结构的耐久性设计应符合以下规定：

- 1 应同时针对预制管片、连接螺栓进行耐久性设计。
- 2 处于中度及以上的氯离子及化学腐蚀环境作用等级的盾构隧道，钢筋混凝土预制管片应采取防腐蚀措施。
- 3 钢管片、铸铁管片及所有外露金属构件必须进行防腐蚀处理。
- 4 环境作用等级为 E、F 级时，钢筋混凝土预制管片的外侧宜附加防护涂层。

【条文说明】1 影响管片耐久性的主要因素有：(1) 钢筋锈蚀。受氯离子入渗控制，氯离子与地下水作用发生化学腐蚀。(2) 混凝土保护层剥落。受混凝土碳化腐蚀影响和钢筋锈蚀后体积膨胀而使混凝土保护层胀裂。(3) 混凝土表面龟裂。其为遇干湿、冷热交替的不均衡环境作用时，因混凝土碳化收缩与冬季干缩相互叠加所引起的一种破坏。(4) 混凝土裂缝（受缝宽和裂缝数控制）。使腐蚀介质中的氯和硫酸盐离子与地下水及氧气等入渗到混凝土内部。(5) 混凝土抗入渗性能不足。处于腐蚀性地下水和土壤中的含水溶性硫酸盐环境下，容易因腐蚀而影响结构的耐久性。(6) 预制管片在生产、运输和安装过程中的裂缝（缝宽有时已达到 0.2mm）及其边角受撞击而破损，应提高管片混凝土的抗冲击和抗拉性能。(7) 意外灾害（火灾、地震、战争、海啸、恐怖袭击等）。

接缝构造决定了管片拼装后接缝防水密封垫具有不可更换性，因此防水密封材料的耐久性也应重点关注。橡胶类材料在隧道内部湿度、汽车尾气等作用下可能老化，在高压应力下存在应力松弛，现行《高分子防水材料 第 4 部分 盾构

法隧道管片用橡胶密封垫》GB 18173.4 中对密封垫的各类指标均进行了规定，工程实践中往往通过热空气加速老化试验等验证密封垫的防水能力。

2 盾构隧道处于对混凝土有中等以上腐蚀的地层中时，为确保钢筋混凝土的耐久性，应在迎水面设防腐层，兼具防水和防腐蚀的功能，一般采用高渗透改性环氧或水泥基渗透结晶性防水涂料。

3 钢结构、铸铁等外露金属件在隧道内均处于干湿交替或潮湿环境中，易发生锈蚀，因此需要对外露金属件进行防腐蚀处理。

10.5.2 管片结构材料宜采用钢筋混凝土，特殊情况可选用铸铁、钢或钢纤维、复合材料。二次衬砌可采用混凝土、钢筋混凝土、钢纤维或金属等材料。材料选择应满足下列规定：

1 管片衬砌混凝土强度等级不应低于 C50，二次衬砌混凝土强度等级不应低于 C35。

2 采用矿山法施工的横通道支护结构喷射混凝土强度等级不低于 C25，二次衬砌结构强度等级不低于 C40。

3 采用顶管法或盾构法施工的横通道结构衬砌混凝土强度等级不应低于 C50。

4 内部结构混凝土最低强度等级根据各构件的设计使用年限、环境类型和环境作用等级确定。

【条文说明】管片的接头构造决定了在沟槽的削弱下，按净截面计算的压应力分布不均，根据最大压应力确定的混凝土抗压强度等级较高，需要采用高强度混凝土。盾构管片衬砌采用高强混凝土可减小管片的厚度和重量，有利于构件运输和拼装施工，有利于承受盾构千斤顶推力，工厂预制时可使管片混凝土尽快达到脱模强度，提高钢模的周转率。

现行国家标准《盾构隧道工程设计标准》(GB/T 51438) 规定“管片衬砌混凝土强度等级不应低于 C50，二次衬砌混凝土强度等级不应低于 C35”；国家标准《地铁设计规范》(GB 50157) 表 11.3.2 规定“一般环境条件下混凝土的最低设计强度等级，盾构法装配式钢筋混凝土管片 C50，整体式钢筋混凝土衬砌 C35”；行业推荐标准《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTGT 3310) 表 5.3.2-2；行业推荐标准《公路水下隧道设计规范》(JTG/T 3317) 表 6.5.3；参考中国铁建

股份有限公司企业标准《盾构法水下交通隧道技术规程》(Q/CRCC 33304)规定“预制管片混凝土强度等级不应低于 C50, 其余钢筋混凝土强度等级不应低于 C35”, 以及上海市工程建设规范《道路隧道设计标准》(DG/TJ 08-2033)规定“混凝土最低强度等级 C50”等相关规定, 结合目前国内运营及在建盾构隧道建设经验, 预制管片混凝土强度等级不应低于 C50, 其余钢筋混凝土强度等级不应低于 C35。

10.5.3 钢管片及二次衬砌结构的钢材应符合现行国家标准《碳素结构钢》

(GB/T 700) 和《建筑结构用钢板》(GB/T 19879) 的规定, 并应符合下列规定:

- 1 钢材应为镇静钢, 宜采用 Q235、Q355 或 Q390, 其质量等级不应低于 B 级。
- 2 钢材的屈服强度实测值与抗拉强度实测值的比值不应大于 0.85。
- 3 钢材应有明显的屈服台阶, 且伸长率不应小于 20%。
- 4 钢材应有良好的焊接性和合格的冲击韧性。
- 5 球墨铸铁管片宜选用 QT400。

10.5.4 盾构隧道防腐蚀设计应符合下列规定:

1 当隧道处于对混凝土有中等以上腐蚀的地层时, 钢筋混凝土管片迎水面应涂抹外防腐涂层, 防腐涂层应具有防水性能, 并符合现行国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 50476) 的规定。

2 钢管片、外露螺栓和垫片等金属构件, 均应采取防腐蚀措施, 并符合现行行业标准《建筑钢结构防腐蚀技术规程》(JTG/T 251) 的规定。

【条文说明】钢筋混凝土管片防腐涂层应满足: 宜采用环氧或改性环氧类封闭型材料、水泥基渗透结晶型或硅氧烷类材料; 应具有良好的耐化学腐蚀性、抗微生物侵蚀性、耐水性、耐磨性, 并应无毒或低毒; 应满足在盾尾刷挤压和摩擦下不损伤、不渗水。

钢管片防腐应满足: 表面应先做除锈处理, 再涂刷防腐涂料; 背板、环板及端板等构件外露表面宜涂刷环氧富锌底漆和无溶剂超厚膜型环氧涂料; 内格腔表面宜涂冷镀锌涂料, 施工结束后采用硫酸盐微膨胀混凝土进行充填。

外露螺栓、螺母、垫片等金属构件应采用无铬锌铝片涂层、热喷锌加无铬

锌铝片涂层或多元金共渗加无铬锌铝片涂层等环保型材料进行防腐蚀处理，并结合手孔封堵措施进行覆盖保护。

10.5.5 除管片结构外，隧道其余混凝土结构满足耐久性要求混凝土的最低强度等级应达到表 10.5.5 确定。

表 10.5.5 耐久性设计要求混凝土的最低强度等级

环境作用等级	设计使用年限		
	100 年	50 年	30 年
A	C30	C25	C25
B	C35	C30	C25
C	C40	C35	C30
D	C45	C40	C40
E	C50	C45	C45
F	C50	C50	C50

10.5.6 当隧道采用钢筋混凝土结构时，钢筋混凝土构件的保护层厚度应根据环境作用等级参照表 10.5.6 选用。设计使用年限 100 年的地下结构及构件，迎水面钢筋保护层厚度不应小于 50mm。大截面配筋构件宜适当提高钢筋的混凝土保护层厚度。

表 10.5.6 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	50/30 年
A	30	20
B	30	20
C	40	30
D	45	40
E	50	45
F	55	50

注：1.当混凝土强度等级高于最低等级 5MPa 以上时，保护层厚度最小值最多减少 5mm。

2.预制构件的保护层厚度可比表中规定减少 5mm。

3.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 10.5.5 的要求，但强度等级不应低于两级。采用的混凝土强度等级比表 10.5.5 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值低两级时，相应的保护层厚度应增加 10~15mm。

10.5.7 在荷载作用下钢筋混凝土构件的表面裂缝最大宽度计算值不应超过表 10.5.7 中的限值。

表 10.5.7 钢筋混凝土构件表面裂缝计算宽度限值 (mm)

环境作用等级	裂缝宽度
A	0.40
B	0.30
C	0.20
D	0.20
E、F	0.15

注：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，可将保护层厚度取为 30mm 计算裂缝的最大宽度。

【条文说明】1、根据国际隧道协会 ITA 报告 N 22 《Guidelines for the design of segmental tunnel linings》中统计的各国对混凝土管片允许裂缝宽度的统计如下：

表 10.5.7 混凝土管片允许裂缝宽度

规范	允许裂缝宽度 (mm)	备注
ACI 224(2007)	0.30	临土侧
EN 1992-1-1(2004)	0.30	钢筋混凝土构件
新加坡陆路交通管理局设计标准 (2010)	0.30	
德国隧道协会 DAUB 2013	0.20 0.15 (地下水位以下)	
日本土木工程师学会 JSCE 2007	一般环境 $0.005d_c$ 腐蚀环境 $0.004d_c$	d_c 为钢筋混凝土保护层厚度
英国 PAS 8810:2016 隧道混凝土管片衬砌设计规范	X0/XC1:0.40 XC2/XC3/XC4:0.30 XD1/XD2/XD3:0.30 XS1/XS2/XS3:0.30	
奥地利混凝土与建筑技术学会 2011	AT1:基本干燥环境单层衬砌: 0.20 AT2:轻微潮湿环境单层衬砌: 0.25 AT3:潮湿环境单层衬砌: 0.30 AT4:湿润环境单层衬砌: 0.30	AT1 适用于不允许渗漏、有紧密防水要求的单层衬砌。 AT2 适用于潮湿、隧道内无流水的一般防水要求的单层公路或铁路隧道 (洞门除外)。 AT3 适用于允许个别部位滴水的无防水要求的单层衬砌。 AT4 适用于允许有些部位流水的无防水要求的单层衬砌。

2、根据国家标准《混凝土结构耐久性设计标准》(GB/T 51355) 中的规定, 构件表面裂缝宽度与环境作用等级相关, 对于钢筋混凝土构件计算裂缝限值为 0.15~0.40mm。行业标准《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T 3310) 中同等环境作用等级下裂缝宽度较国标减小, 部分环境作用等级下裂缝宽度限值 0.10mm, 在部分情况下裂缝宽度标准提升引起钢筋含量大幅增加, 工程造价上升较大。

结合国内外标准规范对混凝土结构裂缝的规定, 并结合调研情况, 本规范中裂缝宽度按照国标相关规定执行。

10.5.8 在冻融环境下, 结构混凝土应符合以下规定:

1 混凝土的抗冻性 (抗冻耐久性指数 DF) 不低于表 10.5.8 的规定。厚度小于 150mm 的薄壁构件, 表中的 DF 数值应再增加 5(%)。

表 10.5.8 混凝土抗冻性的耐久性指数 DF (%)

设计使用年限	100 年			50 年		
	高度水饱和	中度水饱和	盐冻	高度水饱和	中度水饱和	盐冻
环境条件	高度水饱和	中度水饱和	盐冻	高度水饱和	中度水饱和	盐冻

严寒地区	80	70	85	70	60	80
寒冷地区	70	60	80	60	50	70
微冻地区	60	60	70	50	45	60

注:(1) 耐久性指数 DF 为 300 次快速冻融循环后的动弹性模量与初始值的比值。如在 300 次冻融循环以前, 试件的动弹性模量已降到初始值的 60%以下或重量损失已超过 5%, 则以此时的循环次数 N 计算 DF 值, 并取 $DF=(N/300) \times 0.6$ 。快速冻融循环试验方法可参照水工试验标准, 试件自现场或模拟现场混凝土构件中取样。如在试验室制作, 试件的养护温度及龄期需按实际工程情况选定。对于盐或化学腐蚀环境, 试验时用于浸泡试件的水, 需采用与实际工程环境中相同成份和浓度的水。

(2) 高度水饱和指冰冻前长期或频繁接触水或潮湿土体, 混凝土内高度水饱和; 中度水饱和指冰冻前偶受雨水或潮湿, 混凝土内水饱和程度不高; 盐冻腐蚀系指接触除冰盐及盐碱、海洋或其他化学物质时受冻。

2 环境作用等级为 D 级及以上的混凝土构件必须掺用引气剂。冻融环境作用等级为 C 级的混凝土可不加引气剂, 但此时的混凝土强度等级应不低于 C40。

3 冻融环境下混凝土胶凝材料中的粉煤灰掺量不宜超过 30%, 并应限制所用粉煤灰的含碳量 (宜不大于 2%)。

10.5.9 混凝土中的最大氯离子含量不得高于 0.06%。其中: 混凝土用砂的氯离子含量不应大于 0.03%, 预应力混凝土用砂的氯离子含量不应大于 0.01%。当混凝土用砂的氯离子含量大于 0.003%时, 水泥的氯离子含量不应大于 0.025%, 拌和用水的氯离子含量不应大于 250mg/L。

【条文说明】混凝土中的氯离子含量超标将会对钢筋混凝土、预应力钢筋混凝土结构带来灾难性后果, 控制混凝土用砂中的氯离子含量是保证混凝土结构安全性和耐久性的关键环节之一。

10.5.10 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 10.5.10 的规定。

表 10.5.10 混凝土中的氯离子扩散系数 DRCM (28d 龄期, $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)

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, 仅适用于氯盐环境下采用的较大掺量和大掺量矿物掺和料的混凝土。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 值作为抗氯离子侵入性能的评定依据。

10.5.11 宜采用非碱活性骨料, 当使用碱活性骨料时, 混凝土中的最大碱含量为 $3.0 \text{kg}/\text{m}^3$ 。当骨料具备潜在碱活性时, 应采取措施抑制碱骨料反应, 并应验证抑

制措施的有效性。

【条文说明】需要预防碱骨料反应的结构工程，首选措施是采用非碱活性骨料。对于有潜在碱活性的骨料，应按照国家现行有关标准采取预防措施。

10.5.12 管片结构的构造应有利于减少因变形而引起的约束应力，应合理设置施工缝、变形缝的位置和构造。结构的施工缝和变形缝尽量避开可能遭受最不利局部侵蚀环境的部位。

10.5.13 混凝土管片内表面应考虑碳化影响。

【条文说明】盾构隧道内部环境相对比较封闭，隧道内湿度较高，空气流动差，车流量大，隧道内空气中的 CO_2 浓度较高，混凝土管片内表面应考虑混凝土碳化。

10.5.14 管片接缝螺栓及预埋螺栓套的设计使用寿命应与主体结构一致，必须满足 100a 的使用要求，应进行防腐蚀处理。

【条文说明】接缝螺栓是管片结构间的重要连接紧固件，具有定位、传递荷载、协调变形、防止螺栓孔渗水的要求，应对其表面进行防腐蚀处理，并应满足使用耐久性的要求。管片接缝螺栓防腐处理方法主要包括：热浸锌、锌铬涂层、热喷锌（铝）土层、粉末渗锌、复合涂层等，符合《建筑钢结构防腐蚀技术规程》（JTJ/T 251）的规定要求。

10.5.15 宜根据具体环境条件和适当的材料劣化模型，进行结构使用年限的验算。

10.5.16 工程使用一段时间后，应进行现场实测，依据实测氯离子浓度和二氧化碳浓度（沿混凝土构件截面）的分布，按时间变化预测构件的使用寿命，必要时及时予以修复。

10.6 防水材料耐久性设计

10.6.1 管片接缝防水材料的设计使用寿命应与主体结构一致，必须满足 100a 的使用要求，应进行耐久性设计。

【条文说明】管片接缝是盾构隧道最为重要的防水部位，隧道建成后接缝防水材料不可更换，应与主体结构具有同样的设计使用寿命。

10.6.2 防水材料耐久性设计应包括以下内容：

- 1 弹性橡胶密封垫材质物理性能中的老化特性。

2 遇水膨胀橡胶的质量变化率或反复浸水试验后的性能变化率。

10.6.3 管片接缝防水材料宜采用压缩永久变形量小、应力松弛变化率低、耐老化的三元乙丙橡胶，或是由三元乙丙橡胶与遇水膨胀橡胶复合而成。

【条文说明】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。管片环脱环以及拆除负环管片时的压缩应力松弛可能导致接缝张开量增加，采用压缩永久变形量小、应力松弛变化率低的接缝防水材料有利于降低接缝张开引起的渗漏水风险。

遇水膨胀橡胶止水条作为管片接缝第一道防水，其材料应优先选择松弛特性好、耐老化的遇水膨胀橡胶材料。对于盾构始发、接收端头的变形缝防水处理，多采用三元乙丙橡胶与遇水膨胀橡胶片相结合的方式。

10.6.4 管片接缝防水材料应根据功能要求进行耐久性评价，对接触面设计压力下的松弛量进行确定，同时对最终张开量及错开量进行规定。

【条文说明】影响橡胶密封垫耐久性的主要因素有原材料与添加剂、温度及外力等，耐久性设计应考虑老化系数、压缩永久变形量及物理/化学接触应力松弛三个指标，性能指标、检测条件等应满足《高分子防水材料 第4部分 盾构法隧道管片用橡胶密封垫》（GB 18173）、《盾构隧道工程设计标准》（GB/T 51438）和《地下工程防水技术规范》（GB 50108）的要求。

管片接缝的张开量及错开量将直接影响接缝的防水设计，需根据最终张开量与错开量的不同选择与之相适应的接缝防水材料，并提出相应的耐久性和止水性能要求。为了确保橡胶密封垫的耐久性，设计中还需要关注其松弛量。

11 抗震设计

11.1 一般规定

11.1.1 盾构隧道应根据所处位置及结构的重要性划分为重点设防类和标准设防类两个类别进行抗震设计。

1 重点设防类：水下隧道结构（含水下横通道），三车道及以上宽度的隧道结构。

2 标准设防类：陆域两车道及以下宽度隧道结构、洞门结构。

【条文说明】盾构隧道抗震设防分类参照了现行国家标准《建筑工程抗震设防分类标准》GB 50223-2008、《公路工程抗震规范》JTG B02-2013、《公路隧道抗震设计规范》JTG 2232-2019，同时考虑到盾构隧道结构的特点，进行了调整。为了提高抗震设计的可操作性，根据盾构隧道所处位置及结构的重要性对其抗震设防分类作了更加详细的规定。

11.1.2 设计基本地震动峰值加速度 $a_{\max\text{II}}$ 应根据结构设计使用寿命按表 11.2.2-1 确定；当结构设计使用寿命为 50 年时，可按《中国地震动参数区划图》GB 18306 中地震动峰值加速度分区值确定，见表 11.1.2-2。

表 11.1.2-1 隧道结构的设计地震动峰值加速度

地震类型	设计地震动峰值加速度
E1	设计使用寿命期内超越概率 63%的地震动峰值加速度
E2	设计使用寿命期内超越概率 10%的地震动峰值加速度
E3	设计使用寿命期内超越概率 2~3%的地震动峰值加速度

表 11.1.2-2 隧道结构设计使用寿命为 50 年的地震动峰值加速度 $a_{\max\text{II}}$ (g)

基本动峰值加速度	0.05	0.1	0.15	0.20	0.30	0.40
E1 的动峰值加速度	0.02	0.04	0.05	0.07	0.10	0.14
E2 的动峰值加速度	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
E3 的动峰值加速度	0.12	0.22	0.32	0.40	0.57	0.76

【条文说明】地面建筑设计使用寿命一般为 50 年，《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 中多遇地震、设防地震、罕遇地震的 50 年超越概率分别为 63%、10%、2~3%。考虑盾构隧道的设计寿命及与我国现行《抗震规范》的一致性，本规范将地震类型分为三类。

11.1.3 盾构隧道结构在地震作用下应达到表 11.1.3 的性能要求。

表 11.1.3 盾构隧道结构的抗震性能要求

结构设防类别	地震类型	性能要求
重点设防 类结构	E1 地震（小震）	性能要求 I
	E2 地震（中震）	性能要求 I
	E3 地震（大震）	性能要求 II
标准设防 类结构	E1 地震（小震）	性能要求 I
	E2 地震（中震）	性能要求 II
	E3 地震（大震）	性能要求 III

注：1 性能要求 I：结构处于弹性工作阶段，结构不破坏，震后结构保持震前状态。

2 性能要求 II：结构局部进入弹塑性工作阶段，结构局部发生轻度损伤，不需维修或经简单修补，短期内结构可恢复其正常使用功能。

3 性能要求 III：结构处于弹塑性工作阶段，结构产生破坏但不出现整体坍塌，经修复后可恢复其使用功能。

【条文说明】多次强烈地震的震害经验表明，即使是现代的隧道工程结构也会发生不同程度的破坏、甚至坍塌。从经济方面考虑，将结构设计成在任何强烈地震作用下都不破坏是极其困难的、甚至是不可能的。考虑到强度不同的地震发生的概率不同，强度越高则发生概率越低。在抗震设计性能要求方面，基本设想是在遭受发生概率高的地震时，预期的结构破坏应该比较小，而在遭受发生概率低的地震时，预期的结构破坏比较大，即不同发生概率的地震作用下，规范容许的结构破坏程度不同。在抗震设计时，根据不同的地震动水准，并结合抗震设防分类，选取不同的性能要求，作为抗震设防目标，分述为：性能要求 I：结构处于正常使用状态，从抗震分析角度，结构可视为弹性体系，在预期的地震动作用下，结构不受损坏，可正常通车。性能要求 II：结构局部进行弹塑性工作阶段，结构的非弹性变形或结构体系的损坏应控制在可修复的范围，在预期的地震动作用下，结构不致产生大的破坏，经修补后可限速通车。性能要求 III：结构进入弹塑性工作阶段，结构发生较大的非弹性变形，但应控制在规定的范围内，在预期的地震动作用下，结构可能产生较大破坏，但不出现整体坍塌，经抢修后可限速通车。

11.1.4 安装在隧道内的附属机电设施的支座和连接，应符合地震时仍满足使用功能的要求，且不应导致相关部件的损坏。附属构造物和机电设备与主体结构应有可靠连接，避免地震时脱落伤人。

【条文说明】附属构造物和机电设备支架等的地震破坏也会影响安全和使用功能，因此仍需重视。附属机电设备支架等的抗震设计，应由相关专业人员分别负责。附属构造物和机电设备与主体结构的连接应通过抗震设计妥善处理，使其在地震

时不至掉落伤人，及防止发生其他附加灾害和减少损失。

11.2 地震作用

11.2.1 盾构隧道的地震作用应按下列原则考虑：

1 应同时考虑沿结构横断面方向和纵向的水平地震作用。

2 对于重点设防类盾构隧道、抗震设防地震动分档为 0.2g 及以上地区的盾构隧道、竖向地震效应明显地区的盾构隧道，应同时考虑水平向和竖向的地震作用。

3 当采用时程分析法时，应同时输入三个方向分量的一组地震动时程。

【条文说明】考虑盾构隧道环间及环内接头对结构地震响应的影响，盾构隧道横断面及纵向的变形均会影响其正常使用。因此，盾构隧道抗震计算时应同时考虑结构横断面与纵向的水平地震作用。对于重点设防类盾构隧道及竖向地震响应明显地区的盾构隧道，除水平地震动外，还需要考虑竖向地震作用。

11.2.2 隧址区及外延 10km 范围内存在发震断层时，宜进行工程场地地震安全性评价；隧址区及外延 5km 范围内存在可能发生震级不小于 6.5 级的发震断层时，应进行工程场地地震安全性评价。开展了专门的工程场地地震安全性评价的隧道，应根据安全性评价结果确定抗震设计地震动参数。

【条文说明】由于受到断层破裂效应的影响，近断层场区地震动特性与远场有较大差异；同时，发震断层易在近断层场区引发严重的地质灾害，如近地表破裂、滑坡等。为充分考虑近断层场区的地震动特性及地震地质灾害，需要进行场地地震安全性评价。目前针对近断层场区的范围尚没有统一认识，《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 及《公路隧道抗震设计规范》中规定为 10km，为了保持与上述规范的一致性，本规范采用 10km。

11.2.3 抗震设防烈度与基本地震动峰值加速度之间对应关系应符合表 11.2.3 的规定。

表 11.2.3 抗震设防烈度与基本地震动峰值加速度之间对应关系

抗震设防烈度	VI	VII		VIII		IX
基本地震动峰值加速度指标 (g)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
II类场地基本地震动峰值加速度范围 (g)	<0.09	[0.09, 0.14)	[0.14, 0.19)	[0.19, 0.28)	[0.28, 0.38)	≥0.38

【条文说明】表 11.2.3 所给的对应关系直接引用了《中国地震动参数区划图》GB 18306 的规定，需要注意的是抗震设防烈度为 7 度或 8 度时分别对应两个地震动峰值加速度指标。非 II 类场地的地震动峰值加速度与 II 类场地的地震动峰值加速度的换算，应按照《中国地震动参数区划图》GB 18306 表 E.1 的规定。

11.2.4 地震作用应考虑盾构隧道场地类别差异。盾构隧道场地类别可根据岩石的剪切波速或土层等效剪切波速和场地覆盖层厚度，按表 11.2.4 分为四类。覆盖层厚度确定方法及平均剪切波速计算公式可参照《建筑抗震设计规范》GB 50011。

表 11.2.4 盾构隧道隧址场地类别划分

岩石的剪切波速或土的等效剪切波速 (m/s)	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
$v_s > 800$	0	---	---	---	---
$800 \geq v_s > 500$	---	0	---	---	---
$500 \geq v_{se} > 250$	---	<5	≥ 5	---	---
$250 \geq v_{se} > 150$	---	<3	3~50	>50	---
$v_{se} \leq 150$	---	<3	3~15	15~80	>80

注：表中 v_s 系岩石的剪切波速；表中数据为场地覆盖层厚度 (m)。

【条文说明】《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 中工程场地类别划分方法以平均剪切波速和覆盖层厚度作为评定指标，得到了我国工程界的普遍认同，因此本规范直接进行了采用。

11.2.5 I₀、I₁、III、IV 类场地的水平向设计基本地震动峰值加速度 a_{\max} 应根据 II 类场地设计基本地震动峰值加速度 $a_{\max II}$ 和场地地震动峰值加速度调整系数 F_a ，按式 (11.2.5) 确定。场地地震动峰值加速度调整系数 F_a 可按表 11.2.5 所给值分段线性插值确定。

$$a_{\max} = F_a \cdot a_{\max II} \quad (11.2.5)$$

表 11.2.5 场地设计基本地震动峰值加速度调整系数 F_a

II 类场地设计基本地震动峰值加速度 $a_{\max II}$ (g)	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
≤ 0.05	0.72	0.80	1.00	1.30	1.25
0.10	0.74	0.82	1.00	1.25	1.20
0.15	0.75	0.83	1.00	1.15	1.10
0.20	0.76	0.85	1.00	1.00	1.00
0.30	0.85	0.95	1.00	1.00	0.95
≥ 0.40	0.90	1.00	1.00	1.00	0.90

【条文说明】地震动观测数据及有关研究表明，同一地震中不同场地类别的场地

地表地震动的放大系数有明显差异。同一场地在不同强度地震作用下的非线性影响程度不同，导致其地震动特性，包括峰值加速度和位移改变程度不同。本规范考虑了以上因素，采用了场地类别和地震动峰值加速度双参数的场地地震动参数调整方法，根据场地类别和II类场地地震动峰值加速度的不同选用地震动峰值加速度调整系数 F_a (表 11.2.5) 对地震动峰值加速度进行调整。场地地震动参数调整方法参考《中国地震动参数区划图》GB 18306。

11.2.6 II类场地上的设计基本地震动加速度反应谱特征周期应按《中国地震动参数区划图》GB 18306 中地震动加速度反应谱特征周期分区值确定。I₀、I₁、III、IV 类场地设计基本地震动加速度反应谱特征周期应按表 11.2.6 确定。

表 11.2.6 场地基本地震动加速度反应谱特征周期调整表 (s)

II类场地设计基本地震动 加速度反应谱特征周期分 区值	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
0.35	0.20	0.25	0.35	0.45	0.65
0.40	0.25	0.30	0.40	0.55	0.75
0.45	0.30	0.35	0.45	0.65	0.90

【条文说明】根据场地类别对设计基本地震动加速度反应谱特征周期进行调整。

11.2.7 II类场地地表设计基本地震动峰值位移 $u_{\max II}$ 应按《中国地震动参数区划图》GB 18306中地震动峰值加速度分区值确定，见表11.2.7采用。

表 11.2.7 II类场地的地表设计基本地震动峰值位移 $u_{\max II}$ (m)

地震动峰值加速度分 区 (g) 地震作用	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
E1	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09
E2	0.03	0.07	0.10	0.13	0.20	0.27
E3	0.08	0.15	0.21	0.27	0.35	0.41

【条文说明】理论分析和大量的地震记录统计表明，地震动峰值位移与峰值加速度的关系受震级大小、场地条件和震源距的影响，本条根据《中国地震动参数区划图》GB 18306给出了II类场地地表设计基本地震动峰值位移的取值规定。

11.2.8 I₀、I₁、III、IV类工程场地地表水平向设计基本地震动峰值位移 u_{\max} 应取II类场地地表设计基本地震动峰值位移 $u_{\max II}$ 乘以场地地震动峰值位移调整系数 F_u 的值，按式11.2.8确定；场地地震动峰值位移调整系数 F_u 按表11.2.8所给值分段线性插值确定。

$$u_{\max} = F_u \cdot u_{\max II} \quad (11.2.8)$$

表 11.2.8 场地设计基本地震动峰值位移调整系数 F_u

II 类场地设计基本地震动峰值 位移 $u_{\max II}$ (m)	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
≤0.03	0.75	0.75	1.00	1.20	1.45
0.07	0.75	0.75	1.00	1.20	1.50
0.10	0.80	0.80	1.00	1.25	1.55
0.13	0.85	0.85	1.00	1.40	1.70
0.20	0.90	0.90	1.00	1.40	1.70
≥0.27	1.00	1.00	1.00	1.40	1.70

【条文说明】考虑到盾构隧道的结构特性以及抗震分析的要求，抗震设计时需要考虑地震动峰值位移的影响作用，本条给出了场地地表水平向地震动峰值位移的取值规定。与地震动峰值加速度相对应，场地地震动峰值位移也采用了场地类别和地震动峰值位移双参数的调整方法，根据场地类别和II类场地地震动峰值位移的不同选用峰值位移调整系数 F_u (表 11.2.8) 对设计基本地震动峰值位移进行调整。

11.2.9 场地地表竖向设计地震动峰值加速度取值应不小于水平向峰值加速度的 0.65 倍。竖向地震动峰值加速度与水平向峰值加速度的比值可按表 11.2.9 确定。但在活动断裂附近，竖向峰值加速度宜采用水平向峰值加速度值。

表 11.2.9 竖向地震动峰值加速度与水平向峰值加速度比值 K_v

水平向峰值加速度 (g)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
K_v	0.65	0.70	0.75	0.80	0.90	1.00

【条文说明】场地竖向地震动峰值加速度与水平向峰值加速度的比值受地震环境影响，近断层处比值可接近或达到 1.0，但随着震中距的增加其比值会降低。因此，本规范确定了考虑地震环境影响的竖向地震动峰值加速度与水平向峰值加速度比值的取值方案。同时为了安全起见，限制了场地竖向地震动峰值加速度取值不小于水平向峰值加速度的 0.65 倍。

11.2.10 采用反应位移法或时程分析法进行抗震计算时，场地地表设计加速度反应谱曲线可参照《建筑抗震设计规范》GB 5100 相关规定确定，模型底部边界处所输入地震动应由场地地表设计地震动通过反分析得到。

【条文说明】规范给定的设计地震动参数多为地表地震动参数，而采用反应位移法或时程分析法进行抗震计算时，需要在模型底部输入地震动；由于地表对地震波的反射作用，地表的地震动参数一般要大于地下的地震动参数。模型底部边界

处的地震动参数可采用反分析方法得到，当地表、土层界面和基岩面较平坦时，反分析可采用一维剪切土层模型；当土层界面、基岩面或地表起伏较大时，反分析宜采用二维或三维场地模型。

11.3 抗震设计

11.3.1 盾构隧道应考虑下列震害或地震效应：

- 1 强烈地震动导致隧道结构的振动破坏。
- 2 强烈地震动造成的场地失稳或失效，包括液化、震陷、滑坡等。
- 3 地表断裂错动，包括地表基岩断裂及构造性地裂造成的破坏。
- 4 局部地形、地貌、地层结构的变异引起的地震动异常造成的特殊破坏。

11.3.2 盾构隧道宜规避对抗震不利和危险地段；不能规避时，宜作地震安全性评价分析，并应以最短距离穿越对抗震不利和危险地段，或对其进行处理。

- 1 有利地段：稳定基岩；坚硬土；开阔、平坦、密实、均匀的中硬土等。
- 2 一般地段：不属于有利、不利和危险的地段。
- 3 不利地段：软土，饱和土，陡坎，峡谷、不均匀的土层（如故河道、暗埋的塘浜沟谷、软硬交界）等。
- 4 危险地段：地震时可能发生崩塌、滑坡、地陷、地层液化、泥石流等及可能发生地层错动的断裂带。

【条文说明】本条是在参考《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 相关规定的基礎上，考虑盾构隧道的特殊性而制定的。关于对盾构隧道抗震有利、一般、不利和危险地段的划分，直接采用了《建筑抗震设计规范》的规定，并明确列出了可进行建设的一般地段，即不属于有利、不利和危险的地段。

11.3.3 盾构隧道的抗震计算方法包括地震系数法、反应位移法或反应加速度法、时程分析法，具体计算方法应根据隧道的工程规模、重要程度、周围环境、地形地质条件、结构形式及输入地震荷载等因素综合确定。盾构隧道抗震计算可采用横向、纵向和三维空间模型等模型进行，计算模型应反映结构在地震作用下的实际工作状态，计算结果应经分析判断确认其合理、有效后方可用于工程设计。

【条文说明】目前盾构隧道常用的抗震计算方法主要有静力法、反应位移法及时程分析法等。不同的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、隧址区工程地质条件

及输入地震动参数等因素综合确定。根据所选的抗震计算方法，可采用横向、纵向和三维空间模型进行分析计算。计算模型的选取必须符合结构的实际工作情况，抗震设计时应对所获计算结果进行判别，确认其合理有效后方可在设计中应用。

11.3.4 横向抗震计算适用于纵向长度较大、横向结构形式及构造不变的结构。横向计算模型应符合下列规定：

- 1 沿隧道纵向选取一个或多个地层条件和结构形式具有代表性的隧道横断面作为计算断面。
- 2 根据计算方法不同，采用适合本方法的计算假定条件与计算参数。
- 3 采用拟静力分析法时，边界条件处理应与荷载的取值所采用的方法相匹配。
- 4 采用时程分析法计算时，模型计算范围宜尽量取大，且边界条件宜根据外行地震波特征选择非反射边界。

【条文说明】对于纵向长度较大、横向结构形式及构造不变的结构，根据其构造特点和平面应变原理，可采用横向抗震计算。进行计算时，沿隧道纵向选取一个或多个横断面作为计算断面，一般选取隧道覆土较浅、偏压受荷、水位变化较大或岩土力学特性较差等具有代表性的横断面。

11.3.5 纵向抗震计算适用于纵向长度较大、横向结构形式及构造不变、纵向可能穿越复杂地质、地形等的隧道结构，如：地形与地质条件变化显著的洞口段或隧道穿越大型断层破碎带、软硬岩层交界地带区段等。

【条文说明】当隧道纵向穿越地质、地形条件变化大的区域时，如洞口段或穿越大型断层破碎带、软硬岩层交界地带等，在地震作用下，结构纵向可能产生较为复杂的内力响应，致使结构破坏或影响其正常使用，因此该类隧道的纵向抗震性能需重点考虑。

11.3.6 三维模型抗震计算主要适用于大型、重要、特殊隧道结构，或地形、地质条件变化较大的局部区段，以及结构形式变化较大、空间效应显著的结构等，如：洞口段、穿越活动断层带或软硬岩层交界地带区段、地下风机房等。

【条文说明】三维模型时程分析法能够较好地处理介质地非均匀性、各向异性、非线性及复杂几何边界条件，可以全面考虑地震动峰值、频谱特性和持续时间，并可以同时揭示隧道结构及周围岩土体在地震全时段的动力响应特征，因此特别

适用于大型、重要、复杂及特殊隧道结构或地形、地质条件变化较大的局部区段，以及纵向结构形式变化较大、空间效应显著的隧道结构等。

11.3.7 地震反应主要受惯性力控制的隧道，如位于岩质围岩中的隧道等，在经历设防地震烈度情况下，可采用拟静力法：将地震力简化为衬砌承受自重水平地震力、侧向土压力增量、洞顶土柱水平地震力。

11.3.8 地震反应主要受地层相对位移控制的隧道，如位于软土地层中的隧道等，其可采用反应位移法。采用此方法时，应考虑地层相对位移、周围地层的剪力及结构惯性力作用。

11.3.9 三维模型宜采用时程分析法进行结构动力分析，应符合以下规定：

1 已作地震安全性评价的隧址，设计地震动时程应根据专门的工程场地地震安全性评价的结果确定。

2 未作地震安全性评价的隧址，输入的设计地震动加速度时程可用人工合成的地震动时程曲线，包括水平向和竖向地震动时程曲线，其加速度反应谱曲线与设计地震动加速度反应谱曲线的误差应小于一定的值，其峰值加速度、峰值位移应与设计地震动峰值加速度、峰值位移一致。

3 应采用不少于 3 组设计地震动时程，计算结果宜取时程分析法的包络值和反应谱法的较大值。地震动时程不少于 7 组时，可以采用计算结果的平均值。

【条文说明】采用时程分析法进行结构动力分析时，需要提供地震动输入时程，本规范规定可以采用人工合成方法给出设计地震动时程曲线。人工合成的地震动加速度反应谱曲线与设计地震动加速度反应谱曲线的误差要小于一定值，这个值一般可取 5%。进行结构地震反应时程分析时，考虑到各条地震动输入的结构反应结果有较大的差异，本条规定输入地震动样本数及计算结果选用要求。当设计地震动时程的样本数量大于等于 3 条且小于 7 条时，计算结果具有较大的随机性，因此选取时程分析法的包络值和反应谱法的较大值进行抗震设计。当设计地震动时程的样本数量不小于 7 条时，计算结果具有较好的统计特征，因此可以取计算结果的平均值进行抗震设计。

11.3.10 各种计算方法中地震作用按以下规定确定：

1 采用时程分析法时，对于一般盾构隧道横断面，可按平面应变问题进行地震反应计算；对于主隧道与横通道、竖井等连接处以及地层条件发生显著变化的

盾构隧道应采用三维计算模型，计算模型的侧边界距结构的距离不宜小于3倍隧道水平有效宽度，底面边界宜取至设计地震作用基准面，或距结构的距离不小于3倍隧道竖向有效高度，边界宜采用非反射边界。

2 采用反应位移法时，根据是否具有场地输入地震动及计算精度的要求分为反应位移法和广义反应位移法。隧道横断面方向反应位移法将地层位移差和周边剪切力作用于隧道进行计算；纵向反应位移法根据地层沿隧道纵向位移差，可通过隧道纵向等效拉、压和弯曲刚度简化，求解隧道在地震作用下衬砌结构纵向的内力。

3 采用反应加速度法时，通过在地下结构位置处的地层发生最大变形时，对各地层和地下结构按照其所在的位置施加相应的水平（竖向）有效惯性加速度来实现在整个地层-结构系统中施加水平惯性体积力，计算结构的地震反应。针对淤泥质粘土、粉质粘土等软土地层，反应加速度法可以采用等代地震加速度法和等代惯性力法两种简化形式。

【条文说明】原则上讲，时程分析法适用于各种情况的隧道抗震计算。当隧道沿纵向结构形式连续、规则、横断面构造不变，周围地层沿纵向分布一致时，横断面方向的抗震计算可按平面应变问题处理。当地形与地质条件复杂、隧道结构形式变化较大、空间效应显著，如主隧道与横通道连接处、竖井等连接处应采用三维空间模型进行抗震计算，为了使计算结果更加准确，模型大小宜满足本条规范要求，同时为了防止地震波在模型边界的反射，模型边界宜选用能够减小地震波反射作用的边界条件，如黏性或黏弹性人工边界等，避免使用完全固定或完全自由等不合理边界条件。日本地下结构抗震计算中广泛采用反应位移法，其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，且不需要输入场地地震动。当隧道处于非均匀场地，具有场地设计地震动时程，且计算精度要求较高时，宜采用广义反应位移法进行抗震计算。

地层-地下结构系统在地震作用下受力以体积力为主，地层与地下结构之间存在着动力相互作用，地层对地下结构的约束作用不可忽略。反应加速度法通过对各地层和地下结构按照其所在的位置施加相应的水平有效惯性加速度来实现在整个地层-结构系统中施加水平惯性体积力。在地震动作用下，地下结构位置处的地层发生最大变形时结构受力最不利，此时结构位置处的地层处于最大剪应

变状态。当地层条件简单时，施加的水平加速度为地下结构顶底部位置处地层发生最大相对位移时刻的水平加速度；当地层复杂，地层和地下结构宜根据其所在位置施加相应的水平有效惯性加速度，通过对地层单元水平方向受力分析得到各地层的水平有效惯性加速度。

11.3.11 盾构隧道应根据抗震性能要求分别对相应结构的强度、变形和位移进行验算。

【条文说明】根据抗震性能要求确定强度和变形验算内容和指标，抗震验算是在选定抗震性能要求后确定合适的验算目标性能，目前主要选取：应力水平（强度）、使用功能（变形量、裂缝宽度、接头张开量等）等。

11.3.12 当抗震性能要求为 I 时，应按《建筑抗震设计规范》GB 50011 进行结构构件的截面抗震验算，同时尚应符合以下规定：

- 1 盾构管片接缝的变形量不应超过满足接缝防水材料水密性要求的允许值。
- 2 接缝张开量不大于 2mm，接缝错台不大于 3mm，且接缝总的变形量不应超过满足防水密封垫水密性要求的允许值。
- 3 伸缩缝处轴向钢筋（螺栓）的位移应小于屈服位移；伸缩缝处的转角小于屈服转角。

11.3.13 当抗震性能要求为 II 时，宜进行结构整体变形性能验算，盾构隧道直径变形率的界限值宜为 6%。

11.3.14 当抗震性能要求为 III 时，应进行结构整体变形性能验算，其相应参数和计算模型要适应弹塑性阶段计算要求，盾构隧道直径变形率的界限值宜为 18%。

【条文说明】根据本规范提出的各种抗震设防水准下的设防性能目标，盾构隧道性能要求有 I、II、III 三个等级。

纵向抗震验算，应充分考虑盾构隧道各种连接部位的变形能力、极限承载力以及防水能力。本规范参考国内针对盾构隧道的相关规范，规定接缝张开量不大于 2 mm，接缝错台不大于 3 mm。伸缩缝等连接部位装置宜考虑材料和施工措施，在试验的基础上正确把握其变形性能和防水性能，进行合理地建模和参数设定。

纵向地震反应计算，应综合考虑纵向和横向水平向地震动耦联计算结果，对隧道进行纵向和横向的验算。但由于两个方向地震动的耦联方式有待进一步深入

研究，且两个方向地震反应最大值一般情况下不可能同时发生，因此，为简便起见，盾构隧道纵向地震反应时的验算，可分别根据盾构隧道纵向和横向水平方向地震动的结构反应进行抗震验算。考虑到盾构隧道的轴向拉-压一般不会引起地震破坏，因此本规范仅规定对沿横向水平地震作用进行验算。

针对盾构隧道，日本采用结构上下端之间地基相对位移最大值与隧道外径的比值，即直径变形率，作为验算指标。国家标准《地铁设计规范》GB 50517-2013条文说明中，根据已有工程实践经验，将盾构隧道直径变形率控制在 4‰~6‰，但这是施工荷载情况下的结果；上海市《地下铁道建筑结构抗震设计规范》DG/TJ 08-2064-2009 规定，在相当于结构性能Ⅱ下直径变形率最大值不超过按接缝防水材料安全使用确定的允许值。那么可以认为 4‰~6‰的直径变形率是盾构隧道结构在弹性设计阶段的变形限值，本规范性能要求Ⅱ仅允许结构局部破坏、接缝防水不能失效，因此取 6‰的直径变形率作为其整体验算限值是合适的。

本规范性能要求Ⅲ允许结构发生损坏，但不允许发生整体坍塌，防水不能失效。通过文献调研发现，目前地铁盾构隧道结构试验中结构屈服时的最大直径变形率在 10‰左右，而结构达到最大承载能力时的直径变形率在 25‰以上。由于缺乏大直径 2 车道和 3 车道盾构隧道结构试验资料，考虑地铁盾构隧道和大直径道路盾构隧道结构的尺寸效应，道路隧道相应的直径变形率应更小。如果允许接缝防水失效，其限制还可以取到弹性限值的 3~4 倍，即 18~24‰；如果不允许接缝防水失效，其限值受盾构隧道接缝防水失效时的直径变形率控制，该值一般大于 12‰。需要注意的是，性能要求为Ⅱ和Ⅲ时，材料已进入弹塑性阶段，在计算中其动态力学参数应提高，特别是在变形验算时，其动弹模往往增大至静弹模的 3~5 倍。

11.3.15 横通道与主体结构结合处、盾构工作井与隧道结构连接处进行抗震验算时宜采用三维的时程分析法对结构的安全性进行验算，计算模型范围和边界的选取参考时程分析法对其计算模型的要求。结构结合处接缝总变形量不应超过满足防水密封垫水密性要求的允许值，伸缩缝处轴向钢筋（螺栓）的位移应小于屈服位移，伸缩缝处的转角小于屈服转角。

11.3.16 管片接头构造应按等效刚度梁模型计算结构纵向内力分布，并据此计算每环上的纵向接头上的内力，并验算其抗剪强度、抗拉强度及变形性能。

【条文说明】等效刚度梁模型可分为横向等效刚度梁模型和纵向等效刚度梁模型。在横向等效刚度梁模型中，宜将环向接头与管片作为整体，通过刚度折减系数表征环向接头对衬砌环的刚度折减，把管片环简化为等效刚度圆环梁，周围土体可采用地层弹簧模拟。在纵向等效刚度梁模型中，宜把纵向接头与管片环作为整体，将隧道结构沿纵向简化为一根等效刚度梁，等效刚度梁的拉、压和弯曲刚度可通过纵向变形一致条件求出，周围土体可采用地层弹簧模拟。

11.3.17 当抗震设防烈度为 7 度及以上区域时，盾构隧道应进行场地液化判别，具体判定方法可参照《公路隧道抗震设计规范》JTG 2232。在液化地基中穿越的隧道，应检验地层液化时的抗浮稳定性。当可液化土层处于隧道结构下部时，宜按以下要求选用地基抗液化措施：

- 1 轻微液化：部分消除液化，或对基础和结构进行处理。
- 2 中等液化：全部消除液化，或部分消除液化且对基础和结构进行处理。
- 3 严重液化：全部消除液化。

【条文说明】本条规定主要依据液化场地的震害调查结果。多数资料表明抗震设防烈度为 6 度区域的液化对一般隧道结构物所造成的震害是比较轻的，一般情况下可不进行液化判别和处理。《建筑抗震设计规范》GB50011-2010、《公路隧道抗震设计规范》JTG 2232-2019 等抗震规范中均给出了比较具体的地基液化判别方法与标准，本规范直接引用。

抗液化措施是对液化地基的综合治理。要注意以下几点：

1 判定为发生液化的土层，如果采取抗液化措施，则不必根据其液化程度对土的参数进行修正。因为土已经过抗液化处理，不可能液化；其土性参数也不再是液化时的土性参数。

2 倾斜场地的土层液化往往带来大面积土体滑动，造成严重后果，而水平场地土层液化的后果一般只造成结构物的不均匀下沉和倾斜，本条规定不适用于坡度大于 10 度的倾斜场地和液化土层严重不均的情况。

3 对于液化等级属于中等的场地，尽量多考虑采用较易实施的基础与结构物处理的构造措施，不一定要加固处理液化土层。

4 在液化层深厚的情况下，消除部分液化沉陷或液化上浮的措施，处理深度不一定达到液化下界，可以残留部分未经处理的液化层。

5 强烈地震时软土发生震陷, 不仅被科学实验和理论研究证实, 而且在宏观震害调查中, 也证明它的存在。但研究结果尚不够充分, 因此本条只是给出了必要时可以根据液化震陷量的评价结果适当调整抗液化措施的原则规定。

11.3.18 应对隧道洞门的墙身截面强度、偏心距、基底应力、抗滑和抗倾覆稳定性分别进行抗震验算, 地震作用只与墙体重力和土压力组合。

11.4 抗震措施

11.4.1 根据抗震设防烈度及盾构隧道的实际条件, 应在提高隧道结构自身抗震能力与减少地震波传递到隧道结构两方面综合采取抗震措施。

【条文说明】合理的抗震措施, 比单纯依靠提高设防标准来增强抗震能力更为经济合理。由于受到周围介质的约束, 盾构隧道的地震反应特性与地面结构不同, 其地震反应主要取决于地层的位移差。控制地层位移差的方法主要有两种, 一方面是采取必要的构造措施, 使隧道容易随着地层的振动而振动, 提高隧道自身的抗震性能; 另一方面是通过工程手段减少传递到隧道结构的地震波, 如绕避不良地质段、改良土体、在盾构隧道与地层之间设置减震层等措施。

11.4.2 当抗震设防烈度为 7 度时, 在下列地段应设置变形缝:

- 1 隧道与联络横通道连接处。
- 2 洞门附近、竖井及工作井两端。
- 3 地形及地质条件突变地段。
- 4 上覆荷载变化较大地段。

【条文说明】多数震害调查资料表明, 抗震设防烈度为 6 度区域中的盾构隧道所受震害是比较轻的, 一般情况下可不考虑。盾构隧道衬砌是用螺栓将预制管片拼装而成, 隧道衬砌的横断面以及纵向均有很多接头。通常情况下, 接头处的受力与变形对结构的安全和正常使用起到控制性作用。此外, 隧道与横通道连接处、隧道与盾构工作井或通风井连接处、地层条件突变处, 地震作用下容易产生应力集中和变形过大, 应设置变形缝降低应力集中程度。

11.4.3 当抗震设防烈度为 8 度时, 除按照第 11.4.2 条要求采取抗震措施外, 还应根据抗震计算要求设置可变形的柔性管片, 在地震作用强烈的地段设置减震层。

11.4.4 当抗震设防烈度为 9 度时, 除按照第 11.4.2 条及 11.4.3 条采取抗震措施外, 还应根据抗震计算要求加强管片强度、管片连接以及减震层设置, 必要时可

设置抗震内衬。

【条文说明】在衬砌与地层间设置减震层，形成地层-减震层-结构体系，减震层可减小地层向衬砌传递的形变或荷载，起到降低衬砌内力与变形的作用。对盾构隧道而言，减震层材料可选用剪切模量较低、无毒无害、耐久性好的可压注材料，通过同步注浆或二次注浆进行施工。盾构隧道减震层在日本得到了广泛应用，且其减震效果得到了验证。

11.4.5 当盾构隧道穿越断层带时，可采取以下措施：

- 1 根据抗震需要加强管片结构强度。
- 2 断层两端过渡带设置 2~3 道变形缝或可变形管片。
- 3 扩大开挖断面，在管片衬砌与地层间设置减震层。
- 4 如果为活动性断层则应考虑扩大隧道净空断面，以有效吸收错动量。

【条文说明】对跨断层段隧道结构的抗震目的主要是适应断层的变形，目前常用两种途径增加衬砌的变形能力，一是衬砌中设置铰接缝，二是在地层与衬砌间设置可压缩的缓冲层。在增加结构变形能力的同时，还应兼顾隧道的正常使用要求，如防水性能。

11.4.6 当盾构隧道的地基在地震作用下可能发生液化时，可采取以下抗液化措施：

- 1 可根据条件在隧道局部或全长设置二次衬砌。
- 2 增加上覆土层厚度、改善上覆土性能、增加管片衬砌整体纵向抗弯刚度、严格控制注浆压力等措施控制盾构隧道管片在地震作用下可能发生上浮。
- 3 采用加密法、换土法、注浆法等方法进行地层加固，加固后地层应满足盾构隧道地层的相应标准。

【条文说明】盾构隧道存在大量接头，在地震作用下可通过自身变形适应地震引起的隧道周边地层位移，减小管片内力。同时应该注意到，如果盾构隧道结构刚度太小，结构产生过大的变形会导致破坏或影响其正常使用。震害调查及振动台试验均说明盾构隧道设置二次衬砌在一定条件下能够起到加固结构、减小震害的作用。所以可根据条件在隧道局部或全长设置二次衬砌，以增大结构刚度及整体性的方式进行抗震。

盾构隧道周边地基的液化现象可能导致隧道结构的失稳，因此隧道线路选择应尽可能避开可能发生液化的地层，无法避开的，通过采用相应的措施来加强隧

道结构或改善隧道周围地层，以保证隧道的稳定和安全。

征求意见稿

12 结构防水

12.1 一般规定

12.1.1 公路盾构隧道防水设计应根据环境条件、环境作用等级、设计使用年限、结构构造特点、施工方法等因素进行，按照“定级确当、技术先进、措施可靠、选材适当、经济合理”的原则综合考虑，以满足结构的安全、耐久性和使用要求。

【条文说明】在进行明挖法隧道和暗挖法隧道防水设防要求设计时，应以结构物的防水等级作为依据，虽然结构的使用功能、使用年限、水文地质、结构形式、环境条件、施工方法及材料性能等因素不作为设计的直接依据，但是对结构物的防水效果会产生影响，在设计时应综合考虑。

12.1.2 公路盾构隧道防水设计应遵循“以结构自防水为根本，以接缝防水为重点，多道防线，综合治理”的原则，以混凝土衬砌结构自防水为根本，衬砌管片接缝防水为重点，加强隧道与工作井等特殊部位防水，确保隧道整体防水效果。

【条文说明】盾构法隧道防水设计内容包括：确定防水等级、防水措施、防水技术指标，衬砌自防水，衬砌外防水涂层，衬砌接缝防水，盾构隧道与竖井的接头防水，连接通道防水等。

12.1.3 公路盾构隧道防水等级宜根据工程的重要性、设计使用年限等按现行国家标准《地下工程防水技术规范》（GB 50108）选用二级及以上的防水标准。

12.1.4 公路盾构隧道的防水措施，应根据工程防水等级、衬砌形式及其它技术要求，在设计中按照表 12.1.4 的规定选用。

表 12.1.4 不同防水等级衬砌的防水措施

防水措施		高精度管片	接 缝 防 水				外防水防腐蚀涂层
			密封垫	嵌缝	注 入密封剂	螺孔密封圈	
防水等级	一级	必选	必选	全隧道或部分区段应选	可选	应选	对混凝土有中等以上腐蚀的地层应选；非腐蚀性地层宜选
	二级	必选	必选	局部宜选	可选	应选	对混凝土有中等以上腐蚀的地层

							宜选
--	--	--	--	--	--	--	----

【条文说明】依据国内多年盾构隧道防水的实践总结，考虑到“注入密封剂”尽管使用得不多，但属于有效的补救措施，对未来隧道的维护保养意义不小，故予列入。盾构隧道虽然以单层衬砌为主，但复合衬砌也非少见；如磁悬浮隧道、排水隧道，因此，着眼于结构的需要，同时，也考虑其防水的意义，故不去除“复合衬砌”。“阴极保护与金属埋露件防腐”等主要是防腐蚀措施，“回填注浆”措施主要作用是控制盾构推进，防止地面沉降，他们虽然与防水也有关系，但不直接影响防水等级，故未予列入。

12.1.5 公路盾构隧道防水材料应根据外水压力及设计使用年限选用，防水方案和构造应考虑在长期的运营管理中便于维修保养，所采用的防水混凝土、水泥砂浆防水层、涂料防水层、卷材防水层、金属防水板、管片接缝橡胶密封垫、螺栓孔橡胶圈、橡胶止水带等材料特性应满足第七章《建筑材料》的相关要求，并应符合现行国家标准《地下工程防水技术规范》（GB50108）、《地下防水工程质量验收规范》（GB50208）的规定。

12.1.6 公路盾构隧道防水设计，应包括下列内容：

- 1 防水等级和设防要求；
- 2 防水混凝土的抗渗等级和其他技术指标；
- 3 其他防水层选用的材料及其技术指标；
- 4 管片接缝防水选用的材料及其技术指标；
- 5 工程细部构造的防水措施，选用的材料及其技术指标。

【条文说明】本条规定了公路盾构隧道工程防水设计的主要内容。

12.1.7 公路盾构隧道渗漏水治理宜按照《地下工程防水技术规范》（GB50108）的有关规定执行。

12.1.8 公路盾构隧道防水设计中，应积极采用经过试验和鉴定并经实践检验行之有效的新材料、新工艺、新技术。

12.2 管片自防水

12.2.1 钢筋混凝土管片应采用防水混凝土，并应根据防水等级的要求采取其他防水措施，确保在隧道承受的水压力范围内，混凝土管片结构具有相应的防水抗渗能力。

【条文说明】管片混凝土的强度等级不宜低于 C50，这是盾构法隧道工程装配式衬砌结构的需要，可以满足在地层顶进中与运营中受力的要求，而特殊的单块衬砌加工预制方式，又使这样的强度要求成为可能。

12.2.2 处于不同埋深区域的隧道结构防水混凝土的抗渗等级应符合表 12.2.2 的规定。

表 12.2.2 防水混凝土设计抗渗等级

工程埋置深度 H (m)	设计抗渗等级
H < 20	P8
20 ≤ H < 30	P10
H ≥ 30	P12

12.2.3 防水混凝土可通过调整配合比，或掺加外加剂、掺合料等措施配置而成，其抗渗等级不得低于 P8。

12.2.4 防水混凝土的环境温度不得高于 80℃，并应根据盾构隧道所处的环境和工作条件，满足抗渗等级、抗压、抗冻和抗侵蚀等耐久性要求。

12.2.5 防水混凝土的施工配合比应通过试验确定，试配混凝土的抗渗等级应比设计要求提高 0.2MPa，并宜采用蒸汽养护或浸水养护。

12.2.6 混凝土管片使用前宜进行混凝土氯离子扩散系数检测及单块抗渗检漏，宜满足设计要求后再使用，并应符合下列要求：

1 氯离子扩散系数不宜大于 $3 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 。

2 当隧道处于侵蚀性介质的地层时，应采用耐侵蚀混凝土，抗侵蚀要求应根据介质的性质按有关标准执行。

3 钢筋混凝土管片单块检漏标准为：在设计抗渗压力下，恒压时间不小于 2 小时，渗水最大深度不得超过管片厚度的 1/5。

【条文说明】衬砌结构的耐久性要求与耐久性参数是按照现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB 50476 的规定编写的。有关数值是经过国内几条重要水下道路隧道（如上海崇明长江隧道）、轨道交通区间隧道的实践确定的。

12.2.7 防水混凝土结构，应符合下列规定：

1 结构厚度不应小于 250mm；

2 裂缝宽度应符合表 10.4.6 的规定，并不得出现贯通裂缝；

3 钢筋保护层厚度应根据结构的耐久性和工程环境选用，迎水面钢筋保护层厚度不应小于 50mm。

12.2.8 复合式衬砌的内层衬砌混凝土浇筑前，应将外层管片的渗漏水引排或封堵。采用塑料防水板等夹层防水层的复合式衬砌，应根据隧道排水情况选用相应的缓冲层和防水板材料。

12.2.9 用于防水混凝土的水泥应符合下列规定：

1 水泥品种宜采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥，采用其他品种水泥时应经试验确定；

2 在受侵蚀性介质作用时，应按介质的性质选用相应的水泥品种；

3 不得使用过期或受潮结块的水泥，并不得将不同品种或强度等级的水泥混合使用。

12.2.10 用于防水混凝土的砂、石，应符合下列规定：

1 宜选用坚固耐久、粒形良好的洁净石子；最大粒径不宜大于 40mm，泵送时其最大粒径不应大于输送管径的 1/4；吸水率不应大于 1.5%，不得使用碱活性骨料；石子的质量要求应符合国家现行标准《普通混凝土用碎石或卵石质量标准及检验方法》JGJ 53 的有关规定。

2 砂宜选用坚硬、抗风化性强、洁净的中粗砂，不宜使用海砂；砂的质量要求应符合国家现行标准《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》JGJ 52 的有关规定。

12.2.11 钢筋混凝土管片应采用高精度钢模制作，钢模每周转 100 次，必须进行系统检验，其允许偏差须符合表 12.2-11 的规定。

表 12.2.11 模具允许偏差表

序号	项目	允许偏差 (mm)	检验方法	检查数量
1	宽度	±0.4	内径千分尺	6 点/片
2	弧弦长	±0.4	样板	2 点/片，每点 2 次
3	边模夹角	《	靠尺赛尺	4 点/片
4	对角线	±0.8	钢卷尺、刻度放大镜	
5	内腔高度	-1~+2	高度尺	4 点/片

12.2.12 钢筋混凝土管片制作尺寸的允许偏差应符合下列规定：

1 宽度应为±1mm；

2 弧、弦长应为±1mm；

3 厚度应为+3mm，-1mm。

【条文说明】管片尺寸精度是控制隧道接缝面平整的关键要素之一。目前，管片

都在高精度钢模中作单块定型生产，钢模的制作精度达到设计要求。表 12.2.2 单块管片制作尺寸允许误差的控制要求虽较高，但技术上是可达到的。

12.2.13 防水混凝土可根据工程管片抗裂需要掺入合成纤维或钢纤维，纤维的品种及掺量应通过试验确定；对于 $D \geq 14\text{m}$ 的管片结构，宜在管片混凝土中掺加防裂材料（如改性聚丙烯纤维），以降低混凝土凝结过程中的早期收缩裂缝。

12.3 附加防水层设计

12.3.1 对有特殊要求（如埋深较大或地层腐蚀程度高）地段的管片，应在衬砌结构外表面涂刷外防水涂层，以增强防水、防腐蚀性。

【条文说明】除了防水等级一级的高标准的隧道管片需要考虑涂外防水涂层外，关于何种环境条件下管片混凝土需要涂防水层，过去一直有争议，如今都按《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 中的规定，海洋氯化物环境、化学腐蚀环境等腐蚀环境类别必须涂刷，即便混凝土密实性已经很高也仍应按此要求。这样既可防止管片混凝土运送与施工的损伤造成的加速腐蚀，也杜绝了一旦检测（这类检测周期甚长）发现混凝土有关指标未满足要求而危及耐久性的隐患。

12.3.2 管片外防水涂层宜采用环氧和改性环氧涂料等封闭型、水泥基渗透结晶型或硅氧烷类等渗透型材料，并应符合下列规定：

- 1 涂层应具有良好的耐化学腐蚀性、抗微生物侵蚀性和耐水性，并应无毒或低毒；
- 2 涂层应能在盾构密封用钢丝刷与钢板挤压条件下不损伤、不渗水；
- 3 在管片外弧面混凝土裂缝宽度达到 0.2mm 时，涂层应能在最大埋深处水压或 0.8MPa 水压下，长期不渗漏；
- 4 涂层应涂刷在衬砌背面和环、纵缝橡胶密封垫外侧的混凝土上。

【条文说明】不能认为混凝土耐久性指标检测合格，就可省去涂刷外防水涂层的措施。同样的混凝土渗透系数，不同隧道的渗水量随隧道深度加大而增大，考虑到这个因素，涂刷外防水防腐涂层是有意义的。

12.3.3 应结合外防水涂层的性能，提出粘结力、抗渗性、抗冲击、耐腐蚀性、体积电阻率、耐磨性、施工温度、涂料厚度与成膜时间等技术要求。

以相互形成互补。

【条文说明】管片接缝密封垫究竟能否满足设计的水密性要求，还是要通过水密性试验加以确定。而通过专用钢模模拟管片一字缝、T字缝接缝密封防水试验是国内外长期采用的验证设计的方法。

12.4.4 橡胶密封垫应沿环、纵面兜绕成框型，也可设计成门型或L型，其材质和断面构造形式，应与材料耐久性要求、制作工艺相适应。

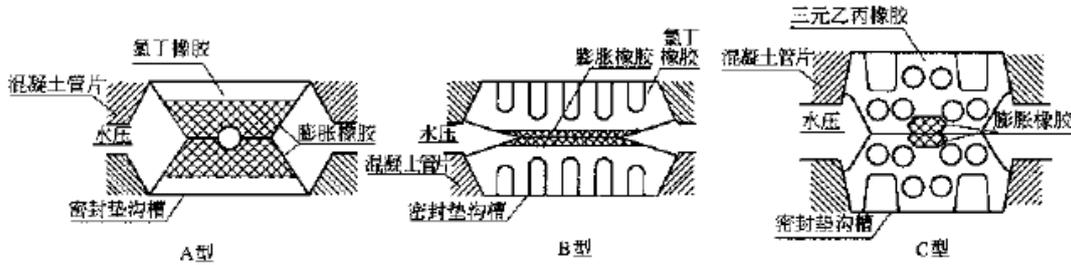


图 12.4.4 密封垫断面构造形式示意图

【条文说明】隧道管片密封垫大多制成框形，这形式对接缝、角部密封止水最有利。但是，过去处于低水压的盾构隧道所用接缝密封垫也常用门型、L型，这样造价也低，日本用遇水膨胀型密封垫时常采用这两类方式，规定其端头密封，有利于接头处的密封。

12.4.5 管片接缝密封垫应能被完全压入密封垫沟槽内，密封垫沟槽的截面积应为密封垫截面积的 1 倍~1.15 倍，其深度与密封垫的高度应符合下列要求：

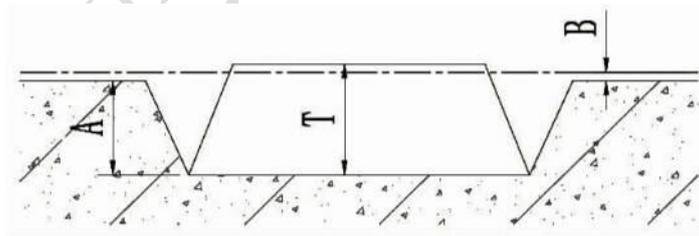


图 12.4.5 密封垫沟槽、密封垫形状截面图

$$\alpha=(T-A)/T$$

$$\alpha'=(T-A-B)/T$$

α ——为弹性密封垫最大压缩率，即压至与槽伤口齐平时的压缩率，为设计所设定；

α' ——为弹性密封垫最小压缩率，为设计所定；

B——设计中的接缝允许张开量的 1/2；

A——为要求的密封垫沟槽深；

T——为要求的弹性密封垫高。

【条文说明】由于密封垫可以为实芯，多槽、多孔等构造断面，因而公式中的系数也是个变数。又因为国外还有将其断面设计成蜂窝状的，这时，还会突破1~1.15的系数，因此，条文中用“宜”要求，而不强制规定。

12.4.6 橡胶密封垫的止水性应通过模拟一字缝、T字缝拼装的水密性试验验证。试验技术要求为：在大于等于2~3倍的隧道结构段最大埋深处水压作用下、接缝张开量大于等于最大计算变形时，不产生渗漏。

12.4.7 对于采用纵向插入拼装的管片弹性橡胶密封垫的设计，应与施工工艺协调，控制插入摩阻力、密封垫闭合压缩力，满足衬砌环环面平整要求。

12.4.8 对于埋深变化较大的长大隧道，在确定了密封垫断面外形尺寸后，可按水压条件的变化，分段对内部构造或材质性能作相应调整。

12.4.9 弹性密封垫应符合下列规定：

- 1 密封垫选型在盾构千斤顶顶力作用下应能保持其原有的弹性变形能力；
- 2 密封垫在长期压应力的作用下，应限制其塑性变形量（永久压缩变形 $\leq 25\%$ ）；
- 3 密封垫在长期水压作用下，当环、纵缝达到预定的张开量时仍能满足止水要求；
- 4 弹性密封垫材料的技术性能指标应符合表12.4.10、12.4.11中的相关规定。

12.4.10 弹性橡胶密封垫成品物理性能指标应满足下表12.4.10的要求。

表 12.4.10 弹性橡胶密封垫成品物理性能

项 目		指标		
		氯丁橡胶	三元乙丙橡胶	
硬度 邵尔 A /度		50~60	I 型 ^a	II 型 ^b
			50~60	60~70
硬度偏差 /度		±5	±5	±5
拉伸强度/MPa	≥	10.5	9.5	10
拉断伸长率 /%	≥	350	350	330
压缩永久变形 ^c /%	70°C×24 ₂ ⁰ h, 25% ≤	30	25	25
	23°C×72 ₂ ⁰ h, 25% ≤	20	20	15
热空气老	硬度变化 /度 ≤	8	6	6

化 70°C×96h	拉伸强度降低率 /% ≤	20	15	15
	拉断伸长率降低率 /% ≤	30	30	30
防霉等级		不低于二级	不低于二级	不低于二级
a I 型为无孔密封垫 b II 型为有孔密封垫				

【条文说明】根据国内外盾构隧道多年接缝防水的实践，氯丁橡胶与三元乙丙橡胶是弹性密封垫常用的橡胶材质。氯丁橡胶适用于实芯或设槽断面的、加热硫化模压加工工艺的橡胶密封垫，从断面形式考虑所取硬度较低。三元乙丙橡胶适用于多孔或多孔多槽断面的、以不使断面构造走形的微波硫化方式加工的橡胶密封垫。从断面形式考虑，所取硬度较高。

12.4.11 遇水膨胀橡胶密封垫胶料物理性能应满足下表 12.4.11 的要求。

表 12.4.11 遇水膨胀橡胶密封垫胶料物理性能

项 目		技术指标	
硬度 邵尔 A/度		42±10	45±10
拉伸强度/Mpa ≥		3.5	3
拉断伸长率/% ≥		450	350
体积膨胀倍率/% ≥		250	400
反复浸水试验	拉伸强度/Mpa ≥	3	2
	拉断伸长率/% ≥	350	250
	体积膨胀倍率/% ≥	250	300
低温弯折(-20°C×2h)		无裂纹	无裂纹

注：① 成品切片测试应达到本指标的 80%；

② 接头部位的拉伸强度指标不得低于本指标的 50%；

③ 体积膨胀倍率是浸泡后与浸泡前的试样质量的比率；

④ 低温弯折的试样条件为-20°C下 2h。

【条文说明】因为在一般情况下弹性橡胶密封垫断面较大，成品切片可加工成试样，而遇水膨胀橡胶密封垫断面较小，很难再加工成试样，需用胶料制成。

12.4.12 密封垫的宽度与高度应与设计的盾构隧道管片错位量、张开量相适应。

1 弹性密封垫的宽度关系到压力水的渗水路径长度，密封垫接触面的宽度 B 可取为最大错位量 S 的约 3 倍左右 ($B=3S$)。在管片环、纵面有凹凸榫的情况下，相邻管片的拼装错位很小、接缝两面弹性密封垫的接触宽度足够，其宽度可比同样条件下没有凹凸榫的接缝密封垫宽度小。

2 管片衬砌接缝应在出现最大计算变形量时，仍能保持在规定压力等于隧道实际承受的最大水压力下不渗漏。接缝变形量按下式计算。

$$\delta \geq \frac{B \times D}{(\rho_{\min} - \frac{D}{2})} + \delta_0 + \delta_s$$

式中： δ 环缝弹性密封垫在设计水压力作用下允许张开量(m)；

ρ_{\min} 为隧道纵向变形曲线最小半径(m)；

D 为隧道外径(m)；

B 为管片环宽(m)；

δ_0 为生产及施工误差造成的环缝间隙(m)；

δ_s 为隧道后期变形等引起的接缝张开量(m)。

【条文说明】管片环缝张开量的计算公式是被工程界认可的，接缝密封垫防水设计中接缝量的张开值即按此公式计算而得，它是随隧道纵向变形曲线的最小半径、衬砌环的宽度与外径增大而变大。另外，要注意运营阶段管片的下沉，前后环间的相对沉降，因此管片错位量对接缝水密性的影响不容忽视，今后设计中也宜置入。纵缝张开量不易计算，但拼装并出了盾壳后的管片，受周边土压力紧裹的作用，因而其纵缝张开量相对较有限。

12.4.13 管片环、纵缝内侧应设嵌缝槽。对变形缝、进出洞和连接通道、交叉工程区段等变形量大的个别区域可整环嵌缝。

12.4.14 嵌缝防水应符合下列规定：

- 1 在管片内侧环向与纵向边沿应设置嵌缝槽，其深宽比应大于 2.5，槽深宜为 25mm~55mm，单面槽宽宜为 5mm~10mm；
- 2 嵌缝材料应具有良好的不透水性、潮湿基面粘结性、耐久性、弹性和抗下坠性；
- 3 应根据隧道使用功能及防水等级要求，确定嵌缝作业区范围，采取嵌填堵水、引排水措施；
- 4 嵌缝防水施工应在盾构千斤顶顶力影响范围外进行，并应根据盾构施工方法、隧道的稳定性确定嵌缝作业开始的时间；
- 5 嵌缝作业应在接缝堵漏和无明显渗水后进行，嵌缝槽表面混凝土有缺损

时，应采用聚合物水泥砂浆或特种水泥修补，强度应达到或超过混凝土本体的强度。

6 嵌缝材料嵌填时，应先刷涂基层处理剂。嵌填应密实、平整。

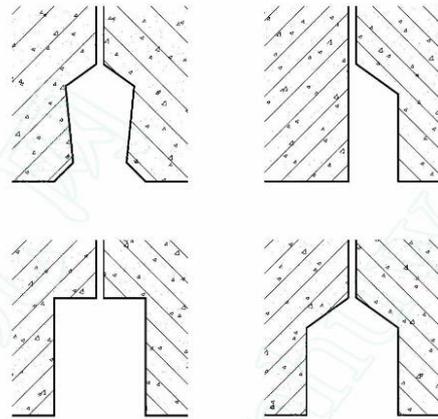


图 12.4.14 管片嵌缝槽构造形式示意图

【条文说明】嵌缝作业是盾构隧道防水施工一部分，由于嵌缝材料适应管片接缝变形能力有限，因此，除了应在管片拼装作业后实施外，还要防止隧道施工阶段结构尚未稳定，隧道沉降、管片环变形对嵌缝防水效果产生的负面影响。

12.4.15 变形缝的构造及其材料同样应满足防水要求，并应符合下列规定：

1 变形缝中应设置衬垫板，变形缝前环与变形缝后环面间的弹性密封垫须随衬垫板相应加厚；

2 变形缝用的密封材料应比普通接缝用材料能适应更大的变形量，对于弹性密封垫可采用加高厚度或增加膨胀橡胶的比例来满足相应的设计要求。

3 衬垫板材料宜在丁晴软木橡胶板、石棉橡胶板、沥青油毡、乳胶水泥板等中选用。

12.5 螺栓孔和注浆孔防水

12.5.1 螺栓孔、注浆孔（或吊装孔）均应采取防水措施。

12.5.2 注浆孔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；管片螺栓孔密封圈应在管片拼装时设置；注浆管盖密封圈应在管片背后注浆完毕后设置。

12.5.3 螺孔防水应符合下列规定：

1 螺栓孔密封圈应设置在管片肋腔的螺孔口（通常设置为锥形倒角的螺孔密封圈沟槽），特殊需要时，也可设置在环、纵面螺栓孔口；

2 螺孔密封圈的外形应与沟槽相匹配，并应有利于压密止水或膨胀止水；在满足止水的要求下，螺孔密封圈的断面宜小。

3 螺孔密封圈应为合成橡胶、遇水膨胀橡胶制品。

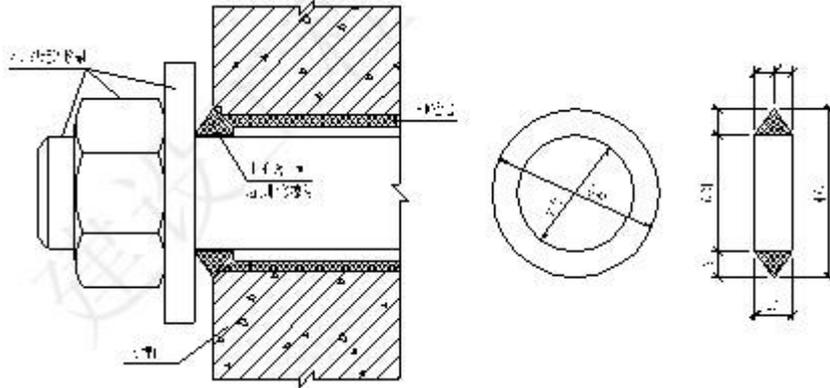


图 12.5.3 螺栓孔示意图

【条文说明】螺孔密封圈早期用沥青石棉（芯）类材料塑性防水，以后用橡胶类材料密封圈弹性密封防水，目前大多用遇水膨胀螺孔密封圈，利用压密与膨胀密封双重防水，效果明显，成为主流。在设计施工中应强调外形与沟槽相匹配，以防止尺寸偏小而“陷入”螺孔中或尺寸偏大而难以使螺栓垫圈压平至混凝土面的情况。

12.5.4 注浆孔密封圈应包括注浆管密封圈和注浆管盖密封圈，其外形、尺寸应与注浆管、注浆管盖上预留的凹槽外形相匹配。

12.6 二次衬砌防水

12.6.1 采用复合式衬砌的盾构隧道其内层衬砌的防水等级应高于外层衬砌，两层衬砌之间应设防水层，防水设计中还应重视防水层间的搭接和内层衬砌接缝的止水。

12.6.2 复合式衬砌的混凝土内衬，沿隧道结构纵向，应每隔 10m 左右需设置收缩缝，此内衬伸缩缝必须设置防水带，收缩缝防水应按下列方式设计：

- 1 嵌缝式。于内衬收缩缝内侧设嵌缝槽，选用弹性密封胶嵌填；
- 2 贴附式。将宽度 60~800mm 的橡胶止水带固定于衬砌结构上再浇内衬混凝土。

3 埋入式。将特制橡胶或塑料止水带设在内衬混凝土中间，以适应内衬收缩缝收缩时的防水。

12.7 附属工程防水

12.7.1 在盾构进出工作井的井圈范围内，宜设 1~2 道帘布橡胶圈与压板或气囊组成的井圈临时防水密封装置。

【条文说明】盾构隧道与竖井接头的防水，包括施工阶段的临时接头、运营阶段的永久接头的防水都是技术关键。因为，竖井与隧道在该处接头相对沉降量大，容易发生渗漏，危害不小。盾构隧道与竖井接头在施工阶段用专用帘布橡胶圈密封，它既能使盾构机械壳体通过而不被撕裂，然后又紧裹在管片环外密封防止漏泥沙。

12.7.2 盾构隧道与工作井、横向人行通道间的永久接头防水应采取刚柔结合的措施，满足防水和可能产生的不均匀沉降的要求。

【条文说明】在隧道推进完成后，进出洞口都要浇筑钢筋混凝土洞圈，这时候，隧道与洞圈两者是刚性连接（通过洞口附近的变形缝适应变形），但其接缝则用柔性密封材料密封。

12.7.3 用类矿山法施工的横向人行通道的防水应符合以下规定：

- 1 内衬应采用防水混凝土，其中拱顶应采用预拌自密实混凝土；
- 2 初期支护与二次衬砌间宜设塑料防水板与土工织物组成的夹层防水层，并配合分区注浆系统加强防水；当施作防水层风险很大时，经论证后方可采用内防水层，内防水层可取聚合物水泥砂浆类抗裂防渗材料。

【条文说明】连接通道通常采用矿山法施工，连接通道及其与圆隧道接头防水包括：通道混凝土本体防水；通道夹层防水层及注浆管（如：抗融沉注浆的注浆管）穿过防水层的接口防水；通道与圆隧道接缝等的防水。另外，在不良地层，为规避初次衬砌暴露时间过长带来的施工风险，也有不设夹层防水层而以内防水层（如用喷涂聚合物水泥砂浆）替代的方式，由于内防水层的使用寿命相对较短，故替代方式需要经过综合评审通过，方可实施。

12.7.4 顶管法横向人行通道的防水应符合以下规定：

- 1 顶管钢壳内衬应采用防水混凝土；

2 顶管钢壳之间应设置遇水膨胀材料封闭接缝。

【条文说明】顶管施工中，绝大多数采用钢筋混凝土圆管，其接口形式有平口、企口、F型钢承口与T型双插口接头等四种。其中F型钢承口顶管施工顶进过程中，对高程、中线能起到修正作用，因而此类接口形式也有利于密封防水，适用于大口径顶管，因此，即顶管施工隧道时F型钢承口顶管成为主要施工方式。

12.7.5 工作井基坑应有可靠的防参与止水结构。坑外防渗结构的常用型式有连续搭接的水泥土搅拌桩帷幕、高压喷射注浆帷幕和注浆帷幕等防渗帷幕墙结构。

12.7.6 工作井防水等级宜根据工程的重要性、设计使用要求等按现行国家标准《地下工程防水技术规范》(GB 50108)选用二级或稍高于二级的防水标准，其具体的防水措施，应按照表 12.7.6 的规定选用。

表 12.7.6 工作井地下结构防水措施

工程部位		主体				施工缝				后浇带				变形缝							
防水措施	防水混凝土	防水卷材	防水涂料	塑料防水板	遇水膨胀止水带	中埋式止水带	外贴式止水带	金属板	外涂防水涂料	膨胀混凝土	遇水膨胀止水条	外贴式止水带	防水嵌缝材料	中埋式止水带	外贴式止水带	可卸式止水带	防水嵌缝材料	外贴防水卷材	外涂防水涂料	遇水膨胀止水条	
	防水等级	一级	二级	一级	二级	一级	二级	一级	二级	一级	二级	一级	二级	一级	二级	一级	二级	一级	二级	一级	二级
		应选	应选	应选一至两种	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选
		应选	应选	应选一种	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选	应选

13 盾构选型

13.1 一般规定

13.1.1 盾构选型应按照适用性、可靠性、安全性、先进性、经济性的原则进行，保证盾构施工的安全可靠，选择与地质条件及环境条件相适应的盾构机类型和最佳的盾构施工方法。

【条文说明】盾构是相对复杂的集机械、电力、液压、传感、控制、信息等技术于一体的隧道施工专用工程机械，主要根据隧道几何条件、工程地质、水文地质、地面构筑物及地下管线和构筑物等具体特征进行设计制造。盾构设备不同于常规设备，其核心技术不仅是设备本身的各项机械设计，更在于该设备通过采用各种先进的技术手段以适应拟掘进隧道的各项具体条件，从而顺利完成隧道掘进任务。

不同形式的盾构所适用的范围不同，根据不同的工程地质、水文地质条件和施工环境与工期的要求，选择合理的盾构机类型，对确保施工安全、保证施工质量、保护地下与地面建(构)筑物安全、提高施工效率、加快施工进度等至关重要。因此，盾构选型时应首先考虑设备的适用性、可靠性及安全性，在安全可靠的基础上再考虑技术先进性，经济性排在第三位。盾构选型时盾构施工的关键环节，直接影响盾构隧道的施工安全、施工质量、施工工艺及施工成本。为保证工程建设的顺利完成，对盾构选型工作应高度重视。

13.1.2 盾构选型应以工程地质与水文地质条件为主要依据，综合考虑隧道断面尺寸、隧道长度及埋深、平纵线形、工期、掘进开挖和衬砌形式等主要因素，还应应对沿线地形、地面建筑物、地下构筑物、地下障碍物及管线等环境条件及周围环境对地层变形的控制要求进行详细的调查与分析，对盾构机及其配套设备的适用性、可靠性、先进性和经济性作出评估。

13.1.3 盾构选型应考虑拟选用的盾构机能顺利地特定的岩土层中掘进并有利于维持开挖面的稳定，并兼顾环境、工期、造价等制约因素，同时还应考虑适宜的辅助工法。

【条文说明】盾构设备选择的成功与否直接关系到盾构隧道能否顺利实施。盾构选型时首先需要考虑与工程地质、水文地质等条件的适应性，盾构类型的选择、

刀盘刀具的布置、盾尾密封的选择等都与穿越底层的工程地质、水文地质条件密切相关。除地质、水文条件以外的盾构选型的制约条件还很多，例如设计线路平面竖向曲线形状的制约、环境条件的制约、工期条件的制约等。盾构选型时应以工程地质、水文地质作为主要依据，综合考虑周边环境条件、隧道断面尺寸、隧道长度及埋深、线路条件、沿线地形、地面及地下建构筑物等环境条件，以及周边环境对地面变形的控制要求、工期、环保等因素，同时参考国内外已有盾构工程实例及相关的盾构技术规范、施工规范及标准，对盾构类型及功能、主要技术参数、辅助设备配置等进行研究。

13.1.4 盾构选型应预先对各种不利因素包括盾构分(合)体始发、调头、长距离掘进、小净距段施工、小半径曲线段施工、浅覆土地段施工、复合地层施工、障碍物穿越、不良地质体超前预报与超前处置、含有害气体岩土层、高水压下盾尾密封及刀盘刀具的检修更换以及盾构土(岩)层中对接、盾构工法与其他工法的转换等进行充分考虑，以使其能满足工程需要。

【条文说明】对着公路盾构隧道建设实践经验的积累，在盾构隧道施工中经常遇到长距离掘进、小半径曲线掘进、复合地层施工、近距离穿越桩基或既有基础设施等特殊工况，需要采用盾构分体始发、掉头施工、地中对接等特殊施工技术。本条根据既有盾构施工经验，对常见的各种不利因素进行了归纳汇总。盾构选型时需解决理论的合理性与实际的可能性之间的矛盾，事先对各种不利因素进行分析并努力找寻行之有效的对策方案。

13.1.5 盾构选型应因地制宜，提高机械化程度并减少对环境的影响。在软土或有水压条件下施工的隧道，应选用土压平衡或泥水平衡等封闭式盾构机及其配套设备；若开挖面具有良好的自稳能力并经充分的技术经济论证时，亦可采用敞开式盾构。

【条文说明】公路盾构隧道一般洞径较大，根据目前已有工程实践经验均采用封闭式盾构机。敞开式盾构机近年来虽未有应用，但在地层有一定自稳能力且无地下水时原则上具备采用敞开式盾构的可能性。同封闭式盾构相比，敞开式盾构在前方障碍物处理、掘进速度、工程造价等方面具有一定的优势。采用敞开式盾构时需对开挖面稳定、挖掘及排土、管片安装及同步注浆、盾构推进等环节进行充分论证分析。

13.1.6 在确定盾构机类型后,应根据地质、水文条件及使用要求,确定盾尾间隙、盾体外径、刀盘直径、盾体长度、盾构直径、盾构推力、盾构扭矩、驱动功率及同步注浆系统能力等基本参数,对刀盘结构、刀具、盾体、刀盘驱动、推进装置、泥水循环系统、管片拼装系统等主要功能部位进行选择与设计,并选择与主机匹配的后配套设备。

【条文说明】盾构机选型一般是在对工程地质、水文地质条件、工程环境、工期要求、经济性等充分研究的基础上,对敞开式、闭胸式盾构进行比选。水下盾构法公路隧道由于受水压力影响,一般多采用闭胸式盾构。在确定选用闭胸式盾构后,根据地层的渗透系数、颗粒级配、地下水压、环保要求、辅助施工方法、施工安全等因素对土压平衡盾构和泥水盾构进行比选;在确定盾构基本类型后,在根据详细的地质勘察资料,对盾构的主要功能部件(如刀盘结构形式、开口率、刀具种类与配置等)进行选择与设计,此外根据地质条件要确定盾构的主要技术参数(如盾构机推力、掘进速度、刀盘扭矩等)。最后结合其他制约因素(如设备采购、施工场地、运输条件、动力条件和资金状况等)通过技术经济综合比选确定盾构类型。

13.1.7 盾构选型与盾构设计时,应尽可能地选择与使用有利于盾构掘进及维护检修的新技术、新材料及新工艺。

【条文说明】随着公路盾构隧道实践经验的积累,目前已形成了一大批先进技术,如推拼同步技术、异型盾构技术、新型驱动技术、刀盘刀具快速修复技术和快速出碴技术等。盾构选型与设计制造时,在经充分的技术经济论证后应尽可能地采用这些新技术以使盾构具有更高的地质适应性、更长的使用寿命、更复杂的功能、更简单的操作、更人性化的设计并且更加安全、环保、高效。

13.2 选型原则及依据

13.2.1 盾构选型应综合分析地质和水文地质资料、环境条件及功能要求,选择合适的盾构类型,确保施工过程的安全可靠、地面建筑物的安全、施工进度目标的实现。盾构选型时应主要遵循以下原则:

- 1 应对工程地质、水文地质有较强的适应性,且满足施工安全的要求;
- 2 应满足安全适应性、技术先进性与经济性相统一;
- 3 应能满足隧道外径、长度、埋深、施工场地、周围环境等条件的要求;

4 应能满足安全、质量、工期、造价及环保要求；

5 后配套设备应与主机配套，同时具有施工安全、结构简单、布置合理和易于维护保养的特点。

【条文说明】盾构选型的总的原则是考虑安全适应性排在首位，技术先进性排在第二位，经济性排在第三位。选型时的主要依据如下：①工程地质、水文地质条件；②地面环境、地面和地下建构筑物对地面沉降的敏感性；③隧道长度与埋深、平纵断面形状与尺寸；④隧道施工工程筹划、场地条件及节点工期要求；⑤适宜的辅助工法。盾构选型的原则从上述选型依据来看考虑因素众多且相互联系，因此需在综合比较分析的基础上，探讨分析最适宜的盾构形式的选择。

13.2.2 当无地下水或地下水水压低于 0.1MPa 且地质条件较好，开挖面能维持稳定的自立状态或采取辅助措施后能维持稳定时，可采用敞开式盾构。其适宜的土层以砂、砂砾、粉砂和粘土为主；亦可用于软弱冲积层，但须同时采用压气施工法，或采取降低地下水位、改良地层等辅助措施。

【条文说明】敞开式盾构适用于能自立和较稳定且地下水不丰富的的土层；对不稳定的土层一般要辅以气压或降水，使土层保持稳定，以防止开挖面坍塌。

13.2.3 当地下水位较高或水量较为丰富时，应采用土压平衡或泥水平衡等封闭式盾构，其选用应主要依据地层渗透性、颗粒级配及水压力等条件，并兼顾考虑环保、安全等因素。

1 当地层的渗透系数小于 10^{-7}m/s 时，应选用土压平衡盾构；当渗透系数大于 10^{-4}m/s 时，应选用泥水平衡盾构；当渗透系数在 $10^{-7}\sim 10^{-4}\text{m/s}$ 之间时，宜选用泥水平衡盾构，在进行渣土改良的情况下，可采用土压平衡盾构。

2 当盾构掘进的土层中粉粒和粘粒的总量达到 40%及以上时，可选用土压平衡盾构；当粉粒和粘粒含量的总量不足 40%时，则应选用泥水平衡盾构。

3 盾构需在富水地层中掘进时，若水压力低于 0.3MPa，可采用土压平衡盾构；若水压力大于 0.3MPa，则应采用泥水平衡盾构，如确需采用土压平衡盾构，则需增大螺旋输送机的长度、采用二级螺旋输送机，或采用保压泵。

【条文说明】根据地层渗透系数与盾构类型的关系，若掘进地层主要富水的砂层、砂砾层为主时，宜选用泥水盾构；其他地层宜选用土压平衡盾构。

土压平衡盾构主要适用于粉土、粉质黏土、淤泥质粉土、粉砂层等的施

工，在黏土层中掘进时，由刀盘切削下来的土体进入土仓后由螺旋输送机输出，在螺旋输送机内形成压力梯降，保持土仓压力稳定，使开挖面土层处于稳定。一般来说，当岩土中的粉粒和黏粒的总量达到 0% 以上时，通常宜选用土压平衡盾构，相反的情况选择泥水盾构比较合适。

当水压大于 0.3MPa 时，采用泥水盾构较为适宜。如果采用土压平衡盾构，螺旋输送机难以形成有效的土塞效应，在螺旋输送机闸门处易发生渣土喷涌现象，引起土仓中土压力下降，导致开挖面坍塌。

13.2.4 当受周边环境限制，对盾构掘进引起的地表沉降或周边建(构)筑物变形的控制要求较为严格时，宜采用泥水平衡盾构；在江河湖海等水体下掘进或在密集建(构)筑物下及不均匀地层中施工时，宜优先选用泥水平衡盾构。

【条文说明】盾构选型还需考虑安全、环保等因素。例如对超大直径盾构隧道，根据既有工程实践经验，泥水平衡盾构在保持工作面稳定及控制地面沉降等方面的效果要优于土压平衡盾构，尤其是水下隧道、穿越密集建(构)筑物及复合地层施工时，施工过程的安全性是盾构选型的一个极为重要的因素。对国内 27 座超大直径盾构隧道进行统计发现，有 23 个隧道采用了泥水平衡盾构，这其中包括扬州瘦西湖隧道，其穿越地层为膨胀性黏土，渗透系数极小，按传统理论应选择土压平衡盾构机。但经过扭矩计算、综合论证，认为作为超大直径隧道使用泥水平衡盾构机更合适、更经济。

13.2.5 由于环保要求需及时对盾构掘进渣土进行处理，或由于场地限制无法设置大型泥浆处理场，且地质与水文条件均允许时，可优先选用土压平衡盾构，否则应采用泥水平衡盾构。

【条文说明】泥水盾构需设置规模庞大的泥浆分离及处理系统，一般占地面积约为 10000m²。此外，废弃浆液经过筛分、旋流、沉淀等程序，可以将中的一些粗颗粒分离出来，但泥浆中的悬浮或半悬浮状态的细土颗粒仍不能完全分离出来，而这些物质又不能随意处理，就形成了使用泥水盾构的一大困难。因此对当条件许可时，可考虑采用土压平衡盾构以满足用地及环保要求。

13.2.6 在非单一或非均匀地层中掘进，或在水压变化较为剧烈地段施工时，会出现某一区段适宜采用土压平衡盾构而另一区段适宜采用泥水平衡盾构，此时盾构选型应对各因素综合考虑，并对各种可能的选择方案进行技术经济评价及

风险分析后择其最优者。

【条文说明】盾构施工经常在复杂多变的地层中进行，同一座隧道往往分布有软土、砂层、卵石、岩层、上软下硬复合地层中一种或几种，盾构选型时应综合考虑并对不同选择进行风险分析后确定最优方案。

13.2.7 土压平衡盾构可用于粉土、粘土、砂土、砂砾层等地层中的隧道施工，按稳定掘削面机制的不同可分为削土加压盾构、加水土压盾构、加泥土压盾构，盾构选型时掘削面稳定机制的选定应由土质成分及其颗粒组分决定。

1 盾构在粉砂粘土、细粉砂粘土、含少量砾石的细砂粘土等细粒软土(N 值不超过 15、天然含水率 $\geq 25\%$ 、渗透系数 $K < 5 \times 10^{-2} \text{cm/s}$)等地层中掘进时，可采用削土加压盾构，其依靠面板挡土，利用土舱内的掘削土的被动土压稳定掘削面。

2 盾构在渗透系数较大且粘粒和粉粒成分较少的含水亚粘土层、砂层及砂砾层等地层中掘进时，可采用加水土压盾构，其依靠面板挡土，向土舱内注入加压水以平衡掘削面上的水压，防止地下水涌入。

3 盾构在软弱黏土层、易坍塌的含水砂层及混有卵石层的砂砾层等地层中掘进时，可采用加泥土压盾构，其通过向土舱内注入泥土、泥浆液或高浓度泥浆液等改善土舱内土体的流动性及渗透性。

【条文说明】土压盾构在黏土地层中掘进，通过调节螺旋机排土量使其与开挖土方量大致相等时即可维持掌子面稳定。当土层含砂量超过某一限值时，渣土的流动性变差，土舱内土体因固结被压密，导致渣土难以排送，需向土舱内注入添加剂以改善土体流动性。在砂性土层进行掘进时，由于砂性土流动性差，砂土磨擦力大、渗透系数高、地下水丰富等原因，土舱内压力不易稳定，须进行渣土改良。

13.2.8 在采用土压平衡盾构施工的隧道中，当盾构掘进的地层中沿隧道纵向分布有强度差别较大的复合地层(如硬岩、软岩、硬土、软土等的复合层)或掘削全断面内分布有强度不均匀的复合地层时，应采用复合土压盾构。复合土压盾构按稳定掘削面的方式可分为不加压稳定式、气压稳定式及土压稳定式等，应主要根据地层适应性采用。采用气压稳定式盾构时，应向土舱内添加发泡剂；采用土压稳定式盾构时，应向掘削面及土舱内均注入发泡剂。

1 盾构在硬岩层中掘进，掘削面能自立且地下水较少，或有少量地下涌水但处于可控状态，可采用不加压稳定式盾构。

2 盾构在地下水丰富且地下水压力在 0.1~0.2MPa、掘削面能基本维持稳定的复合地层中掘进，可采用气压稳定式盾构。

3 盾构在地下水丰富且地下水压力大于 0.2MPa、掘削面不能自立的复合地层中掘进时，应采用土压稳定式盾构。

13.2.9 泥水平衡盾构可用于软弱淤泥质粘土层及松散的砂土层、砂砾层、卵石层、岩层及上述各岩土层的复合层等。根据控制开挖面泥浆压力方式的不同，可分为直接控制型及间接控制型两种。

当对盾构掘进引起的地表沉降及建(构)筑物变形的要求较为严格，或对开挖面泥浆压力波动的要求较高时，应优先采用间接控制型泥水盾构。直接控制型泥水盾构开挖仓内的泥水压力波动应控制在 $\pm(2\sim5)\times 10^4\text{Pa}$ ，间接控制型泥水盾构开挖仓内的泥水压力波动应控制在 $\pm(1\sim2)\times 10^4\text{Pa}$ 。

【条文说明】泥水盾构使用送排泥泵通过管道直接进行送排泥，开挖面完全封闭，具有高安全性和良好的施工环境，既不对围岩产生过大的压力也不会受到围岩压力的反压，对周围地基影响较小，一般不需辅助施工。盾构掘进过程中，直接控制型泥水盾构开挖仓内的泥水压力波动较大，变化幅度一般在 $\pm(0.05\sim 0.10)\text{MPa}$ ；间接控制型泥水盾构的气垫调压仓通过压缩空气系统精确地进行控制和调节压力，开挖仓内的压力波动较小，一般为 $\pm(0.01\sim 0.02)\text{MPa}$ ，泥浆管路内的浮动变化将被准确、迅速平衡，减少了外界压力的变化对开挖的稳定造成的影响。

13.3 盾构基本参数

13.3.1 盾尾间隙 δ

盾尾间隙 δ 应包括以下几个部分：理论最小间隙、管片允许拼装误差、盾尾制造误差、盾尾结构变形以及盾尾密封的结构要求等，一般取为 25~40mm，可按式 13.3.1-1 计算。

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6 \quad (13.3.1-1)$$

式中： δ_1 -理论最小盾尾间隙；

δ_2 -管片制作精度和允许拼装误差，一般可取 4~5mm；

δ_3 -盾尾制作误差，应取实际量测值，当无实测值时，可取厂家设计值；

δ_4 -盾尾结构变形，应根据实际最大水土压力计算，当无此值时，可取厂家设计值；

δ_5 -盾尾安装尺寸，应由盾构生产厂家确定；

δ_6 -其他因素，如同步注浆管道及盾尾刷的安装等，可取 5mm。

理论盾尾间隙可根据隧道平曲线半径、盾构开挖直径及盾尾端至至第一环管片前端的距离等确定，可按式 13.3.1-2 计算。

$$\delta_1 = (R_0 - DC_{\max}/2) \left\{ 1 - \cos \left[\arcsin \left(\frac{L}{R_0 - DC_{\max}/2} \right) \right] \right\} \quad (13.3.1-2)$$

式中： R_0 -隧道平曲线半径；

D -盾构开挖直径；

L -盾尾端至至第一环管片前端的距离。

13.3.2 盾体外径

包括盾尾直径 DS_{\min} 及盾体前端直径 DS_{\max} ，可根据管片外径、壳体厚度及盾尾间隙确定，按式 13.3.2 计算。

$$DS_{\min} = DG + 2(\delta + t) \quad (13.3.2-1)$$

$$DS_{\max} = DS_{\min} + 15(\text{mm}) \quad (13.3.2-2)$$

式中： DG -盾构管片外径；

t -盾体尾部钢板厚度；

δ -盾尾间隙。

13.3.3 刀盘开挖直径 DC_{\max}

应满足刀盘外圈防磨板完全磨损后仍能保证正确的开挖直径，可按式 13.3.3-1 计算。

$$DC_{\max} = DS_{\max} + \Delta \quad (13.3.3-1)$$

式中： Δ -刀盘直径余量，在软土地层施工时，可取 0~10 mm；在砂卵石

地层或硬岩地层施工时，可取 30~45mm。

13.3.4 盾体长度 LS

盾体由前盾（切口环）、中盾（支承环）、盾尾三部分组成。盾体长度 LS 可根据地质条件、隧道的平面形状、开挖方式、运转操作、衬砌形式及封顶块的插入方式等因素确定。对大直径盾构（ $D \geq 9m$ ），一般可取为盾构直径的（0.8~1.0）倍左右。

13.3.5 盾构重量 W

由盾壳、刀盘、推进油缸、铰接油缸、管片安装机、人仓、螺旋输送机（泥水盾构为碎石机及送排泥管路）等安装在盾壳内的所有设备重量的总和组成，可按式 13.3.5-1 估算。

$$W = \psi_1 DC_{\max}^2 \quad (13.3.5-1)$$

式中： ψ_1 -盾构重量经验系数。对手掘式盾构或半机械式盾构，可取 $\psi_1 = (25 \sim 40)$ ；对机械式盾构，可取 $\psi_1 = (45 \sim 55)$ ；对泥水盾构，可取 $\psi_1 = (45 \sim 65)$ ；对土压平衡盾构，可取 $\psi_1 = (55 \sim 70)$ 。

13.3.6 盾构推力 F_d

在计算盾构推力时，应将盾构施工全过程中可能遇到的阻力都计算在内，必须考虑的主要阻力有如下七项：

- ① 构推进时的盾壳与周围地层的阻力 F_1 ；
- ② 刀盘面板的推进阻力 F_2 ；
- ③ 管片与盾尾的摩擦力 F_3 ；
- ④ 切口环贯入地层的贯入阻力 F_4 ；
- ⑤ 转向阻力（曲线施工和纠偏） F_5 ；
- ⑥ 牵引后配套拖车的牵引力 F_6 ；
- ⑦ 压力舱(土舱或泥水舱)反力。

盾构推力 F_d 必须大于上述各种推进阻力的总和并留有足够的富余量，一般可取为总阻力的 1.5~2.0 倍。

13.3.7 盾构扭矩 T_d 及驱动功率 P_d

盾构在岩土层中掘进时的扭矩包含切削扭矩、刀盘的旋转阻力矩、刀盘自重形成的轴承扭矩、刀盘轴向荷载形成的轴承扭矩、密封装置摩擦力扭矩、刀盘前表面摩擦扭矩、刀盘圆周面摩擦反力扭矩、刀盘背面摩擦扭矩、刀盘开口槽剪切力扭矩等。盾构扭矩 T_d 必须大于上述各种扭矩的总和并留有足够的富余量，一般可取为述各种扭矩总和的 2.0 倍。

驱动功率 P_d 可根据盾构扭矩 T_d 、传动部件总的机械效率及刀盘转动角速度确定，按式 13.3.7-1 估算。

$$P_d = \psi_3 \times T_d \times \omega / \psi_2 \quad (13.3.7-1)$$

式中： ψ_2 -传动部件总的机械效率；

ψ_3 -功率储备系数，可取为 1.5~2.0；

ω -刀盘转动角速度(脱困时刀盘角速度设计值，如采用变频电机则与变频电机基频有有关)；其余符号意义同前。

13.3.8 同步注浆系统能力 Q_p

同步注浆系统应能及时对盾构管片本后的间隙进行充填，以有效保证盾构隧道施工质量、防止地面沉降与管片上浮。同步注浆系统功率可按式 13.3.8-1 估算。

$$Q_p = 0.25\pi\psi_4 v_d (DC_{\max}^2 - DG^2) / \psi_5 \quad (13.3.8-1)$$

式中： ψ_5 -同步注浆量经验系数，可取 1.4~2.0；

v_d -最大推进速度；

ψ_4 -注浆泵效率；其余符号意义同前。

13.4 刀盘结构

13.4.1 刀盘应具有足够的强度、刚度、整体性及耐磨损性，以支撑开挖面稳定和承受掘进过程中的推力及扭矩。应主要根据地质因素、刀具配置及施工条件等因素选择合适的刀盘，确定合理的刀盘形式及侧面形状、开口及支撑方式。

【条文说明】根据地质施工情况及材料力学性能，确立刀盘的材料、结构形式、开口率等，在特殊情况下需对于常压、带压刀盘进行选取。

13.4.2 刀盘本体在进渣口、刀盘周边和搅拌棒等位置应进行耐磨处理，具体的耐磨要求和措施，应根据施工的地质条件以及工程需要进行针对性设计。

【条文说明】对于磨损位置较为突出的地方需要加强耐磨性，一般根据实际情况选取合适的耐磨焊材。

13.4.3 刀盘结构形式可分为辐条式、面板式及辐条-面板式三类，辐条和面板应满足刀具布置、搅拌桩安装及其他管道的安装。具体应用时，应根据盾构类型、地质条件及刀具配置等因素确定。

1 对砂卵石地层及粘土地层，可选用辐条式刀盘，亦可选用开口率较大的面板式刀盘。当卵石最大粒径超过螺旋输送机或排浆管道的排渣能力时则应谨慎采用。

2 对富水淤泥地层、粉细砂地层，宜选用面板式刀盘。

3 对普通粘土~砾砂地层及复合地层，可选用辐条-面板式刀盘，但应保证刀盘开口可通过的最大渣土粒径小于盾构最大排渣粒径。

4 当只需配置切削型刀具时，可采用辐条式刀盘；当尚需配置滚切类刀具时，则应根据具体地质与施工条件确定选用面板式或辐条-面板式。

【条文说明】根据水土压力、水文地质条件，选取合适的刀盘结构形式，一般水土压力越大，面板的占比相应越大。

13.4.5 刀盘开口应根据地质条件、刀盘结构形式、开挖面的稳定性和挖掘效率等因素决定其形状、尺寸及开口率。对辐条式刀盘，开口率一般可取 60%~70%；对面板式刀盘，开口率一般可取 10%~20%；对辐条-面板式刀盘，开口率一般可取 25%~45%。刀盘开口位置应尽量靠近刀盘中心。对面板式及辐条-面板式刀盘，刀盘开槽形状可根据渣土的流动性选择等宽结构或楔形结构，开槽尺寸应依据地层中砾石最大直径确定。

【条文说明】刀盘的开口率按照土质、开挖面稳定性等因素决定。泥水式盾构一般选用 10%-35%，土压式盾构一般为 30%-70%左右，主要起到综合考量稳压、防堵、排渣等效果。

13.4.6 封闭式盾构常用的侧面形状可分为垂直平面型、凸芯型、穹顶型及倾斜型四种，可根据具体地质及土质条件选用。

1 对以粘土为主的地层，宜采用突芯型刀盘结构，以防止刀盘中心处产生泥土附着或土体烧结形成泥饼。

2 对砂土、卵砾石等不稳定的地层，宜采用垂直平面型或倾斜型刀盘结构，以稳定掘进面。

3 对复合地质和风化岩地层、岩石地层(土体的抗压强度高于 30MPa)，宜采用穹顶型刀盘结构，以方便安装滚刀且使得滚刀垂直于掘削面。

13.4.7 刀盘的支承方式可分为中心支承式、中间支承式和周边支承式三种，应根据地质条件进行选择。对于粒径较大的卵砾石地层，应采用中间支承式或周边支承式；对于细粒为主的土层，宜采用中心支承式。

【条文说明】应根据刀盘直径大小、掘进地质情况来选取刀盘支承方式。中心支撑式主要应用于大口径盾构机巨大砾石与基岩的工程；周边支撑式主要用于中心口径特别是偏心力大、刀盘中心空间较大的工程；中间支承式兼顾中心支撑及周边支撑的结构特点。

13.4.8 用于水下隧道或在富水地层施工的盾构，刀盘设计时应考虑能在常压下更换刮刀或切削刀。

13.5 掘削刀具

13.5.1 盾构掘削刀具及刀具组合应根据地层分布特性和岩石抗压强度合理选择。对于不同地层的掘进施工，应采用不同类型的刀具及刀具组合，实现刀具配置的灵便性。

13.5.2 刀具布置时应根据刀盘不同区域的工作特点、掘进土层的成分及岩石强度，并考虑刀具构造、刀盘构造、盾构推力及掘进效率，确定合理的布刀间距及刀具数量。

13.5.3 同一类型刀具的刀刃工作面应保持在同一个平面，每一开挖轨迹上配置的同类型刀具数量不宜少于 2 把。长距离掘进时，应考虑渣土流动对刀具造成

的二次磨损，设置的可更换刀具应单轨迹覆盖整个开挖面。

13.5.4 掘削刀具可按下列原则选用：

1 盾构在软弱土层中掘进，可只配置切刀、周边刮刀、中心刀等切削类刀具。

2 盾构在砂层、砂卵石及卵砾石层中掘进时，宜设置切刀、周边刮刀、先行刀、鱼尾刀或中心滚刀、仿形刀等刀具；如需在砂卵石层地层中长距离掘进时，应提高刀具耐久性，可选用硬度大、抗剪性好的超硬钢材制作刀刃。

3 盾构在风化岩层及软硬不均的复合地层中掘进时，除配置切削型刀具外，尚应配置盘形滚刀，且滚刀的超前量应大于切刀的超前量。刀盘配置的滚刀刀箱及刀座，应满足盘型滚刀、撕裂刀或齿刀可互换功能。

13.5.5 盾构在岩层中掘进需配置盘形滚刀，应根据岩石强度选择合适的刀圈材质，一般可分为表面耐磨层刀圈、标准钢刀圈、重型钢刀圈和镶齿硬质合金刀圈，滚刀的尺寸亦应岩石硬度来选择。

1 表面耐磨层刀圈：适用于掘进强度不超过为 40MPa 的砂粘土层、强度 80~100MPa 的断裂砾岩、砂岩、凝灰岩等地层。

2 标准钢刀圈：适用于掘进强度 50~150MPa 的砾岩、大理岩、砂岩、灰岩及含卵砾石的地层。

3 重型钢刀圈：适用于掘进 120~250MPa 的硬岩及强度为 80~150MPa 的高磨损岩层，如花岗岩、闪长岩、斑岩、大理岩、蛇纹石及玄武岩等地层。

4 镶齿硬质合金刀圈：适用于掘进强度为 150~250MPa 的花岗岩、玄武岩、斑岩及石英岩等地层。

滚刀刀箱应采取防堵塞设施，滚刀密封应能承受掘削面上的最大水土压力，并具有良好的密封性能和较长的使用寿命。

13.5.6 刀具配置时，应选择若干有代表性的刀具配置磨损检测装置，磨损监测装置应具有充分的耐久性、灵敏度及可靠性。

【条文说明】刀具作为盾构机掘进切削的主要结构，对于结构强度、耐久性、机械性、掘进地层等综合考虑，根据切刀切削机理、滚刀挤压破岩机理（《盾构机设计及计算》中国建筑工业出版社）选取合适的刀具类型，一般较软地质选用切削类刀具，较硬地质选取破岩类刀具；刀具布置应符合开挖面轨迹、刀间距、贯

入度、岩石强度等要求，并满足最大掘进速度需求。

13.6 盾体

13.6.1 盾体由切口环、支撑环及盾尾(即前盾、中盾、后盾)组成，应具有足够的刚度和强度以保证盾构设备的安全性和可靠性。盾体设计应综合考虑地质状况、隧道最大埋深、最大水压、注浆压力、盾体直径及其他施工要求等，盾体结构所使用的材料、尺寸及装备应与工程地质和工作条件相匹配。

13.6.2 为适应曲线掘进、减小盾构推进过程中的地层阻力，盾体宜设计为倒锥形。盾构掘进需穿越对沉降特别敏感的建(构)筑物时，盾体宜预留同步注浆或二次注浆孔。

13.6.3 切口环的形状和尺寸应以掘进地层的地质条件相适应，可根据掘削下来的土砂状态确定。

1 切口环与刀盘的位置关系分为三种：刀盘位于切口环内、刀盘外沿凸出切口环外、刀盘与切口环对齐，应根据开挖土层具体条件选用。

2 切口环的长度应根据盾构机的正面支承及开挖方法，并需考虑切口环内各种设备安装的需要。对泥水平衡盾构，切口环内安装的主要设备有刀盘、搅拌机、进浆口及出浆口、人闸等；对土压平衡盾构，则需考虑刀盘、搅拌机及螺旋输送机等。

13.6.4 支承环的长度可视千斤顶长度而定，一般宜取为一块衬砌环的长度再加上适当余量，且不应小于固定盾构千斤顶所需的长度。

13.6.5 盾尾厚度应综合考虑盾构掘进过程中的其承受的最大水土压力、纠偏及曲线段施工等各种因素，在确保安全、可靠的前提下，宜尽量减小盾构厚度。盾尾长度应根据管片宽度、盾尾密封结构及特殊使用要求等因素综合确定。

13.6.6 在富水砂卵石层地层施工时，盾尾应预留冷冻处理系统或不良地质处理系统。

13.6.7 盾尾密封的结构形式及道数应依据隧道最高水土压力、管片错台、曲线段施工管片偏心等各种不利因素确定，可采用多道、可更换式密封装置，应有至少可更换前 2~3 道密封的设计考虑。

1、密封材料应富有弹性、耐磨、防撕裂等。可采用钢丝束、钢板束、尿烷橡胶或其组合。

2、盾尾密封道数应根据隧道埋深、水位高低确定，一般可取水土压力不大于 0.4MPa 时，盾尾刷不应少于 3 道，大于 0.4MPa 时盾尾刷宜不少于 4 道。

3、盾尾密封宜设置密封状态自动检测及报警装置。

【条文说明】根据国家标准《GB-T34650 全断面隧道掘进机 盾构机安全与要求》、《GB-T 34651 全断面隧道掘进机 土压平衡盾构机》、《GB-T 35019 全断面隧道掘进机泥水平衡盾构机》、《JB-T 13707 全断面隧道掘进机复合式盾构机》要求，盾体的强度和刚度应满足设计要求，盾构外径由管片外径、壁后注浆间隙、盾尾钢壳的厚度决定；盾构长度主要考虑驱动结构、管片宽度、盾尾密封形式、铰接方式等决定；盾尾密封形式及数量要综合考虑水压压力，一般每道钢制盾尾刷密封腔密封压力可达 0.2MPa。

13.7 刀盘驱动

13.7.1 刀盘驱动装置，特别是刀盘密封与主轴承应具有足够的可靠性、耐久性、安全性及使用寿命。

13.7.2 刀盘驱动的转速应连续可调，能够以不同转速适应不同的地质，提高掘进效率。

13.7.3 刀盘驱动主轴承的设计寿命应根据隧道掘进长度及经济评价确定，一般不应小于 10000 h。

13.7.4 主轴承密封应有足够的可靠性及耐久性，应能满足在设计最高水土压力下，保证完成全线隧道掘进的耐久性要求。

13.7.4 刀盘驱动应具有点动功能，在人员进入开挖舱进行检查或更换刀具时可以将刀盘停在方便操作的任意理想位置。

13.7.5 刀盘驱动应具备脱困模式，在出现刀盘被卡的情况下，刀盘驱动应能在短时间内输出较大扭矩，实现脱困的目的。刀盘驱动应具备逆转及回缩功能。

【条文说明】根据国家标准《GB-T34650 全断面隧道掘进机 盾构机安全与要求》、《GB-T 34651 全断面隧道掘进机 土压平衡盾构机》、《GB-T 35019 全断面隧道掘进机 泥水平衡盾构机》、《JB-T 13707 全断面隧道掘进机 复合式盾构机》要求，主驱动具有双向旋转、点动功能，扭矩系数土压盾构不小于 18，泥水盾构不小于 10，复合式不小于 22；主轴承设计寿命不小于 10000h，脱困扭矩不应小于最大工作扭矩的 1.2 倍。

13.8 推进装置

13.8.1 推进系统主要由推进千斤顶、液压油缸、控制阀件和控制阀件组成。推进装置的设计应具有整机推进(所有液压油缸推进)、管片拼装(液压油缸分组动作)等功能,推进力和推进速度应能够根据地质条件和工程需要进行调节,并具有自动和手动控制模式。

13.8.2 盾构机推进千斤顶的台数及各千斤顶的推力大小与盾构机的外径、总推力、管片结构、隧道轴线等因素有关。对大直径盾构,每根千斤顶的推力宜控制在 2000~4000kN。

13.8.3 推进油缸的布置主要考虑管结构形式、宽度、分块方案、管片组装施工便利和 K 块的安装要求等因素,应满足下列要求:

- 1 径向分布使管片受力均匀;
- 2 环向分布与管片的分块相匹配;
- 3 油缸布置应沿隧道垂直轴向、水平轴线均匀对称布置。

13.8.4 推进千斤顶的布置应使盾构圆周受力均匀,其行程为一环衬砌环宽度加上适当余量,安装台数一般应为双数。

13.8.5 推进系统液压油缸应配置行程传感器,对液压油缸应进行分区控制以满足在转弯和爬坡段掘进的需求,各分区通过比较各分区的推进行程差异,判断设备的掘进姿态是否符合设定要求,结合导向系统的数据,及时对推进参数进行调整。

【条文说明】根据国家标准《GB-T 34651 全断面隧道掘进机 土压平衡盾构机》、《GB-T 35019 全断面隧道掘进机 泥水平衡盾构机》、《JB-T 13707 全断面隧道掘进机 复合式盾构机》要求,单位开挖面积最大推力应不小于 1000kN/m²,最大推力 F 为:

$$F=k_1 \times (F_1+F_2+F_3+F_4+F_5)$$

其中 k_1 为安全系数, F_1 为盾体摩擦力, F_2 为尾刷与管片件的摩擦力, F_3 为开挖面的支撑压力, F_4 为后配套拖车的拖拉力, F_5 刀具推力。

13.9 输送排放系统

13.9.1 泥水循环系统的进浆流量和排浆流量可根据切削断面、进浆密度、掘进速度、出浆密度等因素计算，排浆管管径应根据需输送的砾石块径及排除土砂的速度确定。

13.9.2 泥水系统应具备开挖模式、旁通模式、隔离模式、逆洗及补浆模式。当盾构在卵砾石层或岩层中掘进，存在泥浆管堵塞或土舱阻塞的风险时，宜增设反循环模式；当需要停机检修或更换尾刷时，宜增设长时间停机模式。

13.9.3 泥浆泵应能实现流量和压力连续可调，通过连续调节泥浆泵流量及压力以便盾构机适应不同地质情况。

13.9.4 进浆管路与排浆管路均应配有密度和流量检测装置。

13.9.5 土压平衡盾构机螺旋输送机的杆径不应小于可排出砾石最大直径的 1.5 倍；对泥水平衡盾构，排泥管直径不应小于需输送砾石最大长径的 3 倍。

13.9.6 盾构破碎装置应根据需破碎卵砾石的最大粒径、最大强度及排浆管道的输送能力等确定；应具备自动手动控制，破碎动作应具备破碎和摆动两种模式。

13.9.7 破碎装置后面、排浆管进口前方应安装格栅，破碎装置排出的渣土粒度应满足泥浆输送要求，以防止较大粒径的石块进入泥浆管道堵塞管路。

13.9.8 泥水系统应在刀盘中心和排渣口等区域配置冲刷系统，泥浆管路应具有好的延伸功能，并能保证管路延伸过程中掌子面泥水压力的稳定。

【条文说明】 根据国家标准《GB-T 34651 土压平衡盾构机》、《GB-T 35019 泥水平衡盾构机》要求，泥水循环系统、螺旋输送机等应满足最大掘进速度排渣要求，并具备防堵、易于监测、维修等功能。

13.10 管片拼装系统

13.10.1 管片拼装系统安装精度应达到 mm 级，管片拼装机应具备 6 个自由度，以对管片姿态进行调整，保证管片拼装后成型的隧道精度满足工程要求。

13.10.2 管片拼装机行程应允许在隧道内至少更换前两道盾尾刷，夹持装置可采用机械抓起式或真空吸盘式，但均需具有足够的安全系数。

13.10.3 管片拼装机驱动马达应配备制动器，以使管片可以安全停在任何位置而

不在重力作用下而运动。

13.10.4 管片拼装系统应具备无线和有线两种控制方式，各动作应能无级变速，无线遥控距离不应小于 30m。

13.10.5 管片拼装机应具有足够的回转力矩，以使管片间接头止水带能充分闭合。

13.10.6 拼装机具备抓持、平移、回转及定位动作，具备双向周向不小于 200° 旋转。

【条文说明】根据国家标准《GB-T 34651 土压平衡盾构机》、《GB-T 35019 泥水平衡盾构机》要求，管片拼装机周向旋转角度不应小于 200°；机械式抓举装置安全系数不小于 1.5，非机械式抓举装置安全系数不应小于 2.5；静载荷为设计最重管片重量的 1.25 倍，动载荷为 1.1 倍；断电模式下，真空吸盘式保持吸持管片时间不小于 20min，且真空度不低于 80%。

13.11 其他辅助系统

13.11.1 同步注浆系统的注浆能力应能满足最大掘进速度要求且管片壁后间隙填充系数不低于 150%，压力应满足最大水土压力的工作环境要求，宜配备水泥-水玻璃二次注浆系统。

13.11.2 导向测量系统应具备地面控制量测、地下控制量测、盾构控制量测、导向定位等功能，应具备相关测量规范所规定的精度。

13.11.3 盾构可根据实际需要在护盾上预留孔洞进行超前地质预报及超前注浆加固，超前钻机应安装在管片拼装机上。

13.11.4 盾构设计制造时，应考虑设置土舱及气泡舱工作状态、刀具磨损、刀盘磨损、盾尾渗漏等的自动检测装置及可视化监测装置的可能性。

13.11.5 供水系统应满足正常施工要求，宜采用内外循环水冷却方式，内循环水泵采用软水。

13.11.6 气动系统应满足正常施工要求，符合 GB/T 7392 规定，空气压缩机功率不低于最大用气量的 1.5 倍，额定压力不低于 0.8MPa。

【条文说明】根据国家标准《GB-T 34651 全断面隧道掘进机 土压平衡盾构机》、《GB-T 35019 全断面隧道掘进机 泥水平衡盾构机》、《JB-T 13707 全断面隧道掘进机 复合式盾构机》要求规定，同步注浆系统、气动系统、导向系统、供水

系统等需要符合相应规定。

13.12 选型依据及一般程序

13.12.1 盾构选型可按以下步骤进行：

1 在对工程地质、水文地质、周围环境、工期要求、经济性等充分研究的基础上选定盾构的类型，重点应对敞开式、封闭式盾构进行比选。

2 在确定选用封闭式盾构后，应根据地层的渗透系数、颗粒级配、地下水压、环保要求、辅助施工、施工环境、安全等因素对土压平衡盾构和泥水盾构进行比选。

3 根据详细的地质勘探资料确定盾构的主要技术参数，并对盾构主要功能部件进行选择与设计（如刀盘驱动形式、刀盘结构形式、开口率等）。盾构的主要技术参数在选型时应进行详细计算，主要包括刀盘直径、刀盘开口率、刀盘转速等。

4 根据地质条件选择与主要技术参数相匹配的盾构后配套设备

13.12.2 盾构选型的一般程序可分为以下四个阶段：

1 计划调查阶段

根据拟建隧道的周边条件、环境条件、地质条件及水文条件以及拟建线路沿线的地下建构筑物及可能的障碍物情况对设计条件进行整理，形成关于拟建隧道的断面形状及尺寸、隧道长度、覆土厚度、工期等的基本设计条件。

2 初步论证分析阶段

根据前一阶段所获得的相关设计信息，重点从开挖面稳定、地基条件、环境保护、及其他一些条件注入障碍物处理、开挖土渣的处理与搬运、施工场地条件等方面对可能适用的方式进行筛选分析。

3 施工措施论证阶段

针对各种可能的盾构形式，着重从以下几个方面进行分析：开挖面的稳定、地基变形、出发到达部的保护、周围建筑物的保护、长距离施工、急曲线施工障碍物

4 综合评价阶段

对各可能的盾构形式，从安全性、经济性及工期保证程度等方面进行比较论证，选出最适宜拟建工程的盾构形式及操作模式：

5 盾构选型设计阶段

(1) 根据详细的地址勘探资料，对地质各主要功能部件进行选择与设计（如刀盘驱动形式、刀盘结构形式、开口率等），并根据地质条件等确定盾构的主要技术参数。盾构的主要技术参数在选型时应进行详细计算，主要包括刀盘直径、刀盘开口率、刀盘转速等。

(2) 根据地质条件选择与盾构掘进速度相匹配的盾构后配套设备

征求意见稿

14 始发与接收

14.1 一般规定

14.1.1 根据使用功能要求、工程地质条件、水文地质条件及建设场地周边环境等因素综合确定盾构始发与接收总体方案。

【条文说明】盾构始发与接收是盾构施工风险最大的环节之一，施工前应根据专项论证，做好各项应急准备工作。根据盾构隧道施工组织要求，盾构的始发与接收宜在工作井内完成；有特殊要求时经过论证可采用无工作井的在地表始发与接收的盾构隧道施工方法；盾构中、短距离掘进时可设置变向工作井；盾构需要长距离掘进复合地层时，可结合路线总体设计及通风需要设置中间工作井，以辅助盾构换刀检修施工。对于长度大于 9km 的超长隧道，应结合地质条件、盾构机选型等对相向掘进及独头掘进方案进行技术经济比较。

14.1.2 对于在竖井内始发、接收的盾构隧道，根据盾构直径、建设场地周边环境等，始发与接收地段隧道覆盖层厚度的确定应遵循安全、可靠、经济的原则。

【条文说明】对于建设场地空旷、周边环境不敏感等一般建设条件，始发与接收的位置宜选择在隧道顶覆土厚度大于 $0.5D$ 的隧道区段；对于建筑物密集、环境影响敏感等特殊建设条件，预先采用地层加固、地表处置等辅助施工措施后，可适当减小始发与接收处隧道顶覆土厚度。

14.1.3 工作井的建筑设计应兼顾隧道施工及运营阶段的要求，满足下列要求：

1 满足隧道运营阶段隧道建筑限界要求，并宜利用竖井内空间，布置消防楼梯（电梯）及管线、风（烟）道、通风机房、变电所、泵房等隧道附属用房，满足隧道运营阶段车辆通行、通风、防灾救援等功能要求；

2 满足隧道施工阶段设备限界要求，根据盾构设备设计、吊装、拼装、解体、始发及接收的要求合理分隔竖井内部空间，满足隧道施工阶段盾构吊装、拼装、解体、始发及接收的需要。

3 对于兼顾通风、排烟功能的竖井，其设计尚应满足通风分段及防火分区等要求，并符合《建筑设计防火规范》及《公路隧道通风照明设计规范》中的相关规定。

14.1.4 工作井的结构设计应符合隧道施工和运营阶段的空间及作为永久结构受力和耐久性的要求；并应考虑盾构设备吊装、掘进时渣土的运出、衬砌材料的运输等施工荷载对工作井结构强度和刚度要求。

【条文说明】工作井是盾构机及台车下井、管片吊装、隧道内部各种设备的重要通道，结构设计应充分考虑各种荷载的影响，且盾构施工期间工作井内没有内支撑结构，考虑到地下工程的地质的不确定性及其水的问题，工作井结构设计应考虑足够的安全系数，确保始发和接收安全。

14.1.5 结合场地使用情况，盾构始发宜采用整体始发方案，特殊条件下可采用分体始发方案；其中，竖井内整体始发方案的作业空间由始发竖井及后续段组成。

【条文说明】盾构始发流程图如下图所示。分体始发是指盾构机整体始发空间不足的情况下，先将主机或部分台车吊入井内的始发方式，始发过程中应保证液压管路、电缆等管线的正常工作，待盾构机等出洞后，再分次吊装后续台车下井连接。

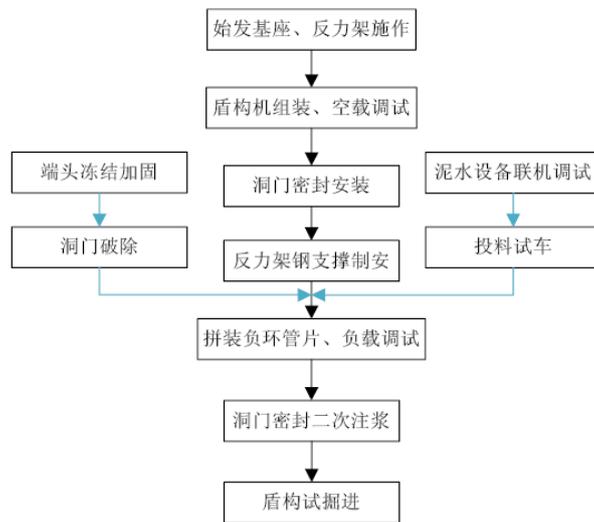


图 14.1.5 始发流程图

14.1.6 结合施工总体方案，盾构接收宜采用竖井内接收方案；特殊条件下可采用土中接收后开挖竖井、无竖井或空推通过钻爆隧道后到达接收竖井的方法。

【条文说明】盾构接收的流程图如下图所示。随着近些年技术的进步，盾构直接出洞、钢套筒接收、水下接收的工程案例越来越多，接收方案的细节研究、工程措施也较多，应根据周围环境、接收井附近岩土体的性质等特点，制订专

项接收方案。

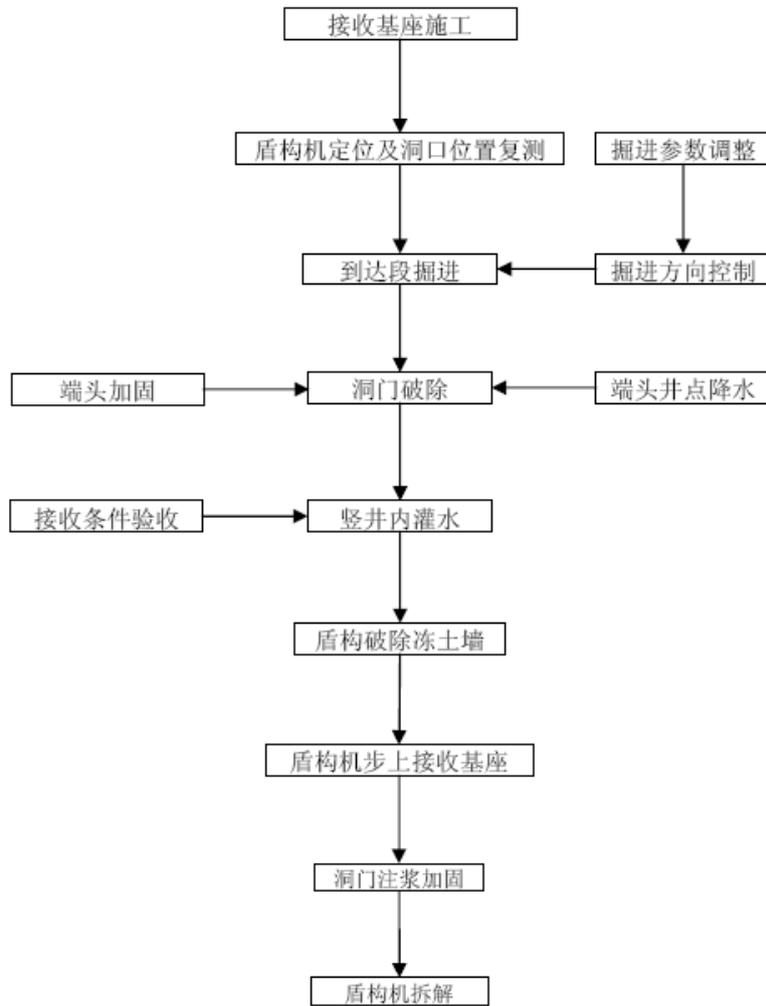


图 14.1.6 接收流程图

14.1.7 盾构始发后续段的围护结构及内部结构设计应符合安全、环保原则，满足盾构机吊装、拼装、解体、始发、接收和正常掘进施工的需要，应充分考虑施工阶段对周边环境的影响。

14.1.8 为确保盾构机始发、接收段的掘进方向和开挖面的稳定，盾构隧道始发与接收附近地段宜根据盾构直径、工程地质、水文地质及周边环境等采取适当的地基加固措施进行处理。

【条文说明】通常采用的地基加固措施包括高压旋喷桩、搅拌桩、SMW 桩、冻结法、降水法或组合加固等，加固施工完成后应检测加固体的强度等指标，确保加固体质量。

14.2 盾构始发

14.2.1 始发井内净空尺寸的确定，应根据盾构设备的直径、长度，并综合考虑盾构覆盖土层厚度、盾构始发方式、工程经济性、预留操作空间、密封装置安装空间、施工误差、作业安全等因素，满足盾构机吊运、组装、始发、到达及检修的施工要求。

1 始发井最小内净长度可按下式计算：

$$L \geq L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + E_1 + E_2$$

L ——始发井长度(m)；

L_1 ——盾构机长度(m)，根据盾构机设计确定，包含盾壳长度及刀盘厚度，一般为 $(0.7 \sim 0.8) D_e$ ，其中 D_e 为盾构直径；

L_2 ——反力支撑座厚度(m)，一般为 $1.0 \sim 1.5$ m；

L_3 ——临时支撑垫宽度(m)，一般为 $0.5 \sim 1.0$ m；

L_4 ——始发导口厚度(m)，一般为 $0.5 \sim 1.0$ m，对于设置内衬的竖井结构，可利用内衬墙作为始发导口；

E_1 、 E_2 ——纵向作业余度(m)，一般为 0.75 m。

2 始发井最小内净宽度可按下式计算：

$$B \geq D + \Delta d + T = D + \Delta d_1 + \Delta d_2 + T$$

B ——始发井宽度(m)；

D ——盾构机的宽度（圆形盾构为外径）(m)；

Δd ——为盾构机拼装预留的水平操作空间(m)，一般根据盾构直径的不同取 $1.0 \sim 2.0$ (m)；

T ——为施工误差 (m)，与工作井围护方式、深度及盾构始发轴线控制的轴线偏差有关，一般为 $0.5 \sim 1.0$ m；

(3) 始发井的最小内净高可按下式计算：

$$H \geq h + \Delta h_1 + \Delta h_2$$

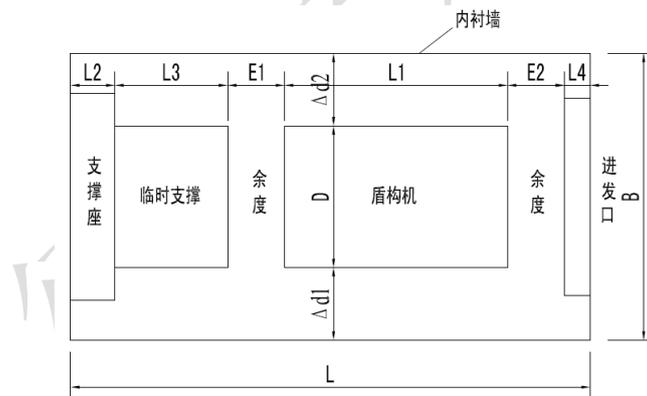
H——始发井内净高(m);

h——始发洞门圈的高度 (m);

Δh_1 ——为盾构机顶部拼装预留的竖向操作空间(m)，结构中板或框架梁应高出始发洞门圈钢环最高点至少 0.5m，以满足顶部始发洞门钢环及始发密封装置的安装；

Δh_2 ——为盾构机底部拼装预留的竖向操作空间(m)，结构底板顶面应低于始发导口最低点至少 0.75m，以满足底部始发洞门钢环及始发密封装置的安装。

【条文说明】盾构始发井尺寸应根据其功能要求综合确定尺寸，但是考虑到近些年盾构直径越来越大，工作井深度较大，开挖风险较大，应在充分利用工作井内部空间、工作井周围地面、后继段顶部非车道层空腔空间，尽量减小工作井的规模，减小施工风险，降低造价。下图 14.2.1-1 为工作井净长度组成示意图和盾构始发井示意图。



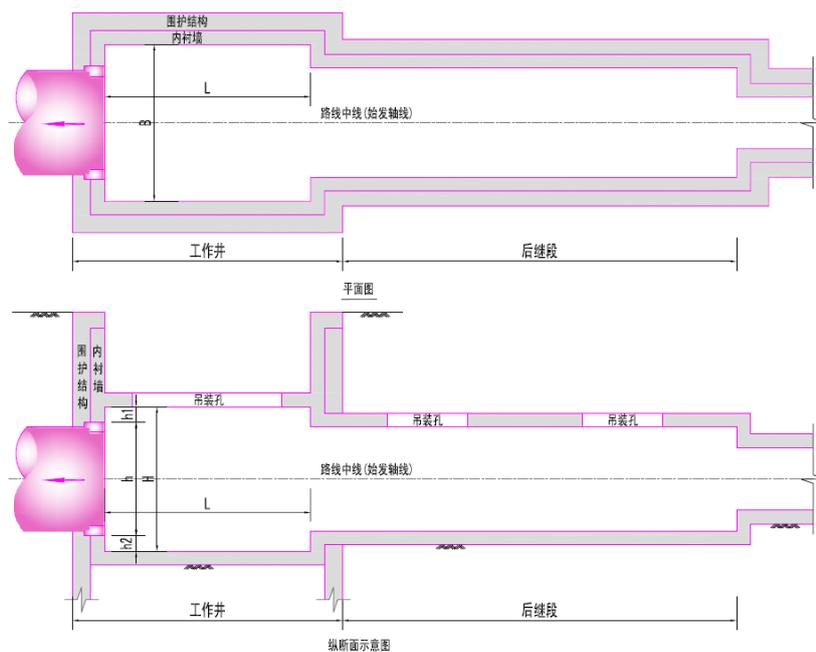


图 14.2.1 盾构始发井示意图

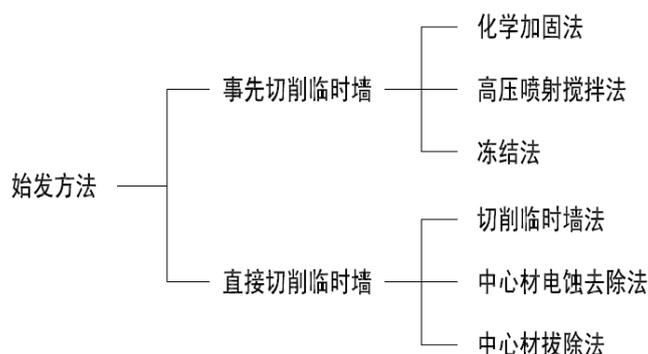
14.2.2 根据拆除临时围护结构和防止掘削面地层坍塌方法的不同，盾构竖井内始发方法可分为事先切削临时墙法和直接切削临时墙法。

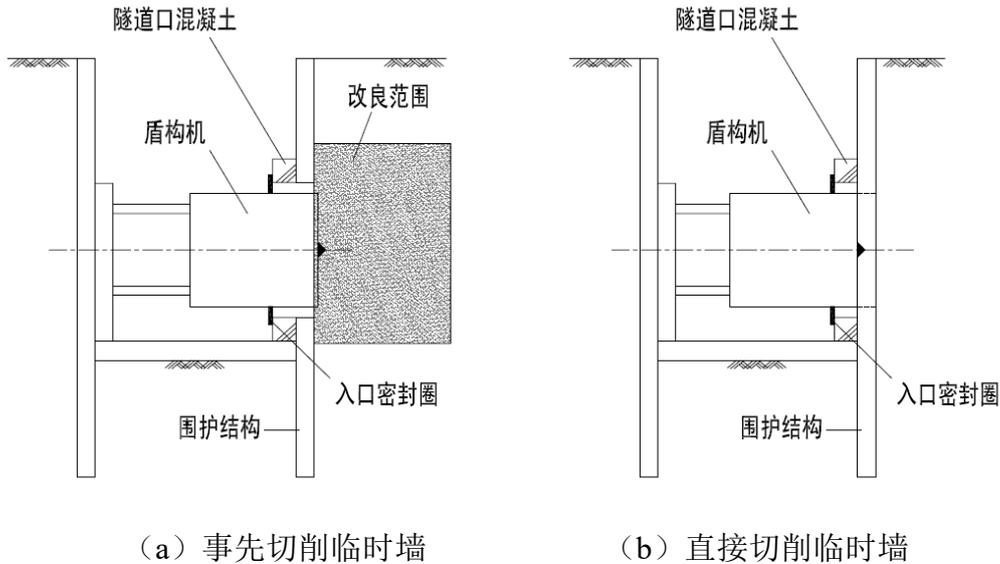
1 事先切削临时墙法适用于始发洞门围护结构为钢筋混凝土结构的条件，可分为化学加固法、高压旋喷加固法、深层搅拌加固法、冻结法等。

2 直接切削临时墙法适用于始发洞门围护结构为玻璃纤维筋混凝土结构及其他特殊材质的条件，可分为切削临时墙法、中心材电蚀去除法、中心材拔除法等。

3 对于采用复合式刀盘的盾构机始发，可优先采用直接切削临时墙法。

【条文说明】盾构竖井内始发方法分类及始发方法见图 14.2.2-1。





14.2.2-1 盾构竖井内始发方法分类及始发方法示意图

14.2.3 盾构始发应根据周边环境合理选择始发场地，始发场地布置宜考虑盾构吊装、组装及掘进出渣、泥水循环等盾构辅助施工场地布置及地基承载力的要求，应满足以下规定：

- 1 始发场地周边应有足够的空间，满足吊装设备安装及作业的平面、净空要求，并满足吊装设备对场地地基承载力的要求，否则需采取必要的地基加固措施；
- 2 吊装设备的基础应有足够的强度、刚度，满足受力及变形要求，其基础宜利用竖井及后继段结构；
- 3 对于曲线段始发的后继段应根据设备后配套设备限界及长度、始发姿态确定其长度及内净空，以满足盾构始发的功能要求；
- 4 泥水盾构泥水循环、泥浆池等应布置在隧道 3D 范围以外。

14.2.4 盾构机始发前的运输与组装应满足下列要求：

- 1 盾构机运输前应制定完善的方案，应根据设备型号、运输路线进行包装式样、机体拆分的选择，并对有可能产生参与应变和发生损伤的部位进行加固或采取其他保护措施；
- 2 现场组装时，应确保设备具备设计要求的规格和性能。

14.2.5 盾构机组装完成后宜进行现场调试，分为空载调试和负载调试：

- 1 盾构机组装完成和连接完毕后，方可进行空载调试，主要调试内容为：液压系统、润滑系统、冷却系统、配电系统、注浆系统，以及各种仪表的校

正，并着重观测刀盘转动和端面跳动是否符合要求；

2 证明盾构机具有工作能力后方可进行负载调试，主要调试内容是检查各种管线及密封的负载能力、各个工作系统和辅助系统能否达到满足正常生产要求的工作状态；

3 负载调试时间宜为试掘进时间；

4 负载调试时应采取严格的技术和管理措施保证工程安全、工程质量和隧道线形。

14.2.6 盾构始发前应根据路线总体设计方案，采用合理的始发姿态，即以设计的中心位置及设计标高为基准，通过调整始发基座的轴线位置及高度，对始发点及始发方向进行必要的修正，确保盾构掘进时的平面和纵面姿态满足要求。

【条文说明】盾构机始发轴线应满足路线总体设计要求，宜选择在路线平面设计为直线段始发。位于曲线上的盾构始发，隧道平面半径不宜小于 2000m，根据盾构设备分段宜采用割线始发。为防止盾构始发时会出现“栽头”现象，宜将盾构机上抬 2~3cm。

14.2.7 始发洞门设计应符合下列要求：

1 开口结构需要有足够的强度和刚度，以抵挡水、土压力。

2 接收井端墙应预留始发洞门，洞门直径宜大于盾构机外径 35~50cm，以满足盾构始发的要求。

3 根据管片安装、施工阶段始发洞门止水装置的密封要求，确定洞门的预留预埋设计的型式及断面尺寸等。

4 在施工始发洞门时，宜在洞门圈内侧设置环向钢板，便于洞门密封装置的拆卸，确保接收时止水可靠。

14.2.8 采用整体始发方案时，盾构始发后续段内净空应满足如下要求：

1 根据盾构设备的分节长度、结构型式、始发姿态、隧道建筑限界综合拟定后续段的内净空断面型式。

2 盾构后继段的布置宜结合明挖暗埋隧道建筑限界、盾构后继台车的设备限界综合确定。

3 盾构后继段的结构设计应满足隧道运营工况、盾构掘进工况的受力需要。

4 为了满足盾构整体始发需要，应在竖井后面预留足够长度和宽度的盾构始发后继段，并根据盾构设备尺寸及组装需要，在后继段内预留吊装孔。

14.2.9 盾构始发段地基处理应根据洞门的结构和拆除方法、尺寸和埋深，并考虑地形地貌、水文地质条件、环境要求和地下管线与地面建筑物的影响因素，选用合理、安全的地基加固处理工法，如旋喷桩、搅拌桩、SMW 桩、冻结法、降水法或组合加固等。

【条文说明】纵向加固长度的初步确定：纵向加固长度应大于盾构主机长度，一般应大于盾构主机长度 2~3m，以确保盾尾进入洞圈并开始注浆后，盾构机刀盘尚未脱离加固区土体，加固区前方地层的水土完全被加固土体及隧道背衬注浆所隔断，不至于产生水土流失而引起地层损失造成地表沉降。

径向加固厚度的初步确定：盾构始发端头径向加固厚度主要起止水 and 稳定地层的作用，考虑径向加固区可以和盾壳共同作用抵抗周围水土压力，根据国内盾构施工经验，径向加固厚度应不小于 3.0m。

加固方法的确定原则：根据工程地质条件、水文地质条件，遵循安全、可靠、经济的原则，按照第 15 章《辅助工程措施》相关要求合理选定， $D > 14\text{m}$ 的盾构始发加固宜采用地层加固与冻结相结合的加固方案。

14.2.10 应对加固体的强度及稳定性进行验算。

【条文说明】可按下述方法对加固体的强度和稳定性进行验算。

将加固土体视为厚度 t 的周边自由支承的弹性圆板，见下图计算模式，对始发加固土体进行强度验算：

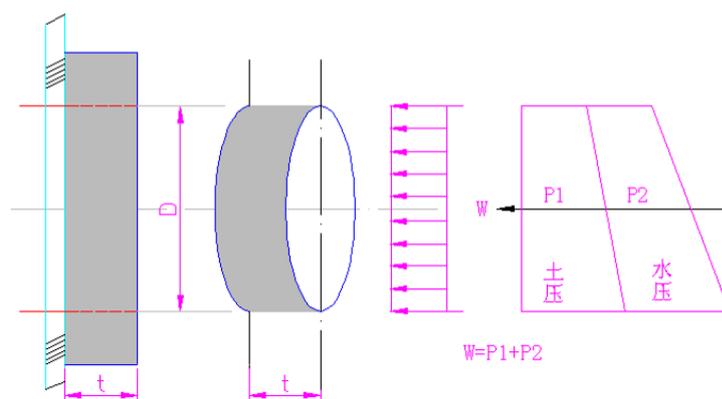


图 14.2.10-1 侧向荷载示意图

1 强度验算

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \pm \beta \frac{\omega r^2}{t^2} < \frac{\sigma_t}{K_1} \\ \beta &= \frac{3}{8} (3 + \mu) \end{aligned} \right\} \text{ 则 } t \geq \sqrt{\frac{3\omega r^2}{8\sigma_t} (3 + \mu)}$$

其中：

r——端墙开洞半径， $r=D/2$ ；

t——加固土体长度（mm）；

ω ——作用于开洞中心处的侧向水土压力，对砂性土，水、土压力分别计算；对粘性土，水土压力合算，土体计算参数按加固前选用；

μ ——加固后土体的泊桑比，一般取 0.2；

K_1 ——安全系数，一般取 1.5；

σ_t ——加固土体的极限抗拉强度，一般取极限抗压强度的 0.1。

2 强度验算：周边自由支承的圆板，其支座处的最大剪力也可按弹性力学原理求得，抗力验算公式为：

$$\tau_{\max} = \frac{3\omega r}{4t} < \frac{\tau_c}{K_2} \quad \text{则 } t \geq \frac{3K_2\omega r}{4\tau_c}$$

K_2 ——抗剪安全系数，一般取 1.5；

τ_c ——加固后土体的极限抗剪强度，一般可取极限抗压强度的 0.6；

3 整体稳定验算：洞外加固土体在上部土体和地面堆载 P 等作用下，可能沿某滑动面向洞内整体滑动，假定滑动面是以端墙开洞外顶点 O 为圆心，开洞直径 D 为半径的圆弧面，见下图，此时引起下滑的力矩为：

$$M_{\text{滑}} = M_1 + M_2 + M_3$$

其中： M_1 ——地面堆载 P 引起的下滑力矩， $M_1 = PD^2/2$ ；

M_2 ——上覆土体自重 Q 上引起的下滑力矩， $M_2 = Q_{\text{上}} D/2$ ；

M_3 ——滑移圆弧线内土体的下滑力矩， $M_3 = r t D^3/3$ ； $r t$ 为加固后土体的重度。

抵抗下滑的力矩为：

$$M_{抗} = M_1 + M_2 + M_3$$

其中： $M_1 =$ 滑移圆弧线 AB 段的抗滑力矩， $M_1 = CUHD$ ；

$M_2 =$ 滑移圆弧线 BC 段的抗滑力矩， $M_2 = CUD^2 (\pi/2 - \theta)$

$M_3 =$ 滑移圆弧线 CD 段的抗滑力矩， $M_3 = CUt \theta D^2$

CU——加固前土体的粘结力；

CUt——加固后土体的粘结力；

$$\theta = \sin^{-1} t/D$$

抗滑侧移安全系数 $K_2 = M_{抗}/M_{滑} \geq 1.5$

则：

$$t \geq D \sin \left(\frac{1.5M - \frac{\pi}{2} C_u D^2}{C_{ut} D^2 - C_u D^2} \right)$$

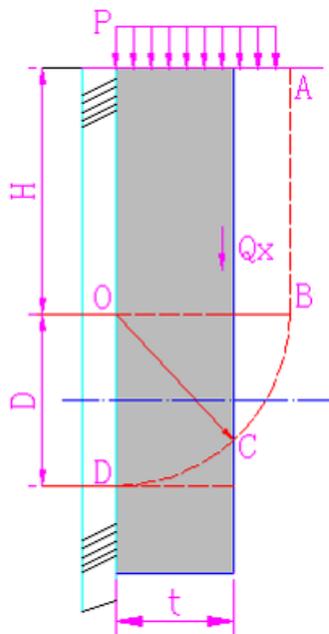


图 14.2.10-2 掌子面压力计算模型

14.2.11 盾构始发洞门凿除时应确保洞门结构安全，宜分段、分区、分层凿除；洞门结构采用玻璃纤维钢筋混凝土时可用盾构机直接切削始发，且设置玻璃纤维筋的区域应大于洞门圈至少 50cm。

14.2.12 盾构始发基座必须有足够的强度、刚度和安装精度，以满足盾构设备放置、安装和掘进的要求。

【条文说明】盾构直径 $D > 14\text{m}$ 时宜采用钢筋混凝土始发基座， $D \leq 14\text{m}$ 时可采用钢结构始发基座。始发基座应根据盾构机刀盘厚度、切口环、支撑环及盾尾等的长度合理分段设置，以便于盾构机的组装。始发基座断面形式应与盾构机外径匹配，其顶面宜设计为圆弧状。

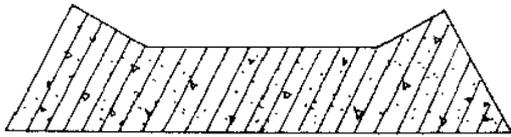


图 14.2.12-1 钢筋混凝土基座

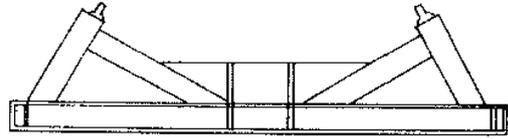


图 14.2.12-2 钢结构基座

14.2.13 反力架为盾构尾部的推进油缸提供后座反力，反力架端面为后盾管片提供基准面，平整度满足管片拼装要求，刚度和强度必须满足盾构始发推力要求。

【条文说明】盾构直径 $D > 14\text{m}$ 时宜采用钢筋混凝土反力架， $D \leq 14\text{m}$ 时可采用钢结构始发基座。反力架后靠应有明确的传力路径，宜利用工作井内衬墙作为其后靠，特殊情况下可在反力架后设置斜撑。在盾构机主体被移至始发井前，利用空间测量出反力架安装的位置并在其安装位置标识。反力架左右偏差应控制在 $\pm 5\text{mm}$ 之内，高程偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 之内，上下偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 之内。始发台水平轴线的垂直方向与反力架的夹角 $< \pm 2\%$ ，盾构姿态与设计轴线竖直趋势偏差 $< 2\%$ ，水平趋势偏差 $< \pm 3\%$ 。

14.2.14 负环管片宜尽量采用隧道正常掘进安装的管片，并根据盾构机、工作井尺寸及始发要求合理布置负环管片及预埋件。

【条文说明】负环管片总长度不得小于盾构机长度，井内始发时最少负环管片环数可按下式确定：

$$N = (D1S - DF + A) / WS$$

N ——负环管片环数；

$D1S$ ——设计第一环管片起始里程；

DF ——洞口围护结构在完成第一次凿除后的里程；

A ——盾构机长度；

WS——管片环宽。

靠近反力架的最端部一环负环管片宜采用钢管片。负环管片定位时，管片环面应与始发轴线垂直。负环管片与反力架的连接应安全、可靠，可采用环向均匀分布的钢管。环向连接钢管内宜采用混凝土填充密实，确保具有足够的强度、刚度。

14.2.15 盾构始发时应采用可靠的洞门止水装置，确保始发时洞门密封止水要求。

【条文说明】洞门密封装置可分为压板式和折叶式，由橡胶止水帘布、扇形压板、翻板、垫片、加劲板和螺栓等组成。始发时宜在橡胶帘布外侧涂抹一层油脂，防止盾构进入洞门时刀盘损坏橡胶帘布。橡胶止水帘布、扇形压板、翻板的安装应与管片环向端面平行，且垂直于始发轴线。始发洞门密封装置的橡胶止水帘布应设置在压板、折叶的内侧。始发洞门折叶式密封装置示例如下图所示。

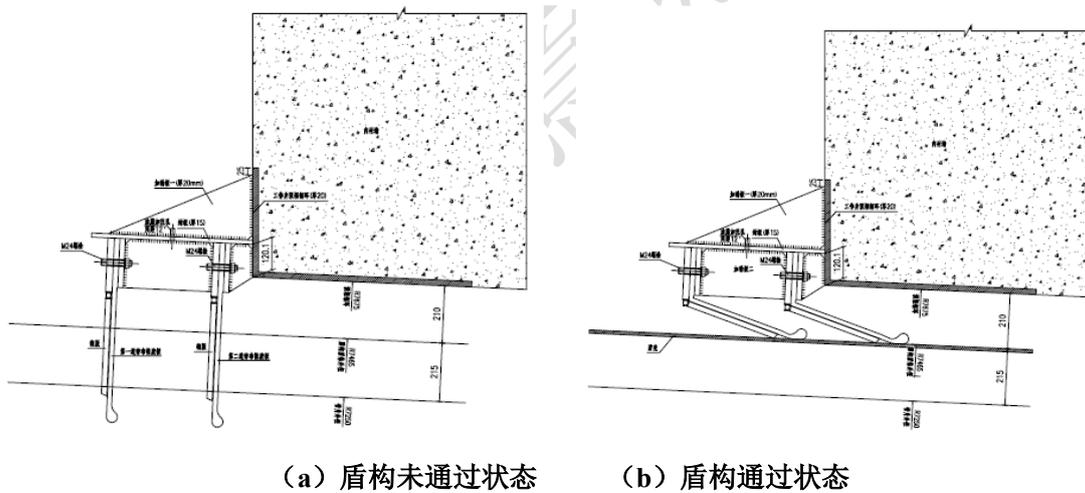


图 14.2.15 始发洞门折叶式密封装置示例

14.2.16 始发洞门结构必须有足够的强度、刚度，宜采用钢筋混凝土结构，并应对其进行耐久性设计。

【条文说明】根据工程地质、水文地质及盾构直径，应优先采用拆除负环管片后再浇筑的洞门结构。洞门结构应采用防水混凝土，厚度不宜小于 500mm。洞门应与竖井及管片结构连接牢靠，并在接缝设置不少于 2 道防水措施。

14.2.17 始发后继段结构设计应符合下列要求：

1 结构设计应具有足够的强度、刚度，分别满足始发施工和隧道运营阶段的受力要求。

2 运营期结构布置应尽量利用始发施工阶段的既有结构，以减小拆除量，方便施工、节省造价。

3 结构应满足耐久性设计。

14.2.18 根据始发时盾构机的姿态，分阶段采用可靠的洞门封堵措施。

【条文说明】盾尾最后一道盾尾密封刷尚未完全进入洞门密封装置前，应在密封装置与与盾壳、盾壳与内衬墙间的空腔内注入油脂，确保洞门密封。盾尾最后一道盾尾密封刷完全进入洞门密封装置后，宜采用密封钢板将翻板及管片外侧预埋钢板焊接，形成二次封堵，并在盾尾刷与管片间的建筑间隙里注入油脂。盾尾完全进入洞体后，应调整洞口密封，并采用具有早期强度的浆液进行洞口注浆。

14.2.19 反力架、负环管片的拆除应符合下列要求：

1 反力架、负环管片的拆除时间根据背衬注浆的砂浆性能参数和盾构的始发掘进推力决定。

2 为保证洞口的管片不受到反力架、负环管片拆除的影响，宜在拆除负环管片前先对洞口的管片进行拉紧固定，拉紧的数量依实际情况而定。

14.3 盾构接收

14.3.1 接收井净空尺寸拟定要根据盾构机的直径、长度、需要同时拼装的盾构机数目以及工期要求而定。盾构接收工作井除应考虑盾构接收、解体或整体移位的要求外，还应考虑人孔、通风孔、阀箱等设施的设置需求，满足盾构机拆卸、吊出的施工要求，其净空尺寸要求可比始发井小。

1 接收井最小内净长度可按下式计算：

$$L \geq L_1 + E_1 + E_2$$

L ——接收井长度(m)；

L_1 ——盾构机长度(m)，根据盾构机设计确定，包含盾壳长度及刀盘厚度，一般为 $(0.7 \sim 0.8) D_e$ ，其中 D_e 为盾构直径；

E_1 、 E_2 ——纵向作业余度(m)，一般为 0.75m。

2 接收井最小内净宽度可按下式计算：

$$B \geq D + \Delta d + T = D + \Delta d_1 + \Delta d_2 + T$$

B——接收井宽度(m)；

D——盾构机的宽度（圆形盾构为外径）(m)；

Δd ——为盾构机拼装预留的水平操作空间(m)，一般根据盾构直径的不同取1.0~2.0 (m)；

T——为施工误差 (m)，与工作井围护方式及深度有关，一般为0.3~0.5m；

3 接收井的最小内净高可按下式计算：

$$H \geq h + \Delta h_1 + \Delta h_2$$

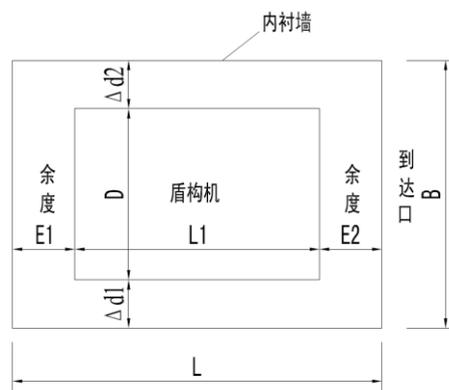
H——接收井内净高(m)；

h——接收洞门圈的高度 (m)；

Δh_1 ——为盾构机顶部拼装预留的竖向操作空间(m)，结构中板或框架梁应高出接收洞门圈钢环最高点至少0.5m，以满足顶部接收洞门钢环及接收密封装置的安装；

Δh_2 ——为盾构机底部拼装预留的竖向操作空间(m)，结构底板顶面应低于接收洞门圈钢环最低点至少0.75m，以满足底部接收洞门钢环及接收密封装置的安装。

【条文说明】下图1为接收工作井净长度组成示意图，图2为盾构接收井示意图。



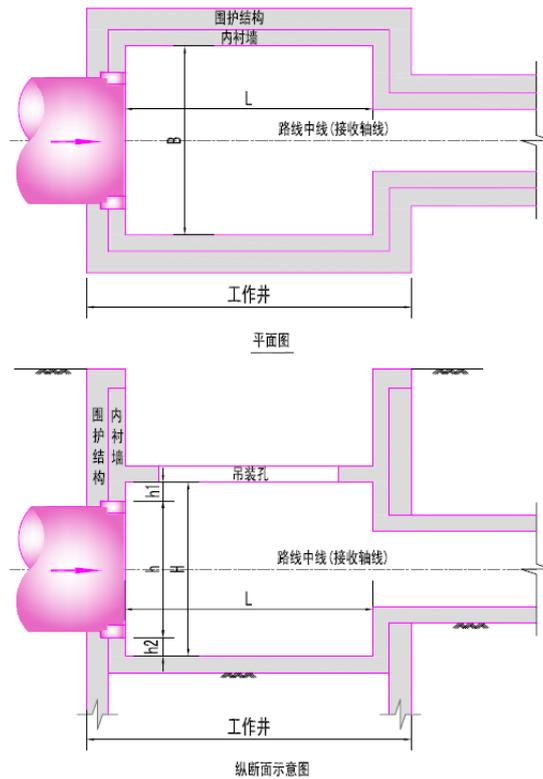


图 14.3.1 盾构接收井示意图

14.3.2 中间井在前进方向的内净尺寸应满足始发井、接收井的相关要求。当需要在井内旋转盾构机时，中间井的长度宜大于盾构机对角线的长度与余度之和，余度不宜小于 1m。

【条文说明】中间井为满足盾构在井内中转要求的工作井。过长的盾构隧道可能在线路中部设置通风井，此时中间井主要满足盾构机通过需求。某些工程受制于外部条件约束，采用一台盾构机掘进、掉头再掘进回来的方式施工，该中间井需满足盾构机掉头需求。盾构掉头井示意图如下图所示：

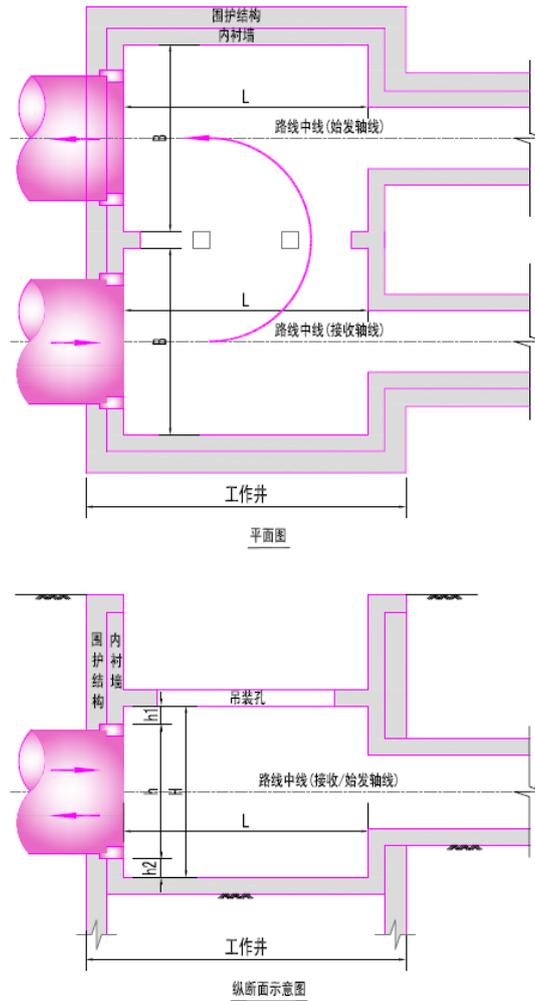


图 14.3.2 盾构掉头井示意图

14.3.3 根据盾构接收位置可分为竖井内接收解体、地中对接解体、接收井内掉头二次始发等。

【条文说明】长隧道宜采用竖井内接收解体；盾构中、短距离掘进时可采用接收井内掉头二次始发；对于长度大于 9km 的超长隧道，宜采用地中对接解体。

14.3.4 根据接收竖井内接收装置的不同，盾构接收工法可分为直接接收法、水中接收法、设置接收室法及套筒接收法。

【条文说明】直接接收法宜适用于盾构直径 $D \leq 14\text{m}$ 或地下水较少的情况；水中接收法适用于盾构直径 $D > 14\text{m}$ 且地下水丰富的情况；特殊情况，如无法正常接收的条件下，可采用设置接收室法或套筒接收法。

14.3.5 接收洞门设计应符合下列要求：

- 1 开口结构需要有足够的强度和刚度，以抵挡水、土压力。
- 2 接收井端墙应预留接收洞门，洞门直径宜大于盾构机外径 35~50cm，以

满足盾构接收的要求。

3 根据管片安装、施工阶段接收洞门止水装置的密封要求，确定洞门的预留预埋设计的型式及断面尺寸等。

4 在施工接收洞门时，宜在洞门圈内侧设置环向钢板，便于洞门密封装置的拆卸，确保接收时止水可靠。

14.3.6 在盾构推进至盾构接收施工范围时，应对盾构机的位置和盾构隧道的测量控制点进行准确的测量，并对盾构接收井的洞门进行复核测量，根据路线总体设计要求及接收洞口预留预埋情况确定盾构机的贯通姿态及掘进纠偏计划，优化施工参数，确保盾构机准确进入接收洞口。

【条文说明】盾构接收施工范围内，应严格控制掘进参数：1) 盾构机贯通时的盾构中心与隧道设计高程的偏差控制在-10mm，平面偏差控制在±20mm 之内；2) 尽可能减少切口水压波动，一般实际的泥水压力要小于设计值，并根据监测信息，作及时调整；3) 严格控制主要掘进参数，如总推力、推进速度、排泥量，减少泥水压力波动，采用低速均匀掘进，避免对土体产生大的扰动，加强泥浆管理和出土量监控，防止超挖和欠挖；4) 加强壁后同步注浆控制，控制好浅覆土段的同步注浆压力和注浆量。

14.3.7 盾构接收段地基处理应根据洞门的结构和拆除方法、尺寸和埋深，并考虑地形地貌、水文地质条件、环境要求和对地下管线与地面建筑物的影响因素，选用合理、安全的地基加固处理工法，如旋喷桩、搅拌桩、SMW 桩、冻结法、降水法或组合加固等。地基处理应符合下列要求：

1 纵向加固长度的初步确定：纵向加固长度应大于盾构主机长度，一般应大于盾构主机长度 2~3m，以确保刀盘进入洞圈后，盾尾也进入加固区土体，加固区后方地层的水土完全被加固土体及隧道背衬注浆所隔断，不至于产生水土流失而引起地层损失造成地表沉降。

2 径向加固厚度的初步确定：径向加固厚度的确定同盾构始发。

3 加固方法的确定原则：根据工程地质条件、水文地质条件，遵循安全、可靠、经济的原则，按照第 15 章《辅助工程措施》相关要求合理选定， $D > 14\text{m}$ 的盾构接收加固宜采用地层加固与冻结相结合的加固方案。

4 接收端头加固体应进行强度、抗力及稳定性验算。

14.3.8 盾构接收洞门凿除时应确保洞门结构安全，宜分段、分区、分层凿除；洞门结构采用玻璃纤维筋混凝土时可用盾构机直接切削接收，且设置玻璃纤维筋的区域应大于洞门圈至少 50cm。

【条文说明】洞门凿除前须保证工作井周围环境的稳定，如采用了地基加固、降水、冻结、高压旋喷加固等措施，应在检验合格后，并辅助专项计算，说明洞门凿除满足安全要求后，才可进行洞门凿除工作。

14.3.9 盾构接收时应采用可靠的洞门止水装置，接收时洞门密封止水需满足下列要求：

- 1 洞门密封装置可分为压板式和折叶式，由橡胶止水帘布、扇形压板、翻板、垫片、加劲板和螺栓等组成。
- 2 接收时宜在橡胶帘布外侧涂抹一层油脂，防止盾构进入洞门时刀盘损坏橡胶帘布。
- 3 橡胶止水帘布、扇形压板、翻板的安装应与管片环向端面平行，且垂直于接收轴线。
- 4 接收洞门密封装置的橡胶止水帘布应设置在压板、折叶的内侧。

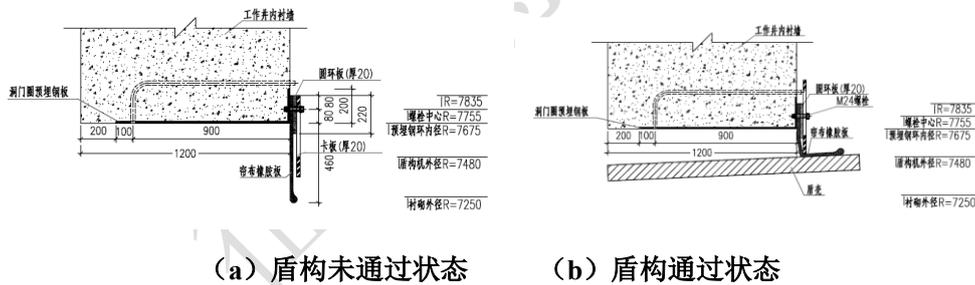


图 14.3.9-1 接收洞门压板式密封装置示例

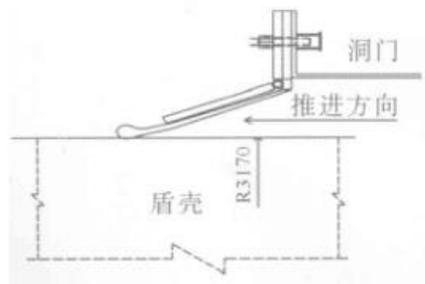


图 14.3.9-2 接收洞门折页式密封装置示例

14.3.10 盾构接收基座必须有足够的强度、刚度和安装精度，以满足盾构设备掘进、解体及吊装的要求。

【条文说明】盾构直径 $D > 14\text{m}$ 时宜采用钢筋混凝土始发基座， $D \leq 14\text{m}$ 时可采用钢结构始发基座。接收基座应根据盾构机刀盘厚度、切口环、支撑环及盾尾等的长度合理分段设置，以便于盾构的解体。接收基座的断面设计形式应与盾构机外径匹配，其顶面宜设计为圆弧状，并应采取可靠的措施，确保接收阶段管片拼装有足够的反力支撑。当水中接收法时，接收基座可采用素混凝土结构。

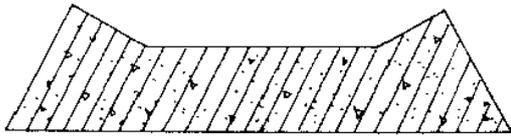


图 14.3.10-1 钢筋混凝土基座

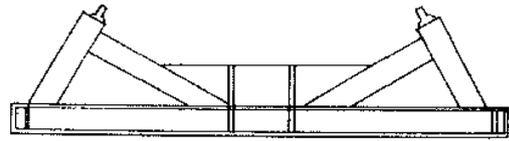


图 14.3.10-2 钢结构基座

14.3.11 接收洞门结构必须有足够的强度、刚度，宜采用钢筋混凝土结构，并应对其进行耐久性设计。

【条文说明】根据工程地质、水文地质及盾构直径，应优先采用拆除洞门环管片后再浇筑的洞门结构。洞门结构应采用防水混凝土，厚度不宜小于 500mm 。洞门应与竖井及管片结构连接牢靠，并在接缝设置不少于 2 道防水措施。

14.3.12 根据接收时盾构机的姿态，分阶段采用可靠的洞门封堵措施。

1 盾尾最后一道盾尾密封刷尚未完全脱出洞门密封装置前，应在密封装置与与盾壳、盾壳与内衬墙间、盾尾刷与管片间的空腔内注入油脂，确保洞门密封。

2 盾尾最后一道盾尾密封刷完全脱出洞门密封装置后，宜采用密封钢板将翻板及管片外侧预埋钢板焊接，形成二次封堵。

3 盾尾完全脱出洞体后，应调整洞口密封，并采用具有早期强度的浆液进行洞口注浆。

14.3.13 盾构接收时应对洞口管片采取拉紧措施，常采用钢板或预应力螺栓等措施。拼装完最后一环管片，千斤顶不要立即回收，及时将洞口段数环管片纵向临时拉紧成整体。

【条文说明】由于洞口段管片在工作井侧约束不强，洞口段管片常产生不好避免松弛现象。近几年常采用洞口焊接钢板、预应力螺栓等方式加强进出口段管片纵向拉紧措施。钢板连接方案主要是在管片内侧设置预埋钢板，通过连接钢板或型钢与预埋钢板焊接，从而起到将隧道进出洞段管片拉紧的目的。预应力

螺栓连接方案是通过预留在管片的螺栓孔，将螺杆穿过管片，通过前一环预留的螺口固定，再通过液压千斤顶对螺杆施加预应力，目的也是将隧道进出洞段管片拉紧。

14.3.14 水中接收时应满足下列要求：

- 1 工作井内的水位应满足确保接收时内外压力平衡，确保洞门结构安全。
- 2 应根据盾构机进入工作井内的长度，控制井内液位，防止盾构机上浮。

【条文说明】水中接收常辅助降水、地基加固、冻结等措施保障接收过程安全，目的是确保隧道与洞圈的间隙加固良好，杜绝渗漏通道。施工过程中需对盾构姿态、隧道变形、出土状况、冻结参数等重要参数实时采集、统计、分析，掌握各工序的施工状况及质量。

14.3.15 接收套筒设计应满足下列要求：

- 1 接收套筒应有足够的强度、刚度和安装精度以满足盾构设备接收的要求。
- 2 接收套筒宜采用钢结构，便于组装及拆除。
- 3 接收套筒直径宜大于盾构机外径 35~50cm。

【条文说明】接收套筒应保证其刚度、强度及稳定性要求，使用前对其整圆度进行检查。钢套筒多分块组成，各组成块之间须加橡胶垫，避免出现漏浆泄压。钢套筒由钢板焊接而成，使用前须全面检查钢套筒各个焊缝。严格控制洞门注浆密封质量，需要同孔间隔式多次注浆，使得浆液能够逐步填充盾构间隙。

14.3.16 相向掘进对接施工作为一种特殊的接收方式，可分为机械对接和土木对接，其适用条件如下：

- 1 当地质条件极差、地下水丰富时，宜采用机械对接技术。
- 2 当地质条件较好、且地下水位较低时，可采用土木对接技术。
- 3 采用土木对接技术时，应根据地质条件采取适当的地层加固措施，确保施工安全。

【条文说明】机械对接和土木对接示意图如图所示。对接前应充分做好地质分析，特别是地层加固和止水。加强对对接区域的加固注浆，对注浆效果反复检验。拆机施工过程中应加强动火、运输的管理。整个对接施工过程应加强对盾构管片的保护，对接施工完成后及时做好修补和堵漏工作。

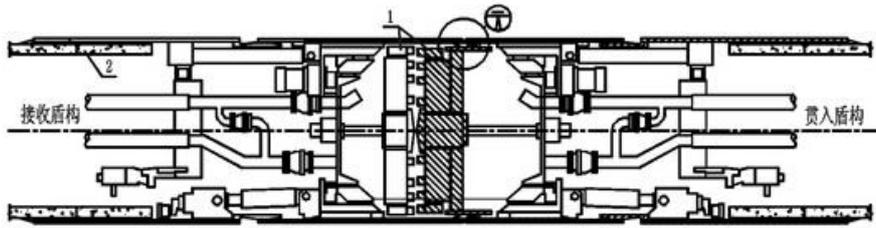


图 14.3.16-1 机械对接示意图

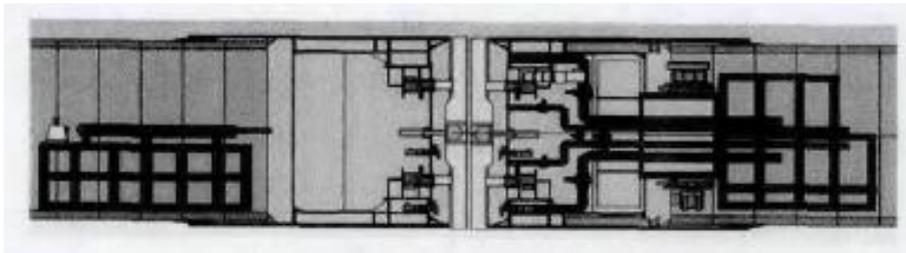


图 14.3.16-2 土木对接示意图

14.4 井内建筑

14.4.1 井内建筑布置不仅应满足盾构施工要求，还应结合隧道运营期全线总体功能规划对行车道、疏散通道、通风设施、设备用房等进行合理布设。

14.4.2 井内平面布局应结合使用功能、防火防灾、安全疏散等因素布置，力求简洁、实用、功能分区明确，并满足以下要求：

- 1 应优先满足行车道的布置，可结合 5.4 节隧道横断面尺寸设置。
- 2 行车道以外的使用区域应做防火分区划分，各个防火分区应有可靠的防火分隔，每个防火分区的安全出口不宜少于 2 个。
- 3 设备用房建筑面积不应超过 1500m²。

14.4.3 井内运营期分层宜结合使用功能确定，行车道层净高应满足隧道洞内标准横断面要求，使车辆经过工作井时行车道天面视觉上衔接顺畅，井内其他层净高不宜低于 3m。

14.4.4 井内疏散通道可采用疏散楼梯、疏散电梯、人行疏散横通道等形式，其尺寸应满足 17 章要求，宜尽量结合施工期的结构构件设置。

14.4.5 井内使用区域应结合通风要求合理布置风（烟）道、通风机房，可和出地面风井联合设置。

14.4.6 井内预留孔洞应满足供配电、排水、检修等需要。

14.5 盾构井结构

14.5.1 确定盾构井结构方案前，应综合井底深度、临近地表环境、工程地质条件、地下水位等因素选定其实施方案，可选明挖法、沉井法。

1 地表沉降要求严格时可采用明挖法，但井深超过 60m 时，宜有经济性比选论证。

2 地下水位埋藏较深，地表空旷且沉降要求宽松时，可采用沉井法；

14.5.2 盾构井采用明挖法时，应结合建设条件选择合理的基坑支护结构形式，包括围护墙结构、支撑与围檩结构，支护结构设计应满足以下要求：

1 结合基坑规模、环境条件等级、地质条件等级、当地经验拟定合理的基坑支护结构安全等级，参照《公路水下隧道设计规范》执行。

2 应对基坑进行稳定性验算，内容包括：整体稳定性、坑底抗隆起稳定性、抗倾覆稳定性、抗水平滑动稳定性、抗渗流稳定性、抗承压水稳定性。

14.5.3 采用地下连续墙作为明挖盾构井的围护墙时，其设计应满足以下要求：

1 应对围护墙的承载能力极限状态进行计算，宜对其正常使用极限状态进行验算，当环境作用等级较低时，裂缝控制宽度可按 0.3mm。

2 地下连续墙竖向主筋净距不得少于 75mm，并应为钢筋笼吊装缆索、支撑围檩及主体结构的预留锚筋预留充分的间隙。

3 应结合地质情况及当地施工水平选用合理可靠的地下连续墙接头形式。

4 地下连续墙顶部应设置圈梁，其宽度应大于墙的厚度，墙顶嵌入圈梁的深度不宜小于 50mm。

14.5.4 明挖盾构井内部结构宜采用现浇钢筋混凝土框架结构，宜将围护墙作为主体结构侧墙的一部分与内衬墙共同受力，墙体的结合方式根据使用、受力及防水等要求，可选用叠合墙或复合墙。

14.5.5 盾构井采用沉井方案时，宜采用圆形沉井，当采用矩形沉井时，长宽比宜小于 3。井内结构布置在满足工艺和使用要求的前提下，应遵循受力明确、施工方便、安全可靠、经济合理的原则，并宜对称布置，以便沉井能平稳下沉。

14.5.6 宜根据工程地质、地下水水位、沉井高度，确定井下沉时井内挖土及降水方案，明确井底封底方式，提出下沉助沉措施。

1 为初步拟定井壁厚度，使井能平稳下沉至设计标高并便于封底，应选择适当的下沉系数，可按 14.5.3 式估算。

$$k_{st}=(G_k-F_{fw,k})/F_{fk} \quad (14.5.3)$$

式中 k_{st} ——沉井下沉系数，宜取 1.05~1.25，沉井位于淤泥、淤泥质土时下沉系数不小于 1.05。

G_k ——沉井自重标准值(包括外加助沉重量的标准值)(kN)；

$F_{fw,k}$ ——下沉过程中水浮力标准值(kN)；

F_{fk} ——井壁总摩阻力标准值(kN)。

2 当下沉系数较大时 (≥ 1.5 时)，或在下沉过程中遇有特别软弱土层时，应要求施工单位进行下沉稳定验算，以防止突沉或下沉标高难以控制，下沉稳定系数可取 0.8~0.9。

3 按可能出现的最高水位分封底阶段和使用阶段进行抗浮验算。

14.5.7 沉井井壁厚度应满足下沉要求、各阶段稳定性要求、各阶段强度和刚度要求、使用阶段抗渗要求。

14.5.8 盾构出洞面可采用玻璃纤维钢筋混凝土，应做承载能力及变形验算，计算时满足以下假定：

- 1 截面应变保持平面；
- 2 混凝土不考虑抗拉强度；
- 3 玻璃纤维筋不考虑抗压强度；
- 4 混凝土和玻璃纤维筋粘结良好。

14.5.9 宜采用空间结构模型对盾构井主体结构进行计算，初步设计时，可采用平面模型进行粗算。

14.6 盾构井地层加固

14.6.1 当盾构井地层不能满足盾构始发和接收对防水、防坍塌等的安全要求时，应采取加固措施，并应符合下列要求：

1 加固方案应根据工程水文地质条件、盾构类型、盾构外径、地表环境等条件合理选用，加固方法可选用注浆、旋喷桩、搅拌桩、玻璃纤维桩、冻结法、降水法等。

2 盾构始发、接收加固范围宜为外包 3m。

3 当洞口处于砂性土或有承压水地层时，应有可靠的降水、堵水等防止涌水、涌砂措施。

14.6.2 当盾构井坑底土质为淤泥质软土、粘土等软弱土层时，宜对坑底进行加固，加固型式应满足基坑抗隆起、抗渗流的需要，应降低地下水位变化对结构沉降的影响，可采用裙边+抽条、裙边、满堂等形式。

14.6.3 对于加固深度超过 20m，或土层内有孤石的地层宜采用旋喷桩加固。

14.6.4 对于特殊地层，如流砂地层、扰动砂性土层，可采用冻结法对进出洞面土体做加固处理。

【条文说明】冻结法设计应包括以下内容：冻土帷幕结构方案比较与选择；冻土帷幕的承载力和变形验算（I 类冻土帷幕除外）；冻结孔布置设计；冻结帷幕形成验算；冻结制冷系统设计；对冻土帷幕的监测与保护要求；冻土壁后填充注浆与融沉注浆设计；可能对周围环境和建（构）筑物产生影响的分析；对周围环境和建（构）筑物的影响监测与保护要求。

15 附属工程设计

15.1 一般规定

15.1.1 盾构隧道的附属工程主要包括：横通道、防淹门、路面、口子件（或其它结构形式）、集水坑及泵房。

【条文说明】横通道、防淹门、路面、口子件（或其它结构形式）、集水坑及泵房等附属工程是公路隧道的重要组成部分，良好的设计方案及处理措施可提高隧道使用年限，降低隧道运营维护费用，保障隧道使用安全。

15.1.2 附属工程设计应做好与主体工程及交通工程等相关专业的协调工作。

【条文说明】附属工程中横通道属于重要结构物，设计年限应与主体结构保持一致，且由于其受力复杂，设计及施工应更加注重风险分析和控制。其他附属工程一般设计和使用年限相对较短，维修较频繁，方便施工与维修非常重要。同时由于附属工程一般处于隧道洞口及洞内表面，整洁、美观直接影响到对工程的总体评价，因此需重视其美观效果。

15.1.3 在确保主体结构安全和功效的条件下应充分发挥附属工程的作用（疏散、逃生及救援、防排水、抗灾等功能）。

15.1.4 附属工程设计应满足精细化、多用途化的要求。应重视内部空间的充分利用及功能分区等。

15.1.5 可采用预制口型构件结合现浇行车道板的结构型式或滑模现浇结构型式，实现盾构掘进、管片安装及行车道板等内部结构同步施工的要求，缩短施工工期、提高施工期的抗浮安全性、降低施工风险等。

15.1.6 防淹防护门的设置宜按施工期间和运营期间分别设置，确保施工及运营时间的安全。

15.1.7 集水坑和泵房的设计应通过水量计算并留一定的富裕量，以确保营运安全。

【条文说明】集水池和泵房结构设计应按现行《泵站设计规范》（GB/T 50265）及其他规定，并结合水下隧道主体建筑、结构设计要求进行。水池结构验算考虑池内集水的静水压力及水泵荷载等因素。

15.2 内部结构

15.2.1 盾构的内部结构设计主要包括：行车道板、路面、烟道板、泵房、疏散滑梯、救援楼梯、防撞侧墙等。其中与盾构施工工期直接相关的行车道板。

【条文说明】盾构隧道的内部设计需综合考虑盾构直径、建筑限界、通风及紧急疏散、机电设备等各功能和设备的空间要求，并对其有限的空间进行合理分配；同时需进一步考虑盾构隧道施工的总体规划，从而选择合理的横断面布置、结构设计及施工方法。

15.2.2 混凝土保护层最小厚度应根据环境条件、耐久性及防火要求等进行确定，并满足相应规范要求。

15.2.3 结构受力计算应按荷载代表值的最不利组合进行承载能力极限状态和正常使用极限状态的计算、校核。

【条文说明】内部结构作用于衬砌环上的荷载随隧道的使用目的而异。车辆荷载、内部支护作用、隧道内的悬挂荷载等会对衬砌的强度和变形产生影响的内部荷载，应根据实际情况设定荷载进行计算。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，管片上需要设置锚固设施，一般根据实际设定荷载进行设计。

15.2.4 路面结构等不易维修或不便于维修的结构应适当提高其使用寿命或提出保养措施。

【条文说明】路面结构设计可参考《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》JTG 3370.1-2018 的相关规定。

15.2.5 内部车道结构宜优先考虑在防水能力、力学性能、工程造价等方面具有优势的现浇结构。烟道板宜采用便于施工、质量控制及在运行期冲淤荷载下受力状态较好的预制结构。

15.3 横通道

15.3.1 盾构隧道人行横通道设置间距可取 200m，并不得大于 300m。

【条文说明】公路隧道一旦发生灾害事故，逃生人员较多，逃生时间较长，为避免次生灾害事故发生，要求设置人行横通道等。国内外近年来长大盾构隧道的横通道间距普遍采用 250~300m，设计过程中应很根据人员逃生需要确定，不必

强求一致。

15.3.2 横通道宜与逃生楼梯、逃生通道等相连接，以利于紧急情况下人员疏散。

【条文说明】横通道逃生救援方式可视作服务通道逃生救援方式的一种简化。火灾发生时，两隧道应及时封闭禁止通行，疏散人员由横向通道进入另一行车隧道。横通道疏散效率高、速度快，而且通风较顺畅。与服务通道相比，横通道的造价低，但在火灾发生时对相邻隧道通行有较大影响。

15.3.3 横通道宜尽量设置在围岩较好地段。

【条文说明】盾构隧道横通道一般采用冻结或全断面注浆作为辅助施工工法，应加强辅助措施设计，防止施工期间突水涌泥事故的发生。

15.3.4 横通道应设置一定的纵坡，宜为 0.5%~5%，以利于排水，当纵坡大于 15%时，宜设置踏步台阶，边墙两侧宜设置扶手，设置扶手后人行横通道净宽应满足规范的规定。

15.3.5 横通道衬砌应具有完善的防排水措施，路面应干燥并具有防滑功能。

15.3.6 横通道两端洞口应设置甲级防火门，防火门应具有双向推开和自动关闭功能。

15.3.7 横通道内的照明装置应设置为与防火门联动开闭，其路面亮度不小于 $1\text{cd}/\text{m}^2$ 。

【条文说明】横通道照明是为人员疏散逃生及救援提供必要的环境亮度。

15.3.8 横通道内应设置疏散指示标志，间距应不大于 20m。

15.3.9 横通道与隧道主洞连接处的结构应进行加强设计。

15.4 防淹防护门

15.4.1 防淹防护门的设置宜按施工期间和运营期间分别设置：施工期间宜多设置临时性的防淹防护门（如两端洞口各一处、掌子面附近 1 处等）；运营期间主要考虑在洞口附近设置永久性的防淹防护门。

【条文说明】隧道出入口区域范围防洪标准低于隧道防洪设计标准，以及隧道在特殊情况下水中段结构损毁后可能导致河水淹没隧道出入口城镇或村庄时，应在隧道洞口设置防淹门。长度在 1000m 以下的中短隧道可不设防淹门。

15.4.2 防淹防护门应具有自动和手动两种控制模式。

【条文说明】防淹门的控制系统需要满足开启方便、可靠等功能要求，防淹门一般要求关闭速度较快，其开启机构需要结合使用功能设计。

15.4.3 防淹防护门应具有耐腐蚀、抗最大水头压力、封闭性好等性能。

【条文说明】考虑到防淹门造价较高，更换较为困难，因此其设计使用年限不宜低于 50 年。

15.5 集水坑及泵房

15.5.1 隧道排水设计宜按地下水和营运清洗污水、消防污水分开排放的原则进行，设置完善的纵横向排水沟管，排水系统宜具有方便的维修疏通设施。

【条文说明】排水系统设计一般需要兼顾环保、可持续发展要求。隧道施工所产生的围岩地下水一般情况下是洁净的，而运营过程中的清洗水和消防水则为污水。为避免地下水被污染，分离排放有利于节能环保。

15.5.2 隧道内排水沟管过水断面应根据水力计算确定。排水沟管应设置沉沙井、检查井，并铺设盖板，其位置、结构构造应考虑便于检查、维修和疏通。

【条文说明】过水断面面积根据管沟充满度或超高计算，雨水管道和污水管道应按满流考虑，明沟超高不宜小于 0.3m，不应小于 0.2m。

15.5.3 寒区隧道内应根据实际情况设置防寒环向、纵向盲沟，洞外应设暗沟、保温出水口等排水设施，使隧道内外形成一个通畅、便于维修的防寒排水系统。

15.5.4 隧道涌水量估算。

15.5.5 排水管 and 排水沟的水力计算。

【条文说明】排水管（沟）水力计算采用通用的曼宁公式。排水管渠的流速应综合考虑排水管渠的坡度、粗糙系数及排水管直径等确定，参考《室外排水设计规范》（GB 50014）相关条文进行计算。

15.5.6 集水坑及泵房的集水和排水计算。

15.5.7 集水坑及泵房的结构计算。

【条文说明】集水池和泵房结构设计应按现行《泵站设计规范》（GB/T 50265）及其他规定，并结合水下隧道主体建筑、结构设计要求进行。水池结构验算考虑池内集水的静水压力及水泵荷载等因素。

16 辅助工程措施

16.1 一般规定

16.1.1 辅助施工是为了保证施工安全而采用的临时支护或临时加固措施,可不考虑其支护能力对结构永久安全的影响。如需考虑其永久作用时,应进行专门分析研究后确定。

16.1.2 盾构隧道常用辅助施工措施作用分类。

表 16.1.2 常用辅助施工措施的作用

同步注浆	地层加固措施	防止和减少地层沉陷,限制管片位移和变形
二次注浆	地层加固措施	对同步注浆的薄弱点进行补强
搅拌桩	地层加固措施	盾构进出洞、加固周边敏感建筑
	地层支护措施	基坑
旋喷桩	地层加固措施	盾构进出洞、加固周边敏感建筑
	地层支护措施	修建联络通道
冻结法	地层加固措施	盾构进出洞、更换盾尾刷
	地层支护措施	修建联络通道、基坑

16.1.3 辅助施工措施应与隧道主体支护结构的设计、施工密切配合,在施工过程中应加强监控量测与信息反馈,以便及时调整辅助施工方法或设计参数。

16.2 同步注浆

16.2.1 盾构掘进过程中需同步进行壁后注浆,防止和减少地层沉陷,保证地层压力较为均匀的径向作用于管片,限制管片位移和变形,提高结构的稳定性并,加强隧道防水。

16.2.2 盾构隧道同步注浆设计宜按照如下程序进行:

- 1 查明场地的工程地质特性和水文地质条件。
- 2 根据初步确定的注浆方案进行注浆试验。
- 3 根据注浆试验确定各项注浆参数和技术措施。
- 4 在施工期间进行观测,根据观测情况对原设计进行必要的优化、调整。

16.2.3 盾构隧道同步注浆设计宜包含如下内容:

- 1 注浆材料:包括浆液种类和浆液配方。
- 2 注浆量:总的注浆浆液数量
- 3 注浆压力:规定不同地区不同深度的允许最大注浆压力

4 注浆速率：规定不同工况下注浆速度的快慢

16.2.4 盾构隧道同步注浆材料应通过试验设计配合比，满足胶凝时间、强度、稠度、泌水率等指标要求。

16.2.5 盾构隧道同步注浆材料类型可根据地层条件、水文条件及类似工程经验相应的选择单液惰性浆、单液硬性浆或双液浆，并确定其指标要求。

【条文说明】由于地层和施工条件的不同,对注浆材料的要求也有很大差别,目前应用较为广泛的浆液有:双液砂浆注浆、单液惰性浆液、单液硬(活)性浆液等。

惰性浆组成成分包括:熟石灰、粉煤灰、砂、膨润土、水及外加剂,具有流动性及填充性能较好,成本较低的特点,但惰性浆凝结时间长、强度低。硬性浆组成成分包括:水泥、粉煤灰、砂、膨润土、水及减水剂,具有早期及后期强度较高、不易被地下水稀释、抗渗性好的特点,但惰性浆易堵管,填充性能不佳。

16.2.6 地面保护要求不高的地段或较坚硬并有一定自稳能力的土层或岩层,可考虑采用单液注浆。

16.2.7 盾构隧道穿越地层变化较大时,宜采用双液浆作为同步注浆材料,在施工过程中及时调整 A 液、B 液的比例以适应不同的地层条件。

16.2.7 盾构隧道穿越敏感建构筑物时,宜采用单液硬性浆或双液浆,确保浆液早期强度(28d)不低于 0.5MPa,并满足控制敏感建构筑物变形的要求。

16.2.8 盾构隧道穿越富水地层时,宜采用用凝结时间较短的双液浆,防止浆液被地下水稀释。

16.2.9 大直径盾构隧道穿越江河海,且覆土较浅时,宜采用高性能大比重单液浆,确保隧道抗浮稳定性,浆液的基本性能指标宜满足表 16.2.9 要求。

表 16.2.9 浆液基本性能指标

项目	标准
密度	$\geq 1.85\text{g/cm}^3$
塌落度(新拌)	12~14cm
塌落度(20h)	$\geq 5\text{cm}$
屈服强度(20h)	800Pa
泌水量	$< 5\text{mL}$
抗压强度(28d)	$\geq 0.5\text{MPa}$
抗压强度(90d)	$\geq 1.0\text{MPa}$

16.2.10 采用泥水平衡盾构施工时,同步注浆浆液宜采用单液硬性浆或双液浆。

16.2.11 盾构隧道同步注浆量的确定是以盾尾建筑空隙量为基础并结合地层、线路及掘进方式等考虑适当的注浆系数，以保证达到充填密实的目的。注浆系数主要由注浆压密系数、土质系数、施工消耗系数、超挖系数等决定。

注浆量一般按下式计算

$$Q=V\lambda$$

式中：

Q —理论注浆量

V —盾尾间隙， $V=\pi(D^2-d^2)L/4$ （其中 D 为刀盘外径， d 为管片外径， L 为管片长度）

λ —注浆系数，一般取 1.3~1.8，在掘进过程中可做适当调整。

16.2.12 盾构隧道同步注浆压力应在综合考虑地质条件、管片强度、设备性能、浆液特性和开挖面土舱或泥水压力的基础上来确定，一般在 0.2~0.4MPa，现场要求注浆压力 \geq 切口水压，注浆压力过大会导致击穿盾尾、爆管。

16.2.13 盾构隧道同步注浆速率由掘进速度来决定，注浆速度按下列公式计算：

$$v = Q/t$$

式中：

v 为注入速度 (m^3/s)

Q 为每环注入量(m^3)

t 为每行程推进时间(s)

16.3 二次注浆

16.3.1 管片脱出后配套台车前应进行壁后注浆密实度检测，脱出台车后应结合充填密实情况进行二次注浆充填。

【条文说明】通过管片预留的注浆孔进行二次补注浆，补充同步注浆未填充部分和体积减少部分，从而减少盾构机通过后土体的后期沉降，减轻隧道的防水压力，提高止水效果。

16.3.2 盾构隧道哪些区域需进行二次注浆可通过以下方法判断：

- 1 根据管片后漏水情况以及地面沉降情况，判断是否进行二次注浆
- 2 根据同步注浆的记录进行分析，及时做出注浆压力，注浆量，时间曲线，分析注浆速度与掘进速度的关系，评价同步注浆效果，判断是否需要二次注浆。
- 3 采用无损探测（超声波检测、探地雷达检测）检测同步注浆的注浆效果，判断是否需要二次注浆。

16.3.3 盾构隧道二次补充注浆浆液宜采用单液硬性浆或双液浆，其选用原则是：充填性好、和易性好、离析少、强度高、浆液硬化后体积收缩少、不被地下水稀释。

16.4 水泥土搅拌桩法

16.4.1 盾构隧道进行基坑坑底加固，形成支挡结构，保持盾构稳定掘进，保证盾构顺利始发接收，形成防渗止水帷幕，防止敏感建筑变形，且地质情况为淤泥、淤泥质土、粉土、素填土、黏性土、饱和黄土以及无流动地下水的饱和松散砂土等宜采用水泥搅拌桩工法。

16.4.2 深层搅拌的加固深度一般取决于施工机械的功率，路上施工可达 27m（施工机械能力为 30m），而在海上的有效加固深度为 21.8m（含水深和软土层厚度）

16.4.3 对于盾构隧道拟采用水泥土搅拌法，除了常规的工程地质勘察要求外，尚应查明：

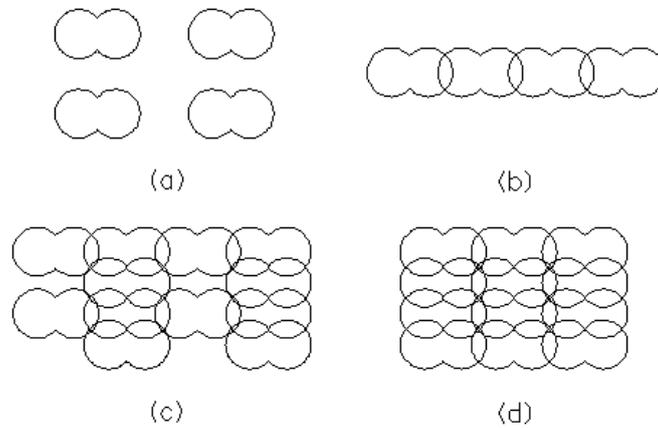
- 1 填土层的厚度和组成，特别是大块物质的尺寸和含量，必须清除大块石等障碍物后再予以施工。

- 2 土的含水量：当水泥土配比相同时，其强度随土样的天然含水量的降低而增大。当土的含水量在 50%~80%之前变化时，含水量每降低 10%，水泥土强度可提高 30%。

- 3 有机质含量：有机质含量较高会阻碍水泥水化反应，影响水泥土的强度增长。故对有机质含量较高的明、暗滨填土及吹填土应予以慎重考虑。对生活垃圾填土不应采用水泥土搅拌法加固。

16.4.4 搅拌桩的加固形式有：柱状加固、壁状加固、格栅状加固和块状加固等不同形式如图所示。

- 1 柱状加固一般应用于房屋基础加固、地坪加固、路基加固等。
- 2 壁状和格栅加固可作为深基坑开挖时的挡土结构。
- 3 块状加固一般用于坑底加固，防止坑底隆起和阻断地下水的渗流。



(a) 柱状加固 (b) 壁状加固 (c) 格栅加固 (d) 块状加固

图 16.4.4 搅拌桩加固形式示意图

16.5 高压旋喷搅拌法

16.5.1 盾构隧道需要对相邻构筑物地基补强或者地下埋设物的保护、对旧有构筑物地基或桩基础的补强,对盾构始末段加固,宜采用高压旋喷桩工法。其特点为:提高抗剪强度;降低土体的可压缩性;改善透水特性;改善动力特性。

16.5.2 旋喷桩适用于下列土质加固:砂性土 ($N < 15$)、黏性土 ($N < 10$)、填土(不含或者含少量砾石)。对下列土质条件需慎重考虑:坚硬土层 ($N > 50$ 的砂性土以及 $N > 10$ 的黏性土)、人工填土(建筑时间短的人工填土,尤其是堆积松散,含块石、见中大裂隙)、砂砾层(含有卵石)。

16.5.3 水平旋喷桩的直径大小跟地层密实度关系密切,因此喷射参数需要随着地层的变化进行调整,以保证桩体前后均匀。通常应根据估计直径来选用喷射注浆的种类和旋喷方式。对于大型或重要的工程,估计直径应在现场通过试验确定。一般条件下,单管法的桩径可按下列公式确定,也可参考表初步确定,定喷和摆喷的有效长度约为旋喷桩直径的 1.0~1.6 倍。

黏性土 $D = 0.5 \sim 0.005N^2$

砂性土 $D = 0.001(350 + 10N - N^2)$ $5 \leq N < 15$

表 16.5.3 旋喷桩的设计直径 (m)

方法 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 为标准贯入击数。

16.5.4 高压旋喷桩的浆量计算可采用体积法或者喷量法。应取其计算结果较大者作为设计喷射浆量。

1 体积法：

$$Q = \frac{\pi}{4} D_e^2 k_1 h_1 (1 + \beta) + \frac{\pi}{4} D_0^2 k_2 h_2$$

式中 Q —— 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(0.75~0.9)；

h_1 —— 旋喷长度 (m)；

k_2 —— 未旋喷范围土的填充率(0.5~0.75)；

h_2 —— 未旋喷长度 (m)；

β —— 损失系数(0.1~ 0.2)。

2 喷量法。

以单位时间喷射的浆量及喷射持续时间，计算出浆量，计算公式为：

$$Q = \frac{H}{V} q(1 + \beta)$$

式中 Q —— 浆量 (m^3)；

V —— 提升速度 (m / min)；

H —— 喷射长度 (m)；

q —单位时间喷浆量 (m^3 / min);

β —损失系数 (0.1~0.2)。

根据计算所需的喷浆量和设计的水灰比,即可确定水泥的使用数量。

16.5.5 根据注浆目的地的不同,注浆材料可采用普通型、速凝早强型、高强型或抗渗型等,宜按以下原则选用:

1 普通型一般采用 325 号或 425 号硅酸盐水泥浆,不加任何外加剂,水灰比为 1:1~1.5:1,无特殊要求的工程宜采用普通型。

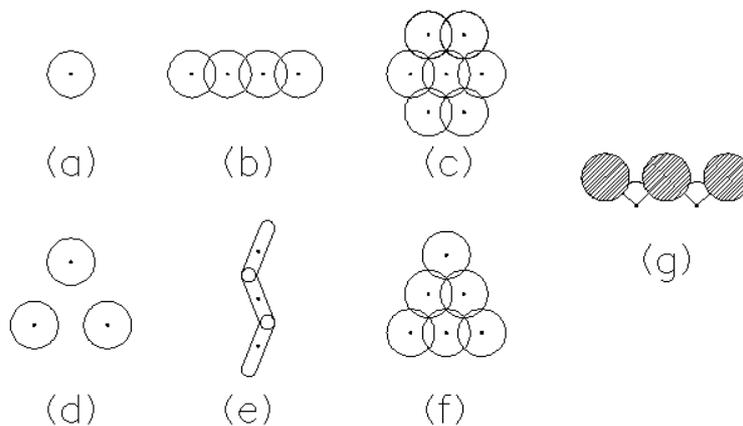
2 对地下水丰富的工程需要在水泥浆中掺入速凝早强剂。

3 为提高固结体强度,可采用高强度等级水泥,或选择高效的扩散剂和无机盐组成的复合配方。

4 抗渗型注浆材料的水玻璃模数要求在 2.4~3.4 较为合适,浓度要求 30~45 波美度。

16.5.6 旋喷桩的强度与图纸和施工方法相关。单管法在砂质土中的加固强度一般为 2.0~7.0MPa,在黏性土中的加固强度一般为 1.5~5.0MPa,三重管在砂质土中的加固强度一般为 2.0~15.0MPa,在黏性土中的加固强度一般为 0.8~5.0MPa。在一定土质条件下,通过调节浆液的水灰比和单位时间的喷射量或改变提升速度等措施可适当调节加固体强度,设计中对抗固强度的确定需根据土质条件和加固体所要求的强度综合考虑,并且可以用调节加固范围的方法满足设计要求。

16.5.7 桩的平面布置需根据加固的目的给予具体考虑,其平面布置形式如图所示。排桩、板墙可用作防水帷幕,整体加固则常用于防止基坑底部的涌土或者提高土体的稳定性,水平封闭可用于形成地基中水平隔离层。



(a) 单桩；(b) 排桩；整体加固；(c) 加固地基的分离桩；(d) 防渗板墙；(e) 水平封闭桩；(f) 摆喷作桩间防水

图 16.5.7 止水帷幕布置形式

16.6 冻结法

16.6.1 盾构隧道修建联络通道、盾构进出洞加固、盾尾刷更换加固等宜采用冻结法。其中冻土帷幕作为临时承载结构，应在设计的时间内保证土方开挖和结构施工的安全，并使周围环境和建（构）筑物不受损害。

16.6.2 冻结法设计应包括以下内容：

- 1 冻土帷幕结构方案比较与选择；
- 2 冻土帷幕的承载力和变形验算（I类冻土帷幕除外）；
- 3 冻结孔布置设计；
- 4 冻结帷幕形成验算；
- 5 冻结制冷系统设计；
- 6 对冻土帷幕的监测与保护要求；
- 7 冻土壁后填充注浆与融沉注浆设计；
- 8 可能对周围环境和建（构）筑物产生影响的分析；
- 9 对周围环境和建（构）筑物的影响监测与保护要求。

16.6.3 冻土帷幕结构形式的选择

1 冻土帷幕按其功能与要求分为三类，见表 16.6.3-1。应根据冻土帷幕功能要求分类选择不同形式和安全性能的冻土帷幕结构。

表 16.6.3-1 冻土帷幕功能分类表

类别	功能与要求	说明
I	仅用于止水而无承载要求	如岩石裂隙和混凝土界面缝隙止水
II	仅用于承载而无止水要求	如不透水粘性土层的加固
III	即要求承载又要求止水	如含水砂土层的加固与止水

2 冻土帷幕结构形式选择原则

- (1) 冻土帷幕宜按受压结构设计。
- (2) 在含水砂性土层中应采用封闭的冻土帷幕结构形式。
- (3) 冻土帷幕的几何形状宜与拟建地下结构的轮廓接近，并易于冻结孔布置。

(4) 冻土帷幕结构形式选择应有利于控制土层冻胀与融沉对周围环境的影响。

(5) 竖井和隧道冻土帷幕宜采用圆形或近似圆形断面。

(6) 基坑深度小于 5m 时，冻土帷幕可按重力式挡土墙设计。

(7) 有严格变形控制要求时，可采用“冻实”的冻土帷幕形式。

3 可按表 16.6.3-2 选择冻土帷幕及内支撑形式来确定承载比例。复杂、重要结构物，内支撑承载比例按 100% 计算。

表 16.6.3-2 冻结帷幕和内支撑形式及承载比例

序号	工程类型	冻土帷幕形式	内支撑形式	承载比例	
				冻土帷幕	内支撑
1	盾构进出洞	可采用墙式冻土帷幕。大型盾构出洞可增加“门”型冻土帷幕抗浮。	不设内支撑	100%	
2	旁通道及集水井	通道部份可采用直墙圆拱冻土帷幕，集水井可采取满堂加固或采用“V”字形冻土帷幕。	钢支撑+木背板；钢支撑+木背板+喷射混凝土。	100%	25-50%
3	基坑围护	基坑深度小于 5m 时可采用重力式挡土墙	冻土帷幕表面保温。	100%	

16.6.4 冻结设计基础参数

1 冻结帷幕平均温度应根据冻结帷幕承受荷载大小(或开挖深度)确定，也可按表 16.6.4 选取。冻结帷幕承受荷载大、安全要求高的工程宜取较低的冻结帷幕平均温度。

2 最低盐水温度应根据设计冻土帷幕平均温度、地层环境及气候条件确定，也可按表 16.6.4 选取。设计冻土帷幕平均温度低、地温高、气温低时取较低的盐水温度。

表 16.6.4 冻结帷幕平均温度，最低盐水温度设计参考值

开挖深度	0~12	12~20	20~32	>32
冻土帷幕平均深度	-6~-8	-7~-9	-8~-10	<-10
最低盐水温度	-25~-27	-26~-28	-27~-29	-29~-32

16.6.5 冻土帷幕厚度设计与强度检验

1 II类和III类冻土帷幕应按承载力要求设计冻土帷幕厚度。

2 冻土帷幕的力学计算模型可按均质线弹性体简化，其力学特性参数宜取冻土帷幕平均温度下的冻土力学特性试验值。

3 III类冻土帷幕强度检验安全系数按表 16.6.5 选取，II类冻土帷幕强度检验安全系数取III类冻土帷幕的 0.9 倍。

表 16.6.5 III类冻土帷幕强度检验安全系数

项目	抗压	抗拉	抗剪
安全系数	2.0	3.0	2.0

4 有特殊要求时验算冻土帷幕的变形。

5 I类冻土帷幕按冻结交圈要求设计冻土帷幕厚度。I类冻土帷幕可不作强度验算，但应在冻土帷幕交圈后再积极冻结不少于 3d。

16.6.6 冻结孔布置与冻土帷幕形成预计

1 冻结孔布置参数包括冻结孔成孔控制间距、冻结孔开孔间距、冻结孔孔位、冻结孔深度和冻结孔偏斜精度要求等。冻结土帷幕形成参数包括冻土帷幕交圈时间、预计冻土帷幕扩展厚度和冻土帷幕平均温度等。

2 冻结孔成孔间距应按冻结工期要求、设计盐水温度和冻结冻平均温度等确定，布置单排冻结孔时冻结孔成孔控制间距可按表表 16.6.6-1 选取，但不宜大于冻土帷幕设计厚度。多排冻结孔密集布置时，内部冻结孔成孔间距可取边孔的 1.2 倍。冻结孔偏斜精度要求按表 16.6.6-1 选定。冻结孔开孔间距不宜大于冻结孔成孔间距与冻结孔最大偏斜之差。

表 16.6.6-1 单排冻结孔成孔间距设计参考值及冻结孔偏斜精度要求

冻结孔类型	水平或倾斜冻结孔			垂直冻结孔	
	冻结孔深度 (m)	≤10	10~30	30~60	≤40
冻结孔成孔间距 (mm)	1100~1300	1300~1600	1600~2000	1200~1400	1400~1800
冻结孔最大偏斜 (mm)	150	150~350	150~600	150~250	250~400

3 当布置单排冻结孔在规定冻结工期内达不到设计冻土帷幕厚度和平均温度时，应布置多排冻结孔冻结。

4 冻结孔宜均匀布置并避开地层中的障碍物。在隧道管片上布置冻结孔时，开孔位置宜避开管片螺栓口、钢筋混凝土管片主筋和钢管片肋板。

5 冻结孔深度可按下式确定

$$L_{ks} = L_{sj} + L_0 + L_1$$

式中 L_{ks} 为冻结孔深度，m；

L_{sj} 为从冻结孔孔口到冻土帷幕设计边界的距离，m；

L_0 为不能循环盐水的冻结管端部长度，m；

L_1 为冻结管端部冻结削弱影响深度，m。

6 当只需要加固地层深部土体时，可采用浅部冻结管保温或下双供液管的方法进行局部冻结。

7 冻土帷幕扩展厚度可按下式计算

$$E_{yj} = v_{dp} t$$

式中 E_{yj} 为预计冻土帷幕厚度，m；

v_{dp} 为冻土帷幕平均扩展速度，m/d；

t 为冻结时间，d。

冻土帷幕平均扩展速度可按表 16.6.6-2 选取或采用通用计算方法计算。表 16.6.6-2 单排孔冻土帷幕扩展速度设计参考值

表 16.6.6-2 单排孔冻土帷幕扩展速度设计参考值

冻结时间 (d)	20	30	40	50	60
冻结帷幕扩展速度 (mm/d)	34	28	24	22	20

注：如为密集布孔，内部冻结孔之间的冻土帷幕扩展速度可比上表给出的设计参考值增加 5%~20%。

8 冻土帷幕交圈时间可按下式估算

$$t_{jq} = \frac{S_{max}}{v_{dp}}$$

式中

t_{jq} 为预计冻土帷幕交圈时间，d；

S_{max} 为冻结孔成孔控制间距，m；

v_{dp} 为冻土帷幕平均扩展速度，m/d。

9 冻土帷幕形成期应不少于预计冻土帷幕厚度和平均温度达到设计要求的时间

10 冻土帷幕温度分布可简化为定常温度场计算。冻土帷幕平均温度宜采用通用数值方法或通用经验公式计算。

16.6.7 冻结法施工需进行冻土帷幕壁后填充注浆与融沉注浆

1 充填注浆设计以及技术要求如下：在支护层与冻土帷幕交界面间以及喷射混凝土与永久结构交界面间预留注浆管，待永久结构达到一定强度时对壁后进行充填注浆，以减少周围土体变形。一般混凝土浇注一周后可进行充填注浆。

2 融沉注浆参见填充注浆宜在停止冻结 1 个月后，或根据测温结果及根据地表沉降变化量进行跟踪补偿注浆。

16.6.8 在地层冻结区域内有以下情况时，设计中应进行深入分析并采取针对性措施：

- 1 地下水流速大于 5m/d、有集中水流或地下水水位有明显 ($\geq 2\text{m/d}$)波动；
- 2 土层结冰温度低于 -2°C 或有地下热源可能影响土体冻结；
- 3 地层含水量低影响土体冻结强度；
- 4 用其他施工方法扰动过的地层；
- 5 有其它可能影响地层冻结或地层冻结可能严重影响周围环境的情况。

16.6.9 当冻土帷幕表面直接与大气接触，或通过导热物体与大气产生热交换时，应在冻土帷幕或导热物体表面采取保温措施。

16.6.10 在冻土帷幕形成期间，冻土帷幕内或冻土帷幕外 200m 区域内的透水砂层中不宜采取降水措施。必须降水施工时，冻结设计应充分考虑降水产生的不利影响。

17 特殊地段设计

17.1 一般规定

17.1.1 盾构隧道设计应尽量避免覆土过浅、曲线半径过小、纵坡过大、双洞间距过小等情况出现,尽量避免从地下障碍物附近、卵砾石地层、复合地层、建(构)筑物边缘或下部穿越。

17.1.2 当盾构隧道必须从上述特殊地段穿越时,其设计应遵循以下原则:

- 1 应以保证施工安全及周边环境安全为基本出发点。
- 2 在勘察阶段注意查明和分析工程的地质状况与隧道周边环境状况,在设计阶段应给出应急处理预案。
- 3 应根据隧道所处位置与地层条件合理确定地层及周边建筑物的变形控制指标。
- 4 应根据隧道所处条件,确定壁后注浆的材料和压力与流量,在施工过程中根据量测结果,进行注浆材料、压力与流量的动态调整。
- 5 敏感地段应适当加密监测测点和频率,根据监测结果不断调整盾构掘进参数。

【条文说明】受沿线地形、地面建筑物、地下构筑物、地下障碍物及管线等环境条件的限制,盾构设计时会出现浅覆土、小半径、大纵坡、小净距等特殊情况。由于工程地质条件、施工条件的复杂性,盾构施工中经常遇到诸如卵砾石地层、复合地层、地下障碍物等特殊地段。盾构在特殊地段施工与在一般地段施工不同,其掘进施工难度大、控制沉降要求严、安全风险高,如在浅覆土地段施工时开挖面压力控制难度大,易出现掌子面失稳、泥浆喷涌等;在小半径曲线地段施工时,会出现管片拼装质量差、接缝张开量大、盾尾磨损严重等;在小净距地段施工时,易发生管片变形、接头螺栓变形、漏水、地表下沉等现象;穿越地下障碍物时可能无法正常掘进而需采取繁杂的辅助施工措施;穿过建(构)筑物时必须严格控制地表沉降以保证建(构)筑物的安全;穿越卵砾石地层及复合地层时会出现刀具磨损严重需频繁更换刀具等。因此,盾构设计时应尽量避免这些特殊情况或特殊地段。当经方案比较分析确实无法避免时,盾构施工技术及管理需遵守

的规定比一般地段的施工要求更加严格，制定并执行更详细的针对性计划和措施。

17.2 小净距段

17.2.1 两并行盾构隧道或分期实施盾构隧道开挖面间距小于 $1D$ (D 盾构隧道开挖直径) 情况即为小净距隧道。

17.2.2 应根据隧道所处的地层条件、盾构型式、隧道断面大小、两条隧道之间的相对位置与距离，预测施工对已建隧道的影响和平行隧道掘进时的互相影响。

【条文说明】小净距隧道施工的相互影响主要有四个方面：(1) 后续隧道的推进对既有隧道的挤压和松动效应；(2) 后续盾构的盾尾通过对既有隧道的松动效应；(3) 后续隧道的壁后注浆对既有隧道的挤压效应；(4) 先行盾构引起的地层松弛而造成或引起后续盾构的偏移等。盾构掘进施工时应对这些影响进行评估，如有必要可采取一些必要的技术措施来规避或降低这些不利影响。

17.2.3 宜采取加固隧道间土体、打设隔离桩、先行隧道内设置钢支撑等辅助措施控制地层和隧道变形。

17.2.4 施工中要采取相应措施，降低后行盾构推进对先行隧道的挤压作用及单侧卸载作用。合理设置土压力；降低推进速度，严格控制推进方向，偏差最大不得超过 $\pm 30\text{mm}$ ；盾构推进过后进行注浆；控制盾构姿态，确保盾尾间隙均匀，加大盾尾油脂压注量来防止浆液通过盾尾流失；穿越前对盾构机及其他辅助设备进行全面彻底检修，确保盾构连续穿越完成。

17.2.5 对先行隧道和既有隧道加强监测，了解隧道变化情况，如有变化，可及时更改推进参数，保证隧道的安全。

17.3 浅覆土段

17.3.1 盾构隧道在特殊情况下因地质条件、使用目的、已有建（构）筑物等控制因素，会下穿小于 $D \sim 1.5D$ (D 盾构隧道开挖直径) 的覆土，设计应根据覆土厚度及地质情况进行综合设计，确保隧道安全。

17.3.2 浅覆土段盾构施工过程中易出现如下几方面问题：

- 1 浅覆土段易产生地表冒浆、沉降、坍塌；
- 2 隧道结构上浮。
- 3 高水压段还易产生冒顶通透水流。

【条文说明】根据工程实践经验，当盾构隧道覆土厚度小于 1 倍 D (盾构直径) 时，属于浅覆土施工。在浅覆土层地段，由于盾尾空隙会立即影响到地面，因此易出现开挖面失稳或泥浆喷涌等现象。在盾构掘进中，应严格控制开挖面压力，特别注意使用的泥浆或添加剂的性能，采取保持开挖面稳定、防止泥浆或添加剂泄露、喷出等措施。同时，还应采取防止隧道上浮和变形的相应措施。

17.3.3 浅覆土段盾构隧道设计应符合以下规定：

1 采用土体加固、冻结、抛土、抛石、河底注浆、加设抗浮板等措施对隧道顶部覆土进行预处理。

2 土压盾构机在河底饱和粘土层中推进时，有工作面挤压合力等于主动土压力、挤压合力等于静止土压力、挤压合力等于被动土压力 3 种临界受力平衡状态。当盾构正面挤压力 P_g 小于工作面主动土压力 P_a ，开挖面土体将向土仓内坍塌引发覆土塌陷，地面沉降明显，河水将沿塌陷裂缝进入土仓造成涌水事故；当盾构正面挤压力 P_g 介于主动土压力 P_a 和静止土压力 P_0 之间 ($P_a < P_g < P_0$)，盾构前方覆土层将有一定的沉降，与后续的工序造成的沉降叠加，将不利于控制隧道总沉降，同时由于前方土体收到扰动，使盾构控制困难。适合盾构正常推进的工况是正面挤压力 P_g 介于被动土压力 P_p 和静止土压力 P_0 之间 ($P_0 < P_g < P_p$)，前方覆土将有一定的隆起，用以补偿后续工序引起的沉降，又不至于将覆土层顶裂。根据以上分析土压平衡盾构盾构安全推进的最小覆土厚度为：

$$\left. \begin{aligned}
 P_a &= \left[\left(H_w + h + \frac{D}{2} \right) \gamma_w + \left(h + \frac{D}{2} \right) \gamma K_a - 2c\sqrt{K_a} \right] \frac{\delta D^2}{4} \\
 P_0 &= \left[\left(H_w + h + \frac{D}{2} \right) \gamma_w + \left(h + \frac{D}{2} \right) \gamma K_0 \right] \frac{\delta D^2}{4} \\
 P_p &= \left[\left(H_w + h + \frac{D}{2} \right) \gamma_w + \left(h + \frac{D}{2} \right) \gamma K_p + 2c\sqrt{K_p} \right] \frac{\delta D^2}{4}
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 K_a &= \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \\
 K_0 &= 1 - \sin \varphi' \\
 K_p &= \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)
 \end{aligned} \right\}$$

$$h > \frac{\frac{4p_g}{\delta D^2} - 2c\sqrt{K_p} - H_w \gamma_w}{\gamma_w + \gamma K_p} - \frac{D}{2}$$

3 隧道穿越饱和土层会受到水的浮力,当浮力超过隧道上覆土重量和隧道及隧道内设备自重时隧道将上浮,当管片脱离盾尾时,隧道被包围在壁后注浆的浆液中,受到浆液的浮力比在饱和土中受到的浮力要大得多,同时盾构推进挖出土方导致地基卸载,拼装好的隧道会受到地基回弹的作用向上偏离中心轴线。在浮力和地基回弹共同作用下,隧道上覆土产生隆起,若最大隆起值得不到有效控制,覆土层将被顶裂,产生透水裂缝,河水沿透水裂缝涌入盾尾将严重影响隧道和隧道施工的安全。考虑盾构推进时产生的地层损失与地基回弹对隧道的影响的抵消作用,隧道抗浮可以用下式控制:

$$P + q < F_y$$

并以此推出阻止隧道上浮所需的最小覆土厚度为:

$$h > \frac{\delta R_0^2 \gamma_y - \delta (R_0^2 - R_i^2) \gamma_c}{2 R_0 \gamma'}$$

4 当河底浅覆土厚度不满足式 2、3 条两种情况之一时应采河底覆土加固措施，常用的措施有：

(1) 河底抛土加大隧道上覆土层厚度

这种方法一般用于深水河底隧道加固中，它既能满足盾构推进隧道安全所要求的最小覆土厚度，又节约成本简便易行。

(2) 河底注浆加固

由于航运及排水的要求，在浅水河道中加固隧道浅覆土不宜采用河道抛土的办法，因此河底注浆加固及设置抗浮板是浅水河道加固的首要选择。通过注浆河底覆土形成一层不透水的硬壳层，同时 $c\Phi$ 值相应增大，能有效减小盾构推进时所需的最小覆土厚度的计算值。

(3) 加设抗浮板，为盾构推进及阻止隧道上浮提供反力

在特别浅的覆土区域，应在注浆加固的同时增设抗浮结构，如抗拔桩及抗浮板，用于平衡盾构推进时土体产生的侧向压力，以便盾构能以较适当的推进力及推进速度快速通过河底危险区。

【条文说明】在浅覆土地段施工时，由于覆土荷载减小，使开挖面压力允许范围变小，即使少量的误差，也可能给开挖面稳定带来很大影响。因此，在掘进时应特别注意使用的泥浆或添加剂的性质以及开挖面压力管理，尽量减小对地表或地下建（构）筑物的影响。本条分别给出了满足盾构掘进安全及抗浮安全的最小覆土厚度的理论估算。当实际覆土厚度小于理论估算的最小覆土厚度时，可根据实际情况按安全、便利的原则采取临时抛土抛石、河底注浆、加设抗浮板等措施。

17.3.4 浅覆土盾构隧道施工应符合以下规定：

1 土压平衡盾构需严格管理开挖面压力，由于覆土荷载减少，使开挖面压力的允许的管理幅度缩小，即使少量的误差，也可以给开挖面稳定性带来很大影响，施工前要对隧道轴线的河底水深情况进行一次全面的测量，复核隧道覆土的厚度，绘制河底地形图，并根据地形图计算出土压力。更重要的是还要根据推进时潮位的不断变化情况对其进行相应的调整。严格控制波动范围，一般控制在设定值 $\pm 5\%$ 以内。

2 泥水平衡盾构机推进过程中严格控制切口泥水压力波动，波动为-

0.3~+0.1bar，以确保开挖面稳定；密切关注空压机供气系统，确保空压机供气系统的连续性，压力波动不宜大于 0.5bar；气仓内泥水液位不宜出现较大波动，液位波动控制在 20%以内；必要时采取人工调整参数，以减少切口泥水压力波动。

3 提高同步注浆质量与管理，严格控制初凝时间，合理掌握注浆压力使注浆量、注浆流量和推进速度形成最佳匹配。

17.4 卵砾层及复合地层段

17.4.1 复合地层是在盾构前方的工作面由不同的工程地质层“混合”组成的，除了关注在工作面上（或垂直断面上）的“混合”之外，同时重视沿着隧道轴线的方向上存在的不同地质层的混合，应将复合地层定义为在三维方向上，围岩主要由物理力学性质、工程地质与水文地质特征相差较大的几种地层的组合。

17.4.2 卵砾层及复合地层段盾构隧道设计应符合以下规定：

1 当盾构隧道通过卵砾石层、复合地层，应根据卵砾石复合地层厚度、分布位置等情况，采用相应的工程措施对其进行处理。

2 加强勘察工作，提高不同地层交界面探测的准确度

3 通过优化隧道平纵位置，尽可能使隧道在单一地层内通过，如果隧道侵入基岩，应尽量减少入岩深度。

4 对于土石混杂、软硬不匀地层的应合理设计刀盘、刀具，优选开口率大的面板结构。

5 盾构机应配备必要的破碎设备和刀具磨损检测报警装置，宜选择压力控制灵敏的盾构设备。

【条文说明】地质条件复杂地段以及砂卵石地段施工时地层情况复杂，视具体情况采取相应措施，必要时需提前对地层进行处理。在勘察设计阶段应通过各种技术手段确定卵砾石层及复合地层的分布范围、岩石组成及成分。隧道纵断面设计时在在保证施工、运营安全的前提下，通过线路纵坡及覆盖层厚度的合理选用及必要的技术措施使切入卵砾石或基岩深度最小。

在盾构机设计制造时，针对盾构掘进通过的地层在隧道纵向和横断面的分布情况来确定刀具的组合布置方式和更换刀具的计划，如对于全断面为岩石地层宜采用盘形滚刀破岩；全断面软土（岩）宜采用齿刀切削；断面内为岩、土且软硬不均互层的复合地层宜采用滚刀和齿刀进行混合安装布置。

地层的软硬不均会对刀具产生非正常的磨损（如弦磨、偏磨等）甚至损坏。因此，在软硬不均地层的复合地层的盾构掘进中，通过对盾构掘进速度、刀具贯入度、参数和排出渣土等的变化状况的观察分析或采取开仓等方法加强对刀具磨损的检测，据此及时调整参数保护刀具或更换刀具，以较少的刀具消耗实现较高的掘进效率。换刀时应合理选择换刀点，并做好预加固处理，以适应前方地层的掘进。

17.5 敏感环境地段

17.5.1 环境敏感地段系指盾构隧道施工下穿、侧穿已有建（构）筑物、堤坝、公路、铁路、地下管线等设施地段。

17.5.2 盾构通过敏感环境段设计应符合如下规定：

1 应加强对临近建（构）筑物、地下管线的勘察，查明建（构）筑物基础埋深、基础形式及上部结构形式；查明管线平面位置、埋深、规格尺寸、材料类型、接头形式、输送物体，并预测施工对他们的影响程度。

2 根据建（构）筑物、管线与隧道的位置关系、施工影响程度制定迁改、加固方案，确保施工安全。

3 施工过程中要周密管理，控制变形，并根据所穿越工程的重要程度、穿越类型、周边环境条件等情况划分敏感环境等级，并针对不同等级进行监控量测设计。

17.5.3 盾构临近建（构）筑物、地下管线等施工时，以不造成原有建（构）筑物、地下管线的不良影响为前提，而能定量表示出有害影响程度的是允许值，下表是各类建（构）筑物、地下管线容许位移的参考值。当原有建（构）筑物存在容许值时，必须满足；当没有许定容许值就必须和建（构）筑物物管单位协商后定出容许值。商定容许值要重点考虑功能及结构方面的情况。

表 17.5.3-1 建（构）筑物容许位移沉降参考值

基础种类	基础形式	相对沉降量（mm）		最大沉降量（mm）	
		标准值	最大值	标准值	最大值
混凝土	连续基础	10	20	20	40
钢筋混凝土	独立基础	15	30	50	100
	连续基础	30	40	100	200
	筏型基础	20~30	40~60	100~150	200~300

表 17.5.3-2 地下管线位移沉降参考值

管线类型		位移沉降容许值
柔性管道		40
刚性管道	压力	20
	非压力	30

17.5.4 盾构临近建（构）筑物、地下管线等施工要采取必要的监测和必要的加固技术措施。

1 临近施工的监测

(1)原有建（构）筑物的监测，包括沉降、裂缝、倾斜的监测。

(2)建（构）筑物地基土体的监测，包括土体变形、水土压力监测。

(3)盾构施工参数监测，包括盾构推力、出土率、注浆充填率、盾构姿态的监测。

2 临近建筑物保护的技术措施

(1)对建（构）筑物实施加固措施：主要包括结构加固和基础托换，其中结构加固包括对结构本体加固（梁、柱、墙）和基础加固（桩、地锚、拉杆）。

(2)对地基实施加固措施，加固盾构周围土体防止土体松动和扰动，控制盾构上部土体变形；也可通过隔离帷幕排桩屏蔽盾构施工对构筑物的影响。

(3)对盾构实施施工参数控制。

17.6 小半径段

17.6.1 对于小半径段盾构隧道，盾构机掘进时隧道轴线控制难度大，纠偏困难。盾构机本身为直线形刚体，不能与曲线完全拟合。曲线半径越小则纠偏量越大，纠偏灵敏度越低，轴线就比较难于控制。小半径转弯段从总体设计到盾构施工参数需要经过计算并结合地质条件、施工经验等因素综合考虑后方可确定。

【条文说明】《盾构法隧道施工及验收规范》(GB50446)中规定平曲线半径小于40D(D为盾构直径)的曲线为小半径曲线。在小半径曲线段施工时，易出现纠偏量大、轴线控制困难、管片错台与角部破损严重、地表沉降大、管片渗漏水严重等现象。此外盾构设备的设计制造、管片结构都必须与其相适应，会进一步增加施工控制难度。因此进行盾构隧道总体设计时，应尽量避免采用小半径曲线。当确需采用时，亦应采用尽可能大的曲线半径。

17.6.2 小半径段盾构隧道，管片容易在水平分力作用下发生较大的位移，造成管片侵限现象。隧道管片衬砌轴线因推进水平分力而向圆曲线外侧（背向圆心一侧）偏移，盾构机每掘进一环，由于管片端面与该处轴线产生夹角，在千斤顶的推力作用下产生一个水平分力，使管环脱出盾尾后，受到侧向分力的影响而向曲线外侧偏移。应防止由于盾构推进反力不均匀引起的管片环变形、移动、管片错台、管片严重开裂、渗水等。

【条文说明】小半径曲线段施工时盾构转向幅度较大，因此要采取措施保证盾构顺利转向，并确保成型隧道质量。

17.6.3 对于小半径段盾构隧道，主要应重点考虑以下技术措施：

1 设计中综合盾构机掘进参数、盾构设备（超挖刀、铰接装置）、管片选型和拼装等方面原因。

2 应采取同步注浆和二次注浆相结合的措施，以保证小半径圆曲线段成型管片不出现侧向移动，以及及时填充围岩空隙保证土体稳定。

3 使用超挖装置时，应控制超挖量。

4 壁后注浆应选择体积变化小、早期强度高、速凝型的注浆材料；

5 应增加施工测量频率。

6 应采取措施防止后配套车架脱轨或倾覆。

【条文说明】当用部分外扩式超挖刀进行开挖时，超挖量大，小半径曲线施工容易。但是，这样会产生由于地层的松动、盾尾同步注浆材料易绕入开挖面、推进反力下降，使隧道变形增大。因此，要考虑地层的稳定性，把超挖量控制在容许范围内。

小半径曲线施工时，管片从盾尾脱出后如果不能立即与地层形成一体，盾构推进就不能充分取得反力，导致产生较大的管片变形和隧道位移的危险性。应选择体积收缩率小，早期强度高的注浆材料。考虑到超挖量，注入量也需要适当的增加。

在地层稳定性差的地段，为了防止曲线部分的超挖引起地层松动可采用注浆加固或高压喷射搅拌施工等辅助措施。

18 监控量测

18.1 一般规定

18.1.1 施工期应根据工程地质、水文地质条件、施工环境及施工技术等因素确定监控量测方案，监控量测的范围应包括结构、施工状态和周边环境。

18.1.2 结构的监测技术方案应包含监测项目、监测频率和监测报警值等。

18.1.3 结构的监测范围一般为结构外沿两侧各 $2\sim 3D$ (D 为盾构直径或工作井开挖深度) 范围内，但在环境敏感施工地段，监测范围应视周围环境和建(构)筑物情况予以适当加大。

18.1.4 测点初始值应在测点稳定后进行测读，取三次观测数据的平均值作为初始观测值。测点的间隔除应根据隧道的长度、线形等决定，一般曲线段为 $20\sim 30\text{m}$ ，直线段约为 50m 左右。

18.1.5 监测所采用的监测仪器及元件应满足各类监测工作的要求。

18.1.6 沉降监测的等级划分、精度要求和适用范围应满足表 18.1.6 要求。

表 18.1.6 沉降监测的等级划分、精度要求和适用范围

监测等级	观测点的高程中误差 (mm)	相邻观测点高差中误差 (mm)	适用范围
I	± 0.3	± 0.1	线路沿线变形特别敏感的超高层、高耸建筑、精密工程设施、重要古建筑物、重要桥梁、管线和运营中结构、轨道、道床等
II	± 0.5	± 0.3	线路沿线变形比较敏感的高层建筑物、桥梁、管线;隧道施工中的支护结构、隧道拱顶下沉等
III	± 1.0	± 0.5	线路沿线的一般多层建筑物、桥梁、地表、管线、基坑隆起等

注:观测点的高程中误差是指相对于最近的沉降控制点的误差而言。

18.1.7 施工中应按施工进度及时进行检测，对监测数据进行分析处理后，及时反馈给建设、设计、监理和施工单位。

18.2 监测项目

18.2.1 监测应采用仪器监测与巡视检查相结合的方法。

18.2.2 盾构工作井仪器监测宜根据表 18.2.2 进行选择。

表 18.2.2 盾构工作井施工监测项目

类别	监测项目	监测仪器及元件
必 测 项 目	基坑周边环境观察	—
	地表沉降或隆起	水准仪
	围护桩（墙）顶水平位移和竖向位移	全站仪或经纬仪 水准仪
	支撑轴力	应变计、轴力计
	地下水位	水位计
	立柱内力	应变计、钢筋计
	立柱沉降	水准仪
	围护桩（墙）变形	测斜仪
	建构筑物沉降	水准仪
	建构筑物倾斜	全站仪 测斜仪
	建构筑物裂缝	测缝计
	地下管线沉降	水准仪
选 测 项 目	围护桩（墙）内力	钢筋计
	孔隙水压力	渗压计
	基坑底部隆起	水准仪
	土体分层沉降及水平位移	分层沉降仪 测斜仪

18.2.3 盾构区间的仪器监测应根据表 18.2.3 进行选择。

表 18.2.3 盾构隧道施工监测项目

类别	监测项目	监测仪器及元件
必 测 项 目	洞内及洞外观测	—
	地表沉降或隆起	水准仪
	建构筑物沉降	水准仪
	建构筑物倾斜	全站仪 测斜仪
	建构筑物裂缝	测缝计
	地下管线沉降	水准仪
	管片拱顶沉降	精密水准仪
	洞内收敛	全站仪或收敛仪
选 测 项 目	土体分层沉降及水平位移	分层沉降仪、测斜仪
	管片应力	混凝土应变计
	管片钢筋内力	钢筋计
	管片衬砌和地层接触应力	土压力盒
	管片环缝张开量	测缝计
	管片纵缝张开量	测缝计
	地下水位	水位计
	管片外注浆效果	地质雷达

18.2.4 监控量测应在工作井开挖前或盾构掘进前测得初始读数。在对土体、工作井围护结构和主体结构、隧道结构和周围环境进行监测的同时，应对盾构开挖面土压力、推力、推进速度、盾构姿态、注浆量、注浆压力、出土量等施工参数同

步采集，及时进行监测数据的分析和反馈。

18.2.5 隧道工作井基坑开挖后，应观察地层的工程地质特性、地表及地表裂缝情况。地下水类型、渗水量大小、位置、水质气味、颜色等。围护结构（含桩）及支撑结构状况。观察频率为基坑开挖后 1 次/1 天；情况异常时，加密观察频率。

18.2.6 隧道施工过程中应进行洞内及洞外观察，并根据隧道内和周边建（构）筑物环境情况确定其观测频率，但每天观测应不少于一次。

【条文说明】 1) 洞内观察主要是对已安装的管片衬砌的工作状态(包括：管片变形、开裂、错台、拼装缝、掉块以及漏水状况等)、盾构机和出土情况进行观察和记录；

2) 洞外观察主要是地表开裂、地表隆沉、建（构）筑物开裂、倾斜等的观察和记录。

18.3 测点布置

18.3.1 工作井附近地表沉降或隆起监测测点的布置应符合下列规定：

1 在基坑四周距坑边 10m 的范围内沿坑边设 2 排沉降测点，排距 3~8m，点距 5~10m。当基坑邻近处有建（构）物或地下管线时，应增加沉降测点。

2 在工作井站与盾构隧道结合部位应增设测点

18.3.2 桩（墙）顶的水平位移和垂直位移监测应符合以下规定：

1 沿基坑四周每边设置 3~4 个主测断面，断面在基坑两侧的围护桩（墙）顶设测点。

2 对于水平位移变化剧烈的区域，宜适当加密测点，有水平横支撑时，测点宜布置在两道水平支撑的跨中部位。

3 同一测点可以兼作水平位移和垂直沉降观测使用。

18.3.3 支撑轴力监测应符合以下规定：

1 沿基坑四周每边设置 3~4 个主测断面，断面在基坑两侧的围护桩（墙）顶设测点。该断面位置的全部支撑均设测点。受力较大的斜撑和基坑深度变化处宜增设测点。

2 测点一般布置在支撑的端部或中部，当支撑长度较大时也可安设在 1/4 点处。对监测轴力的重要支撑，宜同时监测其两端和中部的沉降和位移。

18.3.4 地下水位监测测点宜布置在基坑的四角点以及基坑的长短边中点；可利用部分降水井作监测。

18.3.5 立柱内力监测应选择 4~5 根具有代表性的立柱进行内力监测，测点布置在立柱中部。一般可沿立柱外周边均匀布置 4 个测点。

18.3.6 立柱沉降监测应选择 4~5 根具有代表性的立柱进行沉降监测，测点测点一般布置在与立柱刚性连接的顶板表面上，采用铆钉枪打入或钻孔埋设膨胀螺丝。

18.3.7 围护桩 (墙)变形监测应沿基坑四周每边设置 3~4 个主测断面，沿桩 (墙)竖直方向上监测间距为 0.5m 或 1.0m。监测总深度应与围护桩 (墙)深度一致。基坑的深度变化处宜增加测点。

18.3.8 围护桩 (墙)内力监测应沿基坑四周每边设置 3~4 个主测断面。

18.3.9 孔隙水压力监测应在基坑的四角点以及基坑的长短边中点布置，测点距基坑围护结构距离 1.5~2m 左右。

18.3.10 土体分层沉降及水平位移监测应符合下列规定：

1 在特殊地质地段和周围存在重要建 (构)筑物时，应按设计要求进行土体分层沉降和土体水平位移监测。土体分层沉降监测和土体水平位移监测一般需同时布置。

2 土体分层沉降的监测宜采用钻孔埋设分层沉降标。沉降标的设置间距为 1~2m；测斜时每 0.5m 或 1.0m 读数一次。在竖向位置上主要布置在各土层的分界面，当土层厚度较大时，在地层中部增加测点。埋设沉降标时，钻孔的深度应大于基坑底的标高。沉降标的埋设稳定期不应少于 30 天。

3 深层土体垂直位移和水平位移的初始值应在分层标和测斜管埋设稳定后进行，一般不少于 7 天。每次监测应重复进行两次，两次误差值不大于 $\pm 1.0\text{mm}$ 。

18.3.11 基坑底部隆起监测应符合下列规定：

1 在特殊地质地段和周边存在高大建 (构)筑物时，应按设计要求进行基坑底部隆起监测。测点布置可根据基坑长度在其中线处设 2~3 点。

2 监测应视土层和环境的不同情况，在开挖距坑底 5m~8m 时开始初读数。

18.3.12 盾构段地表沉降或隆起监测测点的布置应符合下列规定：

1 纵向地表测点沿盾构推进轴线设置，测点间距为 10~30m。在地层或周边环境较复杂地段布置横向监测断面。横向地表测点的布置范围应根据预测的沉降

槽确定，一般可在隧道结构外沿两侧各 $2\sim 3D$ （ D 为盾构直径）范围内布设。一排横向地表测点不宜少于 7 个，且应依据近密远疏的原则布置。

2 在盾构始发的 100m 初始掘进段内，监测布点宜适当加密，并宜布置一定数量的横向监测断面。

3 在结构断面变化的部位如隧道与工作井结合部位应设置监测点。

18.3.13 管片衬砌变形监测主要包括隆沉、水平位移监测及断面收敛变形监测。盾构每 10 环管片测一个断面，如采用收敛仪进行管片衬砌收敛监测，断面的拱顶(0°)、拱底(180°)、拱 (90° 和 270°)处共埋设 4 个测点，量测横径和竖径的变化，并以椭圆度表示管片圆环的变形，实测椭圆度“横径-竖径”。

18.3.14 土体分层沉降及水平位移监测应符合下列规定：

1 监测断面应与本规程第 18.3.13 条所设监测断面相对应，以监测盾构施工对地层的影响。土体分层沉降应采用钻孔埋设分层沉降标，用分层沉降仪进行监测；也可采用多点位移计等进行监测。土体水平位移应采用钻孔埋设测斜管，用测斜仪进行监测。

2 对于土体分层沉降，磁性沉降标的设置间距 $1\sim 2\text{m}$ 。埋设沉降标测点时，在隧道两侧的钻孔深度应超过隧道底板 $2\sim 3\text{m}$ ，而位于隧道顶部的钻孔深度应在隧道拱顶之上 $1\sim 2\text{m}$ 。测点的埋设稳定期应视不同地层情况在 $10\sim 30$ 天之间。

3 测斜时，每 0.5m 或 1.0m 读数一次。测斜管的埋设必须与周围土体紧密相连，埋设稳定期应视不同地层情况在 $10\sim 30$ 天之间。

18.3.15 管片衬砌和地层的接触应力监测断面应与本标准第 18.3.13 条所设监测断面相对应，每一断面不少于 5 个测点。

18.3.16 管片内力监测断面应与本标准 18.3.13 条所设监测断面相对应，每一块管片布置一对测点。钢筋应力计和混凝土应变计应在管片预制时安装。

18.3.17 建(构)筑物沉降监测应符合下列规定：

1 沉降观测点的位置和数量应根据工程地质和水文地质条件、建(构)筑物的体型特征、基础形式、结构种类、建(构)筑物的重要程度及其与隧道结构的距离等因素综合考虑。

2 对于烟囱、水塔、油罐等高耸建(构)筑物，应沿周边在其基础轴线上的对称位置布点。

3 对于城市桥梁，应按不同施工状况在桥墩、盖梁和梁、板结构上布点。

4 一般建筑物的沉降监测测点通常可埋设在建(构)筑物的四角(拐角)；沿外墙每 10~15m 处或每隔 2-3 根柱基上；高低悬殊或新旧建(构)筑物连接处、伸缩缝、沉降缝和不同埋深基础的两侧；框架(排架)结构的主要柱基或纵横轴线上。

5 对于受堆荷和震动显著的部位，基础下有暗沟、防空洞处部位也应布置测点。以上测点的布设数量应根据建(构)筑物的重要程度及其与隧道结构的距离等因素确定。

18.3.18 建(构)筑物倾斜变形监测主要针对高层或高耸建筑物，其他一般建筑物可采用基础附近的差异沉降值推算倾斜值。对于进行倾斜监测的建(构)筑物，原则上每栋最少布置两组倾斜测点(每组 2 个)，具体测点数目视现场情况而定。采用倾斜位移测量法或倾斜电测法，分别使用全站仪或倾角计。

建(构)筑物倾斜监测原则上只在重要的高层、高耸建筑物或桥墩上进行。

18.3.19 建(构)筑物裂缝监测应符合下列规定：

1 对于建(构)筑物的一般裂缝应采用裂缝宽度板或游标卡尺进行监测的直接观测法，其精度为 0.2mm。对于比较重要和细微的裂缝，应采用裂缝观测仪进行监测，其精度为 0.1mm。

2 建(构)筑物的一般裂缝采用直接观测法，根据裂缝的分布位置、走向、长度、宽度等参数和建筑物的重要程度决定观测数量，并将裂缝进行编号，划出测读位置。对于比较重要和细微的裂缝，裂缝观测的结果应绘制成建(构)筑物裂缝图。

18.3.20 地下管线沉降监测应符合下列规定：

1 在地下管线沉降测点设计和设置前，应对隧道施工影响范围内的重要地下管线进行实地调查，其中特别应了解有压管线的结构、材料情况和雨污水管的接头和渗漏状况，在调查的基础上编制管线平、断面图和管线状况报告；

2 地下管线测点重点布置在有压管线(如煤气管线、给水管线等)上，对抗变形能力差、易于渗漏和年久失修的雨污水管也应重点监测。测点布置在管线的接头处，或者对位移变化敏感的部位；

3 对于有压管线，宜将测点直接埋设在管线上，如受条件所限，也可在管线上方埋设地表桩进行间接监测；

4 对于重要管线, 条件允许时测点应全部直接布设在管线上, 如受条件所限无法达到上述要求时, 应将部分测点直接布设在管线上和检查井下的管线处, 并在管线上方对应的地表处通过埋设地表桩布设测点进行间接监测, 地表桩与直接布设在管线上的测点应位于同一测点位置, 以进行对比分析, 且地表桩的间距一般应不大于 5m。

18.3.21 管片外注浆效果监测应符合下列规定:

- 1 盾构隧道管片背侧注浆效果监测宜使用地质雷达进行监测;
- 2 盾构区间一般地段时, 在拱顶、拱腰、拱脚布置不少于 4 条测线;
- 3 盾构区间特殊地段、盾构始发接受位置 25 环管片范围内, 应加密监测测线并采用连续探测方式检测。

18.4 监测精度

18.4.1 盾构法施工时, 应对土体介质、工作井围护结构和主体结构 and 周边环境进行监控量测, 其具体监测精度要求见表 18.4.1 所示。

表 18.4.1 盾构工作井施工监测精度

类别	监测项目	监测仪器及元件	监测精度
必 测 项 目	基坑周边环境观察	—	—
	地表沉降或隆起	水准仪	符合表 18.1.6 的规定
	围护桩(墙)顶水平位移和竖向位移	全站仪或经纬仪 水准仪	水平: 0.5mm 竖向: 0.15mm
	支撑轴力	应变计、轴力计	≤0.15/100 (F.S)
	地下水位	水位计	5.0mm
	立柱内力	应变计、钢筋计	≤0.15/100 (F.S)
	立柱沉降	水准仪	符合表 18.1.6 的规定
	围护桩(墙)变形	测斜仪	0.02mm/0.5m
	建构筑物沉降	水准仪	符合表 18.1.6 的规定
	建构筑物倾斜	全站仪 测斜仪	1", 2mm+2ppm 0.02mm/0.5m
	建构筑物裂缝	测缝计	0.1mm
	地下管线沉降	水准仪	符合表 18.1.6 的规定
选 测 项 目	围护桩(墙)内力	钢筋计	≤0.15/100 (F.S)
	孔隙水压力	渗压计	≤0.15/100(F.S)
	基坑底部隆起	水准仪	1.0mm
	土体分层沉降及水平位移	分层沉降仪 测斜仪	1.0mm 0.02mm/0.5m

18.4.2 盾构法施工时, 应对土体介质、隧道结构(主要为管片衬砌)和周边环境进行监控量测, 其具体监测精度要求见表 18.4.2 所示。

表 18.4.1 盾构隧道施工监测精度

类别	监测项目	监测仪器及元件	监测精度
必 测 项 目	基坑周边环境观察	—	1.0mm
	地表沉降或隆起	水准仪	符合表 18.1.6 的规定
	建构筑物沉降	水准仪	符合表 18.1.6 的规定
	建构筑物倾斜	全站仪 测斜仪	1", 2mm+2ppm 0.02mm/0.5m
	建构筑物裂缝	测缝计	0.1mm
	地下管线沉降	水准仪	符合表 18.1.6 的规定
	管片拱顶沉降	精密水准仪	0.1mm
	洞内收敛	全站仪或收敛仪	1"
选 测 项 目	土体分层沉降及水平位移	分层沉降仪 测斜仪	1.0mm 0.02mm/0.5m
	管片应力	混凝土应变计	≤0.15/100 (F.S)
	管片钢筋内力	钢筋计	
	管片衬砌和地层接触应力	土压力盒	≤0.15/100 (F.S)
	管片环缝张开量	测缝计	≤0.15/100 (F.S)
	管片纵缝张开量	测缝计	
	地下水位	水位计	5.0mm
	管片外注浆效果	地质雷达	—

18.5 监测频率

18.5.1 监测频率应与施工进度密切配合,并针对不同监测项目分别制定相应的监测频率。

18.5.2 监测频率的确定应能满足反映监测对象所监测项目的重要变化过程而又不遗漏其变化时刻的要求。

18.5.3 监测工作应贯穿工程施工过程直至完成为止。对有特殊要求的工程周边环境的监测应根据需要延续至变形趋于稳定后结束。

18.5.4 监测频率应综合考虑工程施工阶段、周边环境、自然条件的变化和当地经验而确定。在没有经验时,监测频率可按表 18.5.4-1 和表 18.7.4-2 对应选取。

表 18.5.4-1 盾构工作井监测频率

施工进度		基坑设计深度(m)			
		≤5	5~10	10~15	>15
开挖深度(m)	≤5	1次/1d	1次/2d	1次/2d	1次/2d
	5~10	—	1次/1d	1次/1d	1次/1d
	>10	—	—	2次/1d	2次/1d
底板浇筑后时间(d)	≤7	1次/1d	1次/1d	2次/1d	2次/1d
	7~14	1次/3d	1次/2d	1次/1d	1次/1d
	14~28	1次/5d	1次/3d	1次/2d	1次/1d
	>28	1次/7d	1次/5d	1次/3d	1次/3d
	>28	1次/10d	1次/10d	—	—

当监测值接近警戒值时每天 1 次,当支撑轴力或围护结构水平变形超过警戒值时或出现险情时,应按每小时监测一次或根据现场情况定。当以上表中工况共同存在时按监测频率较高的标准控制。

表 18.5.4-2 盾构区间施工监测频率

监测项目	监测频率		
	预警、应采取特殊措施	应加强监测	可正常施工
洞内及洞外观测 (衬砌变形、开裂、地表异常)	1 次/d		
地表沉降或隆起	掘进面距监测断面前后距离 $L \leq 20m$ 时, 2 次/d; $L \leq 50m$ 时, 1 次/d; $L > 50m$ 时, 2 次/周; 掘进重点时段, 1 次/8h。	掘进面距监测断面前后距离 $L \leq 20m$ 时, 1 次/d; $L \leq 50m$ 时, 1 次/2d; $L > 50m$ 时, 1 次/周; 掘进重点时段, 1 次/8h。	掘进面距监测断面前后距离 $L \leq 20m$ 时, 1 次/d; $L \leq 50m$ 时, 1 次/2d; $L > 50m$ 时, 1 次/周。
土体分层沉降及水平位移			
管片拱顶沉降			
地下管线沉降			
地下水位			
洞内收敛	掘进面距监测断面前后距离 $L \leq 20m$ 时, 2 次/d; $L \leq 50m$ 时, 1 次/d; $L > 50m$ 时, 2 次/周; 下穿建筑物、构筑物时, 1 次/8h。		
建构筑物沉降、倾斜、裂缝			
管片钢筋应力、管片衬砌和地层接触应力、管片环缝张开量、管片纵缝张开量	1 次/d		
管片外注浆效果	据施工进度量测、对补偿注浆区域进行复查		

18.5.5 监测频率要满足工程监测工作实际需要,监测单位应根据工程需要对上述监测方案进行细化与调整,以适应工程需要。

18.6 监测要求

18.6.1 盾构隧道穿越工程、隧道周边建(构)筑物及地下管线的监控量测控制值标准应根据隧道工程及周边环境的实际状况和现场监控量测值的综合分析结果,并经评估后予以确定。对于特别重要或者周边环境十分复杂的工程应进行专项设计,以确定其安全控制标准。

18.6.2 隧道工程监控量测预警值要根据隧道结构跨度、埋置深度、工程地质及水文地质特点等因素综合考虑确定。对于一般情况,也可采用表 18.6.2-1 和表 18.6.2-2 的数值。在施工过程中,设计和施工单位可根据隧道工程监测数据的实际情况,对表 18.6.2-1 和表 18.6.2-2 中的预警值进行适当调整,该调整值应经论证后确定。

表 18.6.2-1 盾构工作井施工监测预警值

类别	监测项目	监测仪器及元件	预警值
必测项目	基坑周边环境观察	—	—
	地表沉降或隆起	水准仪	2~3mm/d 或 25mm
	围护桩（墙）顶水平位移和竖向位移	全站仪或经纬仪 水准仪	水平：2~3mm/d 或 25mm 竖向：一级基坑 2~3mm/d 或 10mm
	支撑轴力	应变计、轴力计	70%设计控制值
	地下水位	水位计	累计值：1000mm，位移速率：300mm/d
	立柱内力	应变计、钢筋计	70%设计控制值
	立柱沉降	水准仪	累计值：30mm，位移速率：2mm/d
	围护桩（墙）变形	测斜仪	2~3mm/d 或 40mm
	建构筑物沉降	水准仪	根据建构筑物对变形适应能力确定。
	建构筑物倾斜	全站仪，测斜仪	根据建构筑物对变形适应能力确定。
	建构筑物裂缝	测缝计	宽度 1.5mm，持续发展
	地下管线沉降	水准仪	累计值：10mm，位移速率：2mm/d
选测项目	围护桩（墙）内力	钢筋计	70%设计控制值
	孔隙水压力	渗压计	70%设计控制值
	基坑底部隆起	水准仪	累计值：30mm
	土体分层沉降及水平位移	分层沉降仪、测斜仪	2~3mm/d 或 40mm

表 18.6.2-2 盾构法施工监控量测预警值

类别	监测项目	监测仪器及元件	预警值
必测项目	基坑周边环境观察	—	—
	地表沉降或隆起	水准仪	2~3mm/d 或 25mm
	建构筑物沉降	水准仪	根据建构筑物对变形适应能力确定。
	建构筑物倾斜	全站仪、测斜仪	根据建构筑物对变形适应能力确定。
	建构筑物裂缝	测缝计	宽度 1.5mm，持续发展
	地下管线沉降	水准仪	累计值：10mm，位移速率：2mm/d
	管片拱顶沉降	精密水准仪	累计值：30mm，2mm/d
选测项目	洞内收敛	全站仪或收敛仪	累计值：20mm，1mm/d
	土体分层沉降及水平位移	分层沉降仪、测斜仪	2~3mm/d 或 40mm
	管片应力	混凝土应变计	70%设计控制值
	管片钢筋内力	钢筋计	
	管片衬砌和地层接触应力	土压力盒	70%设计控制值
	管片环缝张开量	测缝计	0.2mm
管片纵缝张开量	测缝计		

	地下水位	水位计	累计值：1000mm，位移速率： 300mm/d
	管片外注浆效果	地质雷达	——

18.6.3 必须建立完备的管理制度和信息反馈制度，建立及时和畅通的信息沟通渠道。

18.6.4 监测数据及资料必须有完整清晰的记录，包括图表、曲线、文字报告等，以保证监控量测资料的完整性和连续性。及时对各种数据进行整理分析，判断工程的稳定性，并及时将有关信息反馈到施工中。

18.6.5 监控量测管理工作是监控量测工作成败的关键，必须予以充分的重视。在监测工作中，监测组应与相关单位和人员密切配合，并应保证监测方案的合理性、监测数据的真实性、测点和仪器的稳定可靠性、数据处理、反馈的及时性以及监测周期的完整性。

18.6.6 取得监测数据后，应及时进行整理和校对。施工监控量测的各类数据均应及时绘制成时态曲线，同时应注明开挖面距监测断面的距离等信息。

18.2.7 监控量测数据的计算分析工作中除应对每个项目进行单项分析外，还应进行多项目的综合分析。

18.6.8 当监测时态曲线呈现收敛趋势时，应根据曲线形态选择合适的函数，对监测结果进行回归分析，以预测该测点可能出现的最终位移值和预测结构和建(构)筑物的安全性，据此确定施工方法及判定施工方法的适应性。

18.6.9 监测项目应按“分区、分级、分阶段”的原则制定监控量测控制标准，并按黄色、橙色和红色三级预警进行反馈和控制。三级预警可参考表 18.6.8 进行判定。

表 18.6.9 三级预警状态判定表

序号	预警级别	预警状态描述
1	黄色	实测位移(或沉降)的绝对值和速率值双控指标均达到极限值的70%~85%之间时；或双控指标之一达到极限值的85%~100%之间而另一指标未达到该值时。
2	橙色	实测位移(或沉降)的绝对值和速率值双控指标均达到极限值的85%~100%之间时；或双控指标之一达到极限值而另一指标未达到时，或双控指标均达到规限值而整体工程尚未出现不稳定迹象时。
3	红色	实测位移(或沉降)的绝对值和速率值双控指标均达到极限值，与此同时，还出现下列情况之一时：实测的位移(或沉降)速率出现急剧增长；隧道或基坑支护混凝土表面已出现裂缝，同时裂缝处已开始渗流水。

注：对于桥梁监测，表中双控指标应为横向差异沉降值和纵向差异沉降值。

18.6.10 当实测数据出现任何一种预警状态时，监测组应立即向施工主管、监理、

建设和其他相关单位报告，获得确认后应立即提交预警报告。

发出黄色预警时，监测组和施工单位应加密监测频率，加强对地面和建筑物沉降动态的观察，尤其应加强对预警点附近的雨污水管和有压管线的检查和处理；发出橙色预警时，除应继续加强上述监测、观察、检查和处理外，应根据预警状态的特点进一步完善针对该状态的预警方案，同时应对施工方案、开挖进度、支护参数、工艺方法等作检查和完善，在获得设计和建设单位同意后执行；发出红色预警时，除应立即向上述单位报警外还应立即采取补强措施，并经设计、施工、监理和建设单位分析和认定后，改变施工程序或设计参数，必要时应立即停止开挖，进行施工处理。

18.6.11 现场巡视过程中发现下列情况之一时，必须立即进行危险报警，并对基坑支护结构和周边环境中的保护对象采取应急措施。

1 基坑支护结构或周边土体的位移突然明显增长或基坑出现流砂、管涌、隆起、陷落或较严重的渗漏等；

2 基坑支护结构的支撑出现过大变形、压屈、断裂、松弛或拔出的迹象；

3 周边建筑的结构部分、周边地面出现较严重的突发裂缝或危害结构的变形裂缝；

4 周边管线变形突然明显增长或出现裂缝、泄漏等；

5 根据当地工程经验判断，出现其他必须进行危险报警的情况。

18.6.12 无论何种级别的预警，一经发布，响应负责人应立即组织召开预警响应会议（预警分析会）研究处置方案，由各参建单位等参加，并形成会议纪要。

18.6.13 在监测数据稳定并符合消警条件后，提出消警申请并由监理总工程师根据预警等级组织相关人员召开消警会议，经过参会各方同意后，由第三方监测单位解除预警。

19 结构安全监测

19.1 一般规定

19.1.1 应在隧道的敏感地段和重要地段设置结构安全监测系统，及时掌握隧道结构运营期间的安全状况。

【条文说明】隧道所处地质条件、内外部环境一般都比较复杂，若运营期发生灾害，易造成重大的经济损失和不良的社会影响。国内外调查研究表明，建成的隧道有相当比例存在衬砌裂缝和渗漏水等病害现象，威胁隧道内行车安全、影响交通质量，缩短隧道的维护周期和使用年限。隧道病害直接影响隧道的使用性能，导致隧道在未达到设计使用年限时而急需维修，既浪费大量资金，又影响隧道的正常使用，缩短了隧道的维护周期和使用寿命。对于隧道发生的病害，只有遵循科学合理的隧道病害研究方法和原则，找到隧道病害的原因，评估病害的程度，才能制定出合理的处置方案。如何准确判定不同类型、特征、严重程度病害对隧道安全状况的影响程度是隧道结构安全监测（也称为结构健康监测）的重要任务。通过建立隧道结构安全监测系统，对工程运营期间的结构、环境性状作全过程的监测，以科学、准确地评估病害对结构承载能力、承载状态的影响规律和影响程度，可以为工程的维护、保养、安全决策及病害诊治提供科学依据。通过监测数据的科学评估，当隧道结构性态接近预警值时，采取相应处置措施，控制病害的进一步发展，延缓隧道病害的发展、延长隧道使用寿命并减少安全事故发生；当结构性态超过预警值时，根据病害特征采取相应的加固修复措施，以维持隧道结构安全，从而避免水下隧道结构巨灾的发生，降低隧道运行期公共安全的风险水平。

19.1.2 监测特征断面和监测项目的选择，应有针对性地结合隧道所处的具体情况选择，结构安全监测应符合下列规定：

- 1 监测的特征断面应根据隧道地质条件及环境条件确定。
- 2 监测的主要控制因素应根据结构受力特点确定。
- 3 在选择监测特征点及相应的监测项目时应充分利用结构分析计算的结果，以避免确定测点和监测项目的盲目性。

【条文说明】监测特征断面和监测项目的选择,应根据隧道所处的具体情况确定,主要是为了避免无针对性地布置监测断面。随着计算机软硬件和计算技术的不断发展,结构分析计算在结构设计和分析中已经得到越来越普遍的应用,在选择监测特征点及相应的监测项目时应充分利用结构分析计算的结果,以避免确定测点和监测项目的盲目性。

19.1.3 结构安全监测系统应包括数据采集、数据传输以及实现诊断功能的数据分析与预报预警等部分。安全监测系统可与施工期间的监控量测系统统一考虑。

【条文说明】隧道完整的结构安全监测系统设计内容及系统功能一般包括:数据采集、数据传输、数据库以及实现诊断功能的数据分析与预报预警系统。数据采集包括自动化监测和电子化人工巡测,数据传输包括无线传输、光纤、光缆传输等,对于人工巡测数据需要专人将巡测数据录入人工巡测管理软件系统。数据库系统主要用于存储监测及巡测过程中采集的各种数据。数据分析与预报预警系统基于监测得到的隧道结构不同物理量,参考相应规范,辅助以数值计算、统计分析,结合监测物理量长期变化趋势,对隧道结构安全状态进行综合评估与预警。

19.1.4 结构安全监测系统数据传输及处理应与运营管理系统统一考虑,并应采用可靠软件对结构工作状态及时进行评估与预警。

【条文说明】隧道施工期的监控量测数据是隧道全寿命周期工作状态的重要组成部分,可以为运营期的结构安全监测提供初始值。监测系统与施工期间的监控量测系统统一考虑,可以保持数据采集的连续性和完整性,监测系统与运营管理系统统一考虑,可以提高隧道运营期的管理效率。

19.1.5 结构安全监测系统的设计使用年限应根据监测需要确定。预埋于主体结构内对结构强度存在影响的元器件,其结构耐久性宜与主体结构一致。低于主体结构使用年限时,应保证元器件失效后主体结构的安全。

【条文说明】为了对主体结构在全寿命周期内进行结构安全监测,预埋于主体结构内对结构强度存在影响的元器件,元件结构本身的耐久性应该与与主体结构保持一致,比如预埋与衬砌中的土压力盒,渗压计,混凝土应变计和钢筋计等。若低于主体结构使用寿命,则应事先采取预防措施,或制定补救措施,以保证元器件失效后主体结构的安全。

19.1.6 结构安全监测系统应包括数据采集、数据传输以及实现诊断功能的数据分

析与预报预警等部分。

【条文说明】数据采集包括自动化监测和电子化人工巡测，数据传输包括无线传输、光纤、光缆传输等，对于人工巡测数据需要专人将巡测数据录入人工巡测管理软件系统。数据库系统主要用于存储监测及巡测过程中采集的各种数据。数据分析与预报预警系统基于监测得到的隧道结构不同物理量，参考相应规范，辅助以数值计算、统计分析，结合监测物理量长期变化趋势，对隧道结构安全状态进行综合评估与预警。安全监测系统可与施工期间的监控量测系统统一考虑。

19.2 监测内容

19.2.1 隧道运营期的结构安全监测宜采用仪器自动化监测与人工巡测相结合的方法，多种手段互为补充、相互印证。

【条文说明】结构安全监测一般可以采用自动化监测与人工巡测相结合的方法，多种手段互为补充、相互印证。结构的安全监测采用自动化监测，可以避免人工监测效率较低、受主观因素影响等不足；但自动化监测仪器一般费用较高，并且，当前仪器一般采用单点监测方法，在预埋仪器时，很难做到监测的部位刚好是隧道运营期病害出现的位置。人工巡测常常可以及时发现隧道结构的一些异常情况，如隧道结构裂缝、新增漏点、混凝土剥落、流砂等。这些病害发生的位置往往事先很难预见，自动化监测常常反映不出来。

19.2.2 安全监测系统中数据采集的内容应根据隧道结构类型、地质条件以及周边环境条件确定，可在下列内容中选择：

- 1 工作条件监测：土压力、水压力、覆盖层厚度、地层变形、腐蚀性离子等。
- 2 结构受力监测：混凝土应力、钢筋应力、接触面压力等。
- 3 结构变形监测：结构沉降变形、挠度、裂缝、收敛变形等。
- 4 结构材料监测：表面碳化深度、混凝土强度变化、钢筋腐蚀程度等。

【条文说明】根据隧道所处的内外环境情况不同，隧道结构安全监测可以分成工作条件监测，结构受力监测，结构变形监测和结构材料监测等内容。结构安全监测主要是为了掌握隧道结构的安全状态，因此监测的对象主要是隧道结构本身。而隧道衬砌外部的水土压力变化会导致隧道结构工作状态的变化，但是，隧道结构变形和内力的变化相对于外部水土压力荷载变化有所延迟，因此需要对隧道衬砌外部水土压力进行监测，以提前掌握衬砌结构工作状态可能的变化，同时其监

测数据可以与隧道结构的监测数据进行对比、综合分析、相互验证。

19.2.3 监测项目的选择应结合隧道的特点，并应符合表 19.2.3 的规定：

表 19.2.3 盾构隧道仪器监测项目表

序号	监测项目	监测类别
1	管片外水压力	必测
2	管片外土压力	必测
3	管片混凝土应变	必测
4	管片钢筋应力	必测
5	螺栓内力	必测
6	隧道断面收敛	必测
7	管片接缝张开量	必测
8	管片间不均匀沉降	必测
9	管片倾斜偏转	选测
10	管片裂缝	选测
11	隧道内温度	选测
12	混凝土碳化	选测
13	钢筋锈蚀	选测
14	隧道内有害气体浓度	选测

【条文说明】隧道的监测项目与隧道类型、隧道长度、隧道埋深、水深和地质情况等因素密切相关，监测项目主要反映监测对象的物理力学性能和周围环境。管片混凝土及钢筋应力直接体现隧道结构工作状态，应该进行监测。管片外水压力及土压力的监测，可以为结构受力状态分析提供依据。盾构隧道管片衬砌属于装配式衬砌，它与整体式衬砌的最大不同点是存在大量管片接头和环向接头，影响着衬砌的受力和变形。接头转角对结构的防水产生严重影响，接头的存在也影响着结构受。管片错缝的存在使得管片环之间的螺栓可以发挥纵向加强作用，管片接头处的薄弱部位得到加强，从而增加了结构的整体刚度，减小了结构的变形。因此螺栓内力、管片接缝张开量及错开量、隧道断面收敛是监测的重点。衬砌漏水位置事先很难预测，通过人工巡测检查比较简单、经济。有条件时可对管片裂缝、混凝土碳化、钢筋锈蚀等进行监测。

19.2.4 隧道符合下列条件时，宜进行专项结构安全监测：

- 1 基本地震烈度高于 7 度时，宜进行地震动监测。
- 2 隧道埋深受冲刷控制时，宜进行覆盖层厚度监测。
- 3 隧道周边有敏感建构筑物时，宜进行隧道周边土体的水土压力及变形监测。
- 4 隧道采用新型结构或新工法时，宜进行结构内力监测。
- 5 地基为软弱土层或纵向地质条件变化较大时，隧道宜进行纵向变形监测。

【条文说明】隧道结构位于地下，一般具有较好的抗震性能。但是，对于高地震

烈度地区的隧道，地震对结构受力有一定影响。隧道的覆土厚度对保证隧道的运营抗浮安全非常重要，河床（海床）的冲刷对隧道覆土厚度影响很大，因此盾构隧道埋深受冲刷控制时进行覆盖层厚度监测很有意义。隧道采用新型结构或新工法时，出于积累资料、技术进步的考虑，进行结构内力监测，可掌握新型结构或新工法的特点，为今后的推广应用做好技术储备。当地基为软弱土层时，盾构隧道的纵向变形较大，当地基纵向地质条件变化较大时，盾构隧道的纵向变形不均匀，上述两种情况易导致隧道结构变形和内力过大，进行纵向变形监测对掌握隧道的工作状态很有帮助。

19.2.5 应在隧道运营期间定期进行补充检测。隧道补充检测以人工巡测为主，辅以工器具。补充检测宜包括下列内容：

- 1 隧道结构钢筋的锈蚀情况及混凝土碳化情况；
- 2 隧道内渗漏情况；
- 3 监测基准点、监测点完好情况；
- 4 监测元件的完好及保护情况；
- 5 有无影响观测、监测工作的障碍物。

【条文说明】隧道的人工巡测是预防隧道发生工程事故非常简便、经济而又有效的方法。本条列出了人工巡测的主要内容，这些项目的确定是根据已有水下隧道的工程实践总结出来的，具有较好的参考价值。监测单位在具体的工程中可根据工程的具体情况，进行相关项目的巡测，也可补充新的巡测内容。

19.3 监测要求

19.3.1 隧道结构安全监测监测点的布置应能反映监测对象的实际状态及变化趋势，监测点应布置在内力及变形关键特征断面的特征点上，并应满足监控要求。

【条文说明】监测项目的设置与工程规模、隧道结构形式、周边环境和监测目密切相关。在地质条件比较复杂，外荷载比较大的位置和结构受力比较大的部位，是需要重点关注。本条针对监测断面和监测点的布置，强调从经济性和可靠性方面考虑，把有限的资金用在最关键的地方。

19.3.2 监测点应避开障碍物，便于观测。保证量测通视，以减小转站引点的误差

【条文说明】本条规定是为了保证量测通视，以减小转站引点的误差。观测标志

的形式和埋设可以参照国家现行标准《建筑变形测量规范》JGJ 8 执行。

19.3.3 隧道结构安全监测监测断面位置的选择应考虑下列因素：

- 1 隧道埋置深度及水深：覆盖层厚度较大及变化较大地段，水深较大地段。
- 2 隧道地质条件：地质条件较差地段。
- 3 隧道所处环境条件：环境复杂及邻近建构筑物较多地段。
- 4 断面受力条件：隧道断面复杂、受力较大的部位。

【条文说明】隧道覆盖层厚度较大及变化较大地段一般会产生不均匀沉降，水深较大地段衬砌外水压力较大。地质条件较差地段，衬砌外部土压力较大。隧道所处环境复杂及邻近建构筑物较多地段，对隧道结构的变形要求严格。断面形态复杂、受力较大地段，内力一般较大。因此，监测断面的位置的选择需要综合考虑以上因素。

19.3.4 在隧道符合下列条件时，宜进行结构安全监测工作：

- 1 覆盖层厚度在纵向或横向出现较大变化的地段。
- 2 基底地质条件纵向变化较大的地段。
- 3 埋深小于 1 倍洞径或大于 3 倍洞径的地段。
- 4 水深大于 25m 的地段。

【条文说明】覆盖层厚度在纵向或横向出现较大变化的地段和基底地质条件纵向变化较大的地段，盾构隧道不均匀沉降较大，易导致隧道结构接缝张开量和内力增大。隧道埋深小于 1 倍洞径的地段，盾构隧道抗浮安全受河床（海床）冲刷影响较大，而埋深大于 3 倍洞径的地段，外部土压力较大。水深大于 25m 的地段，衬砌外水压力较大。

19.3.5 隧道外荷载监测点、混凝土和钢筋应力监测点应布置在结构受力较大的代表性部位，隧道的拱顶、拱底和拱腰宜布置监测点。

【条文说明】混凝土和钢筋应力监测点应在衬砌内侧和外侧对称布置。盾构衬砌一般由多块预制管片通过螺栓连接形成整体结构，事先很难精确确定每块管片分块运营期在断面的相对位置，而且钢筋计和混凝土应变计监测的数据一般离散性比较大，因此盾构管片的每个分块都预埋钢筋计和混凝土应变计。

19.3.6 隧道不均匀变形监测点应布置在隧道埋深变化较大段和地质条件变化较大段。

【条文说明】在隧道纵坡变化较大段和地质条件变化较大段，隧道不均匀沉降比较大，因此，要求隧道不均匀变形监测点应布置在隧道埋深变化较大段和地质条件变化较大段。

19.3.7 混凝土碳化监测和钢筋锈蚀监测宜采用自动化监测，也可采用人工巡测。采用自动化监测时，隧道纵断面最低处，废气浓度相对较高，对混凝土碳化影响较大，宜布置混凝土碳化监测点，潜在渗漏区宜布置钢筋锈蚀监测点。

【条文说明】采用自动化监测混凝土碳化和钢筋锈蚀，效率较高，但一般只能单点监测，可能漏掉一些衬砌上的碳化和钢筋锈蚀部位，故可以采用人工巡测。隧道纵断面最低处，废气浓度相对较高，对混凝土碳化影响较大，混凝土碳化监测点应该布置在这些地方。

19.3.8 结构安全监测数据采集精度应满足结构工作状态评估及预报预警的需要。

【条文说明】监测仪器的量程，采集精度和分辨率的确定关系到结构安全监测系统的有效性和可靠性。合理的量程、精度和分辨率取决于监测项目的必要性和可能性两个方面。

19.3.9 结构安全监测的元器件选择及其参数应根据监测内容与评估要求确定。

【条文说明】本规范根据国内外监测仪器的发展和使用情况，针对公路水下隧道的结构特性确定监测仪器的量程、精度和分辨率要求。一般监测仪器的精度与其量程有关，量程大的仪器，其监测精度绝对数值相对较低。从实际情况看，元器件的最大量程大于设计值的2倍没有必要。要测定出监测项目的变化规律，测值的误差应远小于监测量。元器件的最大量程不宜大于设计值的2倍，精度不宜低于0.5%F.S，分辨率不宜低于0.2%F.S。

19.3.10 结构安全监测系统的信息采集应符合下列规定：

- 1 水土压力等外荷载数据精度不宜低于10kPa。
- 2 钢筋内力数据精度不低于1MPa，混凝土应变数据精度不宜低于 $10\mu\epsilon$ 。
- 3 结构变形数据精度不宜低于0.1mm。
- 4 地层位移变形数据精度不宜低于1mm。
- 5 结构裂缝宽度数据精度不宜低于0.1mm。

【条文说明】监测仪器的精度需要综合监测项目的特点、必要性和可能性后进行确定，本条规定是结构安全监测仪器采集精度的最低要求，在特殊情况下，监测

精度可根据实际情况，在设计中确定。

19.3.11 结构安全监测频率应根据隧道所处地质条件、受力条件、设计结果及当地经验等因素确定，应能满足所监测项目的重要变化过程而又不遗漏其变化时刻。无当地经验时，可根据地质条件、受力条件、设计结果及表 19.3.11 确定。

表 19.3.11 结构安全监测周期及监测频率表

监测周期	监测时段	监测频率
运营期	第一年	1 次/星期
	一年后	1 次/月
	发生异常时	2 次/d

注：发生台风、沉船、地震等偶然事件时，应按每小时监测一次或根据现场情况确定监测频率。

【条文说明】隧道所处地质条件、受力条件和环境变化是水下隧道监测频率应考虑的主要因素。同时监测频率应满足能反映监测项目的重要变化过程而又不遗漏其变化时刻的要求。隧道结构安全监测的频率不是一成不变的，隧道在运营的各个阶段对监测工作的要求各不相同，因此可针对不同监测时段，提出不同的监测频率。相对于施工期，隧道在运营期的受力条件和环境变化较小，因此监测频率也相对施工期较低。隧道运营期初期相对稳定运营期，外部荷载和环境变化较大，监测数据非常关键，监测频率一般较高。一年以后，可以认为隧道进入稳定运营时期，监测频率可稍低。数据发生异常或临近预警状态时，应该提高监测频率，甚至连续监测。本条给出了监测频率的最低要求，基本能满足隧道运营期监控的需要，在确定监测频率时可选用。

19.3.12 应根据水下隧道所处地质条件、受力条件、设计结果及当地经验等因素确定监测预警值，预警值应满足隧道设计及周边环境中被保护对象的控制要求。

【条文说明】监测预警是工程实施结构安全监测的目的之一，是预防隧道工程事故发生、确保隧道及周边环境安全的重要措施。监测报警值是监测工作的实施前提，是监测期间对隧道工程正常、异常和危险三种状态进行判断的重要依据，因此隧道工程结构安全监测必须确定监测报警值。隧道的监测预警值不是一个固定不变的值，随着隧道工作年限的增加，结构材料的老化，预警值是不断变化的。因此，管理部门应定期组织专家分析论证，及时提出变化后的预警值。

隧道运营初期，监测报警值一般可根据隧道设计计算结果、周边环境中被保护对象的控制要求和隧道所处周边环境等因素综合考虑确定。在隧道正常运营期间，预警值可根据极限状态法，置信区间法等方法提出。确定隧道预警值的基础

是监测资料，因此必须十分注意监测系统的可靠性、稳定性，以及监测资料的连续性和准确性。

19.3.13 在有条件的情况下，应该优先采用无线传输方式。

【条文说明】大型公路盾构隧道进行有效的监测要求各种传感器数量在数百量级以上，这样大规模的多点、多参数、远距离数据传输，需铺设大量的光纤、电缆，在环境条件复杂的情况下，操作起来十分复杂和繁琐，占用大量人力物力。此外，大量传输导线还存在布设空间等问题，在监测仪器埋设和运营期长期的监测过程中，光纤、光缆易损坏。采用无线传输方式，可以避免这些不足，在有条件的情况下，应该优先采用。数据分析宜根据隧道结构特点及数据采集类型编制针对性的评估软件，确保结构评估与预警的准确性。

19.3.14 应建立隧道结构安全预警与综合评估子系统，对在线监测和人工巡测得到的各类数据进行统一的处理分析，对隧道结构进行异常诊断、预警及结构安全状态评估。

【条文说明】随着计算机技术的推广和普及，隧道结构安全监测工作应建立以计算机为基础的监测资料数据库或信息管理系统。这不仅是因为监测数据量大，整编工作困难，而且可使监测数据的调用快速方便，满足对隧道监测的需要。隧道结构安全预警与综合评估系统的内容一般包括以下几个方面的内容：

- 1 对巡测、监测及识别的结果进行历史趋势对比、分析与预测；
- 2 对结构异常状态进行识别和诊断，给出异常发生的大致位置和程度；
- 3 对结构危险状态及时识别，并分级预警；
- 4 结合自动监测、人工巡测数据和其他相关数据（包括隧道基础资料、施工监控等）对结构的整体工作状态进行分析评估；
- 5 按指定程序自动生成在线分析报告；
- 6 根据需求定期生成离线综合分析报告；
- 7 评估结果应明确、直观，面向多级结构管理人员；
- 8 根据评估结果给出相应的维护管养建议。

19.3.15 应建立结构安全监测用户界面子系统，通过该模块实现将各种数据实时按需求向用户展示，并接受用户对系统的控制、输入与功能扩展。

【条文说明】用户界面子系统将各种数据实时按需求向用户展示，并且接受用户对系统的控制与输入。作为一个完整的系统人机交互子系统进行设计，用户界面管理主要提供自动化监测，人工监测和运营管理等系统的人机界面，系统在具有技术先进、易用、操作方便、直观易懂的前提下，具备向用户提供操作及管理界面、向用户提供数据表示、向用户提供报告，并满足网络发展办公的需求，同时具有可扩展性。

19.3.16 应建立结构安全监测中心数据库子系统，通过该模块实现整个大系统所有数据的平台管理工作，完成数据的归档、查询、存储，文件来往的管理、工作安排、进度控制等。

【条文说明】结构安全监测中心数据库子系统一般基于自动化办公平台，实现整个大系统所有数据的平台管理工作，完成数据的归档、查询、存储，文件来往的管理、工作安排、进度控制等。通过建立该子系统，统一管理组织数据信息，给系统的维护与管理提供便利，也为各应用子系统提供可靠的分布式数据交换与存储平台，方便开发与使用。

20 风险分析

20.1 一般规定

20.1.1 公路盾构隧道应在前期方案研究阶段、初步设计阶段及施工图设计阶段进行安全风险分析，各阶段的风险分析应有不同侧重点。

【条文说明】勘测设计阶段按时间先后次序分为前期方案研究阶段、初步设计阶段与施工图设计阶段。本阶段是决定建设工程风险管理效果的关键阶段，也是风险分析和管理的重点阶段。本章所强调的设计风险分析是指工程设计所涉及的各方面的不确定性风险，如造价、工期、环境保护等等，而不仅限于安全风险。风险分析既包括工程的风险分析，同时也包括对设计本身风险的分析。风险分析的结果是方案比选的重要依据，并为方案的优化提供参考。根据不同设计阶段的任务与特点，相应的风险分析重点也有所不同。

在工可研究阶段，进行风险分析的资料还比较缺乏，合理可行的风险分析主要是根据工程勘察资料与工程可行性研究报告，针对工程建设条件（如地质条件、区域经济发展规划等），对不同隧道线位、结构、工法进行宏观风险辨识、分析。这一阶段的风险分析，主要是辨识与分析不同线位与工法可能存在的重大风险。

在初步设计阶段，在工可研究阶段风险分析的基础上，根据勘察与设计文件，从隧道建设条件、结构方案、施工技术及运营管理等方面进行风险源与风险事件的辨识，综合分析工程潜在的风险，为隧道总体布置、结构设计、工法选择的决策提供依据。

在施工图设计阶段，结合初步设计审查意见，重点对施工工法、施工方案及结构方案可能存在的风险进行分析。对于典型风险在采取措施后风险等级仍较高，且无法通过设计减轻的，需要制定合理可行的应急救援预案。

20.1.2 各阶段风险分析可根据其特点要求，采取相应的评估方法。前期研究阶段宜采用风险指标体系法，也可采用信心指数法；初步设计阶段可采用检查表法、专家调查法、事故树法及层次分析法等；施工图设计阶段可采用专家调查法、层次分析法、事故树法及模糊综合评判分析法等。

【条文说明】国内现阶段风险评估方法相对简单、明了，大部分采用的都是定性

或定性与定量相结合的评估方法，如以专家调查法、头脑风暴法为基础的层次分析法和模糊综合评估法，以风险概率和风险后果综合作用的风险矩阵法等定性和半定量的评估方法，以作业环境危险程度为评价依据的 LEC 法以及基于专家调查的信心指数法等。

20.1.3 前期研究阶段各方案可根据工程风险评估指标体系指标赋值情况计算确定其风险等级。设计阶段应根据风险发生概率和风险损失情况进行风险等级划分，风险等级判别按 3.0.16 条确定。

20.1.4 设计阶段工程安全风险发生概率等级分为 1、2、3、4、5 级，各等级判断标准见表 20.1.4。

表 20.1.4 风险发生概率等级判断标准

等级	定量判断标准（概率区间）	定性判断标准
1	$P_f < 0.0003$	几乎不可能发生
2	$0.0003 \leq P_f < 0.003$	很少发生
3	$0.003 \leq P_f < 0.03$	偶然发生
4	$0.03 \leq P_f < 0.3$	可能发生
5	$P_f \geq 0.3$	频繁发生

注：① P_f 为概率值，当概率值难以取得时，可用年发生频率代替。

②风险发生概率等级应优先采用定量判断标准确定。当无法进行定量计算时，可采用定性判断标准确定。

20.1.5 设计阶段工程安全风险损失等级分为 1、2、3、4、5 级。应按人员伤亡等级、经济损失等级及环境影响等级等因素确定。当多种损失同时产生时，应采用就高原则确定风险损失等级。

1 人员伤亡：是指在参与工程建设活动过程中所发生的人员伤亡事故。依据人员伤亡的类别和严重程度进行分级，见表 20.1.5-1。

表 20.1.5-1 人员伤亡等级判断标准

等级	判断标准
1	重伤人数 5 人以下
2	3 人以下死亡（含失踪）或 5 人以上 10 人以下重伤
3	3 人以上 10 人以下人员死亡（含失踪）或 10 人以上 50 人以下重伤
4	10 人以上 30 人以下人员死亡（含失踪）或 50 人以上 100 人以下重伤
5	30 人以上人员死亡（含失踪）或 100 人以上重伤

2 经济损失：是指风险事故发生后造成工程项目发生的各种费用的总和，包括直接费用和事故处理所需的各种间接费用，见表 20.1.5-2。

表 20.1.5-2 经济损失等级判断标准

等级	判断标准
1	经济损失 500 万元以下

2	经济损失 500 万元以上 1000 万元以下
3	经济损失 1000 万元以上 5000 万元以下
4	经济损失 5000 万元以上 10000 万元以下
5	经济损失 10000 万元以上

3 环境影响：是指隧道施工对周围建（构）筑物破坏或损害、环境污染等，根据其影响程度进行分级，见表 20.1.5-3。

表 20.1.5-3 环境影响等级判断标准

等级	判断标准
1	涉及范围很小，无群体性影响，需紧急转移安置人数 50 人以下
2	涉及范围较小，一般群体性影响，需紧急转移安置人数 50 人以上 100 人以下
3	涉及范围大，区域正常经济、社会活动受影响，需紧急转移安置人数 100 人以上 500 人以下
4	涉及范围很大，区域生态功能部分丧失，需紧急转移安置人数 500 人以上 1000 人以下
5	涉及范围非常大，区域内周边生态功能严重丧失，需紧急转移安置人数 1000 人以上，正常的经济、社会活动受到严重影响

20.1.6 公路盾构隧道的风险分析过程包括风险辨识、风险分析、风险评价及风险控制。

1 风险辨识主要是分析工程建设阶段所有的潜在风险因素，进行归类整理，筛选，重点考虑那些对目标参数影响较大的风险因素。

2 风险分析主要是对典型风险事件发生的概率及其可能造成的损失程度进行分析和估计，给出风险的概率分布。风险损失应考虑在隧道施工及运营中可能导致的人员伤亡、经济损失、工期延误及环境影响等方面。

3 风险评价是指对风险事件参照一定标准进行评判。

4 风险控制主要是针对典型风险事件的安全风险等级评估结果，提出相应的风险控制措施建议。

20.2 前期研究风险分析

20.2.1 在前期研究阶段，公路盾构隧道风险宜主要考虑安全风险、环境影响风险、工期风险及造价风险。

20.2.2 在前期研究阶段，公路盾构隧道风险分析宜采用风险指标体系法，也可采用信心指数法。

20.2.3 前期研究阶段公路盾构隧道安全风险产生的主要因素应结合项目实际进行识别，可参考表 20.2.3。

表 20.2.3 前期研究阶段安全风险因素识别表

类目	风险因素
----	------

安全风险	盾构始发与接收	盾构始发与接收处工程地质情况
		盾构始发与接收处水文地质情况
		盾构始发与接收处周围环境敏感度
	开挖面失稳	工作面前方是否存在不均匀地层
		工作面前方是否存在流砂地层
		工作面前方是否存在地层空洞
		是否穿越超浅覆土
		工作面前方是否存在承压水
	涌水、涌砂	超浅覆土
		地层存有空洞
		穿越全断面流沙
		穿越地层含承压水
	结构安全	盾构隧道直径大小
		水压大小
		土压大小
		河底冲刷程度
		地下水腐蚀性
	水下高压换刀	软硬岩分布不均地层
		含孤石地层
		水压大小
		土压大小
	遇到障碍物风险	含孤石、大石块地层
		遇到钢筋混凝土桩、废钢材等
旧桥台、人防工事等		
联络通道施工	联络通道设置情况	
	联络通道处的地层条件	
通风	隧道长度	
	通风井设置情况	
交通安全	平纵线形指标	
	与规划路网协调情况	
	交通疏解情况	
防灾救援	逃生通道设置情况	
	联络通道设置情况	
	防淹门方案	

20.2.4 前期研究阶段公路盾构隧道环境影响风险产生的主要因素应结合项目实际进行识别，可参考表 20.2.4。

表 20.2.4 前期研究阶段环境影响风险因素识别表

类目	风险因素
环境影响	既有构筑物变形影响程度
	既有管线破损影响程度
	盾构施工对堤岸码头的影响程度
	泥浆排放对生态环境影响程度
	对周围景观环境的影响程度

20.2.5 前期研究阶段公路盾构隧道工期风险产生的主要因素应结合项目实际进行识别，可参考表 20.2.5。

表 20.2.5 前期研究阶段工期风险因素识别表

类目	风险因素
工期风险	存在软硬岩不均匀分布地层
	存在地层空洞
	盾构掘进遇到障碍物
	穿越浅覆土地层
	周围环境敏感程度
	社会影响因素

20.2.6 前期研究阶段公路盾构隧道造价风险产生的主要因素应结合项目实际进行识别，可参考表 20.2.6。

表 20.2.6 前期研究阶段造价风险因素识别表

类目	风险因素
造价风险	运营收入
	工程投资
	资金来源
	运营成本

20.2.7 前期研究阶段对项目风险的风险程度进行分析，可采用风险指标体系法，评估指标体系中各指标所赋分值应结合工程实际，综合考虑各种因素影响程度而定，主要评估指标的分类、赋值标准可参考表 20.2.7。评估指标也可以根据工程实际进行相应的增加或删除，同时风险分级标准也须进行相应调整。

表 20.2.7 前期研究阶段工程风险评估指标体系

评估指标	权重	风险因素		分值	说明
安全风险 (A1)	0.35	盾构始发与接收	工程地质情况	0~3	
			水文地质情况	0~3	
			周围环境敏感度	0~2	
		开挖面失稳	不均匀地层	0~2	
			穿越全断面流沙	0~2	
			地层空洞	0~2	
			超浅覆土	0~2	
			承压水	0~2	
		涌水、涌砂	超浅覆土	0~3	
			地层空洞	0~3	
			穿越全断面流沙	0~3	
			承压水	0~3	
		结构安全	盾构直径大小	0~3	
			水压大小	0~2	
			土压大小	0~1	
			河底冲刷程度	0~1	
			地下水腐蚀性	0~1	
		水下高压换刀	软硬岩分布不均地层	0~5	
			含孤石地层	0~5	
			水压大小	0~3	
土压大小	0~2				
遇到障碍物风险	含孤石、大石块地层	0~5			
	遇到钢桩、废钢材等	0~5			

		联络通道施工	旧桥台、人防工事等	0~5	
			联络通道设置情况	0~5	
		通风	地层条件	0~5	
			隧道长度		
		交通安全	通风井设置情况	0~5	
			平纵线形指标		
			与规划路网协调情况		
		防灾救援	交通疏解情况	0~5	
			逃生通道设置情况	0~2	
			联络通道设置情况	0~2	
环境影响 风险 (A2)	0.2	防淹门方案		0~2	
		既有建筑物影响		0~20	
		既有管线影响		0~20	
		堤岸码头影响		0~20	
		泥浆排放对生态环境影响		0~20	
工期风险 (A3)	0.2	景观环境影响		0~20	
		软硬岩分布		0~20	
		存在地层空洞		0~15	
		障碍物		0~20	
		浅覆土层		0~20	
		环境敏感程度		0~15	
造价风险 (A4)	0.25	社会影响因素		0~10	
		运营收入		0~25	
		工程投资		0~25	
		资金来源		0~25	
		运营成本		0~25	
					当环境敏感度要求很高时,应适当调整其权重
					当工期超过期望值较多时,应适当提高其权重
					当造价超过期望值较多时,应适当提高其权重

20.2.8 前期研究阶段公路盾构隧道总体风险计算公式为： $R=A1+A2+A3+A4$ ，其中，A1 指隧道安全风险所赋分值；A2 指隧道环境影响风险所赋分值；A3 指隧道工期风险所赋分值；A4 指隧道投资风险所赋分值。

20.2.9 计算得到总体风险值 R 后，对照表 20.2.9 确定隧道工程施工安全总体风险等级。

表 20.2.9 前期研究阶段公路盾构隧道总体风险分级标准

风险等级	计算分值 R
等级Ⅳ（极高风险）	80~100 分
等级Ⅲ（高度风险）	60~80 分
等级Ⅱ（中度风险）	30~60 分
等级Ⅰ（低度风险）	0~30 分

20.2.10 在前期研究阶段，针对项目风险程度的评估结果，应根据不同的风险因素提出相应的规避和防范对策。

20.3 初步设计阶段风险分析

20.3.1 公路盾构隧道初步设计阶段安全风险评估，应对设计文件中同深度比选的多个设计方案同时进行安全风险评估。根据评估结果，视风险等级对初步设计方案进行修改完善。若风险等级极高时，应对初步设计方案进行重新论证。

【条文说明】工程安全风险评估应结合初步设计阶段的特点，针对隧道工程的建设条件、结构方案、施工技术以及运营等方面的风险，开展相应的安全风险评估工作。新技术、新材料、新设备的应用风险，应综合考虑创新与风险可承受能力之间的平衡。根据安全风险评估结果，按照技术可行性及经济合理性的原则，提出相应的风险控制措施。设计单位应根据安全评估提出的风险控制措施，及时对设计文件进行修改完善。初步设计阶段安全风险评估报告，应作为下一阶段评估的重要依据和基础。

20.3.2 初步设计阶段隧道安全风险评估分为单一风险事件的分段评估、单一风险事件的整体评估和隧道总体风险评估。

1 单一风险事件的分段评估，是指评估某一风险事件（如突水、开挖面失稳等）在隧道沿线某一区段的风险等级，给出不同区段的风险等级。

2 单一风险事件的整体评估，是指根据单一风险事件的分段评估结果，评估隧道某一风险事件的风险等级。

3 隧道总体风险评估，是指根据隧道单一风险事件的评估结果，评估隧道多个风险事件情况下的综合风险等级。

【条文说明】由于公路隧道通常较长，可能由不同的建造单元组成，且隧道所穿越的地层、周边环境等差别较大，因此设计阶段的风险分析建议分段进行。

对于类似突水涌泥、大变形等重大风险事件，与隧道所穿越的地层和工法密切相关，因此建议根据地层构造与工法转换等作为沿隧道长度方向的单元划分依据，并根据每一个单元的条件，对风险事件进行分析，给出风险事件沿隧道长度方向的等级分布图。

在得到风险事件的分段（单元）风险等级后，为综合比较不同风险事件或风险源的风险大小，需要在整体隧道规模上，对风险事件的总体风险大小进行评定。一般对各单元的风险等级进行加权求和，最后结果作为隧道整体的风险等级。

20.3.3 采用盾构法施工的公路隧道，初步设计阶段宜典型安全风险事件进行评估，风险事件识别应结合具体工程进行，可参考表 20.3.3。

表 20.3.3 初步设计阶段公路盾构隧道典型风险参考表

序号	典型风险事件	序号	典型风险事件
1	盾构选型风险	8	地表异常变形风险
2	盾构始发与接收风险	9	漏水漏浆风险
3	盾构开挖面失稳风险	10	轴线偏离过大风险
4	涌水、涌砂风险	11	联络通道施工风险
5	盾构掘进中遇到障碍物风险	12	管片结构安全风险
6	水下高压换刀风险	13	环境影响风险
7	盾构机沉降、冒顶风险	14	运营安全风险

20.3.4 公路盾构隧道设计阶段典型风险事件相应的风险源可分为四个大类，包括隧道建设条件、结构工程方案、施工技术以及运营管理。

1 隧道建设条件风险是指由于地形地貌、工程地质、水文地质、地下障碍物及地震烈度等因素（风险源）所导致的风险。

2 结构工程方案风险是指由于设计方法、计算参数或者设计方案以及采用新材料、新技术等因素（风险源）所导致的风险。

3 施工技术风险是指由于施工方案、施工工艺以及采用新材料、新技术、新工艺等因素（风险源）所导致的风险。

4 运营管理风险是指由于初步设计阶段隧道线形（平面线形、纵坡、横断面）、通风方案、救援方案、监控方案等因素（风险源）所导致的风险。

【条文说明】公路盾构隧道的风险源多，风险事件复杂，加上目前对工程风险还没有一个统一的定义，因此参考国际隧道协会的风险管理指南，以及交通运输部颁布的《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南（试行）》，并考虑公路水下隧道工程建设的特点，开展风险源与风险事件的风险等级评定。

20.3.5 盾构机选型风险分析宜针对盾构机在水土压力作用下的适应性、技术可靠性以及管理操作等。对大、新型盾构机的选型必须开展风险分析与评估，复合地层条件下应重视盾构刀盘与刀具的可靠性、可维修性及可更换性。盾构选型风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.5 公路隧道盾构选型风险因素参考表

典型风险事件	风险因素	
盾构选型	盾构刀盘对地层适应性	盾构刀盘形式
		盾构刀盘的驱动方式
		刀盘的支承形式
		刀盘的最大转速、扭矩

		刀盘开挖、超挖直径
		盾构刀盘的开口率
		主轴密封耐久及有效性
	盾构刀具布置对地层适应性	刀具对岩土体的切削能力
		刀具布置的高度差
		刀座安装方式是否考虑换刀方便性及不同刀具座是否通用
		刀具的耐磨性
		刀具的布置数量
		轴向转动力矩、推力、脱困扭矩
		各刀间距布置是否合理
		仿形刀的数量、工作压力、转速计转动角度
	盾体	盾壳刚度对水土压力的适应性
		盾壳强度对水土压力的适应性
	推进系统	千斤顶的布置方案
盾尾密封设计		

【条文说明】盾构机选型是决定盾构法施工是否能成功的关键因素之一。盾构机选型主要考虑地质条件、地形水压状况、周边环境条件及场地条件等。而盾构对地层的适应性，基本取决于刀盘设计是否合理。盾构机设计原则根据围岩条件、隧道断面大小形状、施工方法进行。设计首先应使盾构能承受围岩压力，确保安全施工，其次应综合考虑施工的经济性。盾构在其施工的区间通常会遇到各种复杂多变的条件，因此，根据对这些条件的调查，选用结构强度和刚度足以适应这种变化的、耐久性、施工方便、安全性和经济性优异的盾构。对盾构来说，砂卵石地层、软硬不均地层、泥质粉砂岩泥岩地层等属于不良地层，盾构机设计应从刀盘、驱动系统、渣土改良系统、刀盘冲洗系统等细节方面进行充分考虑。

20.3.6 盾构机始发与接收风险分析宜针对工作井构造合理性、工作井围护结构的安全性、始发与接收段地层加固方法、盾构始发与接收的方式及对周边环境的影响等，盾构机始发与接收风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.6 公路盾构隧道始发与接收风险因素参考表

典型风险事件	风险因素
始发与接收风险	工作井围护结构不当
	端头地层加固处理不当
	后靠不稳
	凿除洞门出现涌砂涌水
	轴线偏离
	盾构机磕头或被掩埋
	密封失效导致漏水漏浆
	刀盘“抱死”等
	周边道路、建筑物、管线沉降大
	施工参数不合理

【条文说明】盾构始发与到达的基本目标，是防止破除洞门过程中的地层失稳及防止地下水喷涌，因此从地层、地下水、盾构类型、覆土厚度、作业环境、洞门密封、进出竖井前的地层加固和地层与竖井间的堵水注浆质量等方面来进行风险分析。

20.3.7 公路盾构隧道开挖面失稳风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.7 公路盾构隧道开挖面失稳风险因素参考表

典型风险事件	风险因素
开挖面失稳风险	土仓压力、泥浆性能等施工参数不合理
	工作面前方存在不均匀地层
	工作面前方存在流砂地层
	工作面前方存在地层空洞
	穿越超浅覆土
	工作面前方存在承压水
	隧道埋深突变
	盾构机长时间停顿
	换刀时开挖面支护失效

20.3.8 公路盾构隧道涌水涌砂风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.8 公路盾构隧道涌水涌砂风险因素参考表

典型风险事件	风险因素
涌水涌砂	土仓压力控制不当
	前面有地层空洞
	前面有全断面流沙
	前面有承压水
	接头漏水漏浆未及时处置

20.3.9 公路盾构隧道施工期间遇到障碍物风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.9 公路盾构隧道遇到障碍物风险因素参考表

类目	风险因素
遇到障碍物风险	含孤石地层
	遇到钢筋混凝土桩
	遇到大石块、废钢材
	旧桥台
	沉船
	哑炮弹
	人防工事等

20.3.10 公路盾构隧道掘进施工期间水下高压换刀风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.10 公路盾构隧道水下高压换刀风险因素参考表

类目	风险因素
水下高压换刀风险	气压设置不合理
	压缩机故障
	发生气管爆裂

	膨润土浆液气密性不好或失效
	加压或减压不当
	焊接等引发火灾或沼气爆炸
	开挖面、盾尾及管片漏气

20.3.11 公路盾构隧道掘进施工期间盾构机沉降、冒顶风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.11 公路盾构隧道盾构机沉降、冒顶风险因素参考表

类目	风险因素
盾构机沉降、冒顶风险	注浆参数控制不当，注浆参数包括注浆类型、注浆压力、注浆量、浆液配比及注浆是否及时等。
	遇到含空洞地层
	遇到软弱地层，如暗滨
	穿越超浅覆土地层
	掘进面失稳，如出现流砂、管涌
	盾构停顿

20.3.12 公路盾构隧道掘进施工期间地层异常变形风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.12 公路盾构隧道地表异常变形风险因素参考表

类目	风险因素
地表异常变形风险	注浆参数控制不当产生的土体过大扰动
	土仓内压力控制不当
	遇到流砂地层
	地层空洞
	河床突然变化
	盾尾密封失效
	管片接头漏水漏浆
	盾构机沉降、冒顶

20.3.13 公路盾构隧道漏水漏浆风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.13 公路盾构隧道漏水漏浆风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	漏水漏浆	盾尾密封失效
2		管片密封失效
3		注浆压力控制不当
4		铰接密封装置失效
5		未及时进行嵌缝与堵漏

20.3.14 公路盾构隧道轴线偏离过大风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.14 公路盾构隧道轴线偏离过大风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	轴线偏离过大	轴线控制不当
2		出现超挖、欠挖
3		前面有地层空洞
4		纠偏不及时或纠偏不到位
5		偏离目标井

20.3.15 公路盾构隧道联络通道施工安全风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.15 公路盾构隧道联络通道施工安全风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	联络通道施工风险	钢管片拆除不当
2		盲区地基加固处理欠妥
3		冷冻效果较差
4		地下水及地下结构物影响冻结效果
5		暗挖施工不当
6		临时支护强度不够
7		渗漏水

20.3.16 管片结构安全风险分析主要影响因素可参考下表确定。宜针对管片形式、强度、接头防水、拼装方式、管片的抗水压能力、结构防腐蚀设计可靠性、结构和接头的耐久性等。

表 20.3.16 公路盾构隧道管片结构安全风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	结构安全风险	管片形式
2		管片强度
3		管片抗水压能力
4		盾构壁厚注浆压力
5		拼装方式
6		管片拼装时碰撞
7		隧道结构上浮
8		接头防水
9		接头耐久性
10		结构防腐蚀设计可靠性

20.3.17 临近环境风险分析宜针对盾构穿越以及隧道后期运营对临近岸边敏感建（构）筑物的影响，主要风险因素可参考下表确定。

表 20.3.17 公路盾构隧道环境影响风险因素参考表

类目	风险因素
环境影响	既有建构筑物、管线破损
	盾尾密封失效引起地表过大沉陷甚至冒顶
	下穿堤岸码头
	泥浆排放浓度不达标
	泥浆排放地点不合理

20.3.18 公路盾构隧道运营安全风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.3.18 公路盾构隧道运营安全风险因素参考表

类目	风险因素
运营安全影响	平纵线形
	平面线形指标
	纵面线形指标
	通风方案
	防灾救援方案
	防淹门设计
	监控方案

	照明方案
	交通量

20.3.19 初步设计阶段公路盾构隧道工期风险产生的主要因素应结合项目实际进行识别，可参考表 20.3.19。

表 20.3.19 初步设计阶段工期风险因素识别表

类目		风险因素
工期风险	机械磨损及故障	泥浆泵及管路堵塞
		刀盘刀头磨损
		主轴承磨损或断裂
	施工过程中碰到困难	地层空洞等引起轴线偏离过大
		工作井塌方
		地表出现较大变形
		盾构掘进遇到障碍物
		盾构机沉降、冒顶
	管片开裂	涌水、涌砂
		管片质量不合格
		管片就位不准
	社会因素	社会因素

20.3.20 初步设计阶段公路盾构隧道造价风险产生的主要因素应结合项目实际进行识别，可参考表 20.3.20。

表 20.3.20 初步设计阶段造价风险因素识别表

类目		风险因素
造价风险	技术风险	质量等级要求
		施工方案的变化
		设计质量
		工程技术复杂程度
	经济风险	物价上涨
		资金不到位
	自然风险	恶劣气候条件
		地质水文条件
	管理风险	管理机构
		管理方法

20.3.21 公路盾构隧道初步设计阶段安全风险评估方法可采用检查表法、专家调查法、事故树法及层次分析法等。

【条文说明】单一风险时间的区段评估方法有层次缝隙法、事故树法、模糊综合评价法、概率分析法；单一风险事件的整体评估方法有专家调查法、层次分析法、模糊综合评价法；隧道总体风险评估方法有专家调查法、层次分析法。

20.3.22 初步设计阶段应对各重大典型风险事件的初始风险进行分段评估，形成不同典型风险事件隧道纵向风险等级分布图。

20.3.23 对 III 级（高度）、IV 级（极高）安全风险进行再评估，并确定残留风险。

【条文说明】对 IV 级（极高）残留风险，必须采取风险控制措施降低风险或对方案重新论证。对 III 级（高度）残留风险，设计单位应制定风险监控方案，加强监控，并在施工图阶段跟踪或者再评估。

20.3.24 初步设计阶段的安全风险控制措施主要包括设计方案的合理性、建设条件、施工方案以及结构风险等方面的重要风险控制对策。

【条文说明】风险控制对策、处置措施建议如下：确定设计方案的安全审查内容和程序；审核工程地质、水文地质勘察资料及周边环境资料；审核与隧道结构工程相关的设计；审核相应的施工方案、辅助工法和特殊条款；审核监控系统的配置原则，建立并完善权限工程监控网；编写相关表格，对可能存在的风险事件进行分析评价，提出应对措施，对残余风险进行评价、控制，并进行有效追踪。

20.4 施工图设计阶段风险分析

20.4.1 公路盾构隧道施工图设计阶段应对初步设计安全风险评估进行细化，当初步设计阶段风险评估为 III 级（高度）风险或者设计方案有较大变化时，应重点进行评估。

【条文说明】施工图设计阶段风险评估应结合初步设计审查意见，重点对施工工法、施工方案及结构方案可能存在的风险进行分析。对于典型风险在采取措施后风险等级仍较高，且无法通过设计减轻的，需要制定合理可行的应急救援预案。

20.4.2 施工图设计阶段风险评估应重点对初步设计评为 III 级（高度）及以上的风险事件进行评估。结合具体的施工工法、施工方案以及结构方案，对重大典型风险事件的致险因子进一步细化，施工图设计阶段部分典型风险事件的风险因素识别可参考以下第 20.4.3~20.4.8 条。

【条文说明】施工图设计阶段风险评估应进一步细化，当安全风险产生的后果可能为突发性事件（塌方、突水、涌泥、大变形等）时，施工图设计阶段应明确详细的施工方案、施工工艺、注意事项、监控要求等，并进行有效的风险分析，给出降低风险的应对措施和相应的风险监控方案，并作为下一阶段评估的重要依据和基础。

20.4.3 盾构机始发与接收风险分析宜针对工作井构造合理性、工作井围护结构的

安全性、始发与接收段地层加固方法、盾构始发与接收的方式及对周边环境的影响等，盾构机始发与接收风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.4.3 公路盾构隧道始发与接收风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	始发与接收风险	工作井围护结构型式不当
2		工作井围护结构参数不合理
3		承载力不足导致工作井破坏
4		基坑底部潜蚀与管涌
5		渗流
6		端头加固方案选择不当
7		端头加固范围不足
8		端头土层加固强度等参数不合理
9		后靠不稳
10		基座定位不够准确
11		反力架刚度不够
12		盾构进洞时姿态突变
13		凿除洞门出现涌砂涌水
14		凿除洞门时，土体从洞门间隙涌入工作井中
15		大幅度地面沉降
16		工作井周边既有建构筑物开裂
17		工作井周边既有管线破损
18		盾构机磕头或被掩埋
19		洞门密封卷帘失效导致漏水漏浆
20		土体加固强度太高使掘削较慢
21		刀盘“抱死”等

【条文说明】施工图阶段盾构机始发与接收风险分析应在初步设计阶段风险分析基础上，依据更详细的结构及岩土设计参数、施工实施方案及进度计划，从结构设计计算、加固进一步细化风险因素。

20.4.4 公路盾构隧道开挖面失稳风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.4.4 公路盾构隧道开挖面失稳风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	开挖面失稳风险	土仓压力控制
2		泥浆性能设计
3		工作面前方存在不均匀地层
4		工作面前方存在流砂地层
5		工作面前方存在地层空洞
6		穿越超浅覆土
7		工作面前方存在承压水
8		隧道埋深突变
9		盾构机长时间停顿
10		换刀时开挖面支护失效
11		盾尾密封
12		掘进速度

20.4.5 公路盾构隧道掘进施工期间水下高压换刀风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.4.5 公路盾构隧道水下高压换刀风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	水下高压换刀风险	软硬不均且差异性较大的地层
2		气压设置不合理
3		压缩机故障
4		发生气管爆裂
5		膨润土浆液气密性不好或失效
6		加压或减压不当
7		焊接等引发火灾或沼气爆炸
8		缺氧及有毒有害气体
9		开挖面、盾尾及管片漏气
10		盾构反坡掘进
11		掌子面泥膜破坏致使掌子面失稳

20.4.6 公路盾构隧道涌水涌砂风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.4.6 公路盾构隧道涌水涌砂风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	涌水涌砂	土仓压力控制不当
2		前面有地层空洞
3		前面有全断面流沙
4		前面有承压水
5		岩溶
6		接头漏水漏浆未及时处置
7		盾尾密封

20.4.7 公路盾构隧道联络通道施工安全风险主要影响因素可参考下表确定。

表 20.4.7 公路盾构隧道联络通道施工安全风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	联络通道施工风险	钢管片拆除不当
2		盲区地基加固处理欠妥
3		承压水
4		结构散热
5		冻结管倾斜
6		涌水喷砂
7		盐水流失
8		冷量不足
9		冻胀过大
10		暗挖施工不当
11		临时支护强度不够
12		渗漏水

20.4.8 管片结构安全风险分析主要影响因素可参考下表确定。宜针对管片形式、强度、接头防水、拼装方式、管片的抗水压能力、结构防腐蚀设计可靠性、结构和接头的耐久性等。

表 20.4.8 公路盾构隧道管片结构安全风险因素参考表

序号	典型风险事件	风险因素
1	结构安全风险	最大水位标高
2		河底冲刷情况
3		地下水渗透性
4		管片形式
5		管片强度及厚度
6		管片抗水压能力
7		盾构壁厚注浆压力
8		拼装方式
9		管片拼装时碰撞
10		泥水从开挖面沿盾壳窜至盾尾导致结构上浮
11		浆液参数及配比不适应导致隧道结构上浮
12		接头防水
13		接头耐久性
14		结构防腐蚀设计可靠性

20.4.9 公路盾构隧道施工图设计阶段风险评估方法可综合采用专家调查法、层次分析法、事故树法、模糊综合评价法等。

【条文说明】在施工图设计阶段，隧道方案进行重大修改或者残留风险较高时，应进行重点评估，特别是大断面复杂地质条件隧道。

20.4.10 施工图设计阶段，依据风险评估结果，评估小组应按照技术可行性及经济合理性的原则，提出降低风险的应对措施建议和相应的风险监控方案。

【条文说明】设计单位应根据安全评估提出的风险控制措施，及时对设计文件进行修改完善。另外，施工图设计阶段安全风险评估报告，应作为下一阶段的重要依据和基础。