

备案号: J 1 × × × × - 20 × ×

浙江省工程建设标准

DBJ

DBJ33/T 12 × × - 2025

城市轨道交通工程冻结法 应用技术规程

Technical specification for freezing method construction
of urban rail transit

(报批稿)

202 × - 00 - 00 发布

20 × × - 00 - 01 施行

浙江省住房和城乡建设厅 发布

前 言

根据浙江省住房和城乡建设厅《关于印发〈2019 年度浙江省建筑节能与绿色建筑及相关工程建设标准制修订计划〉的通知》（浙建设函〔2020〕3 号）的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，结合浙江省的实际情况，参考有关国家标准、国内外先进经验，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分为 7 章和 4 个附录。主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、勘察、设计、施工和监测。

本规程由浙江省住房和城乡建设厅负责管理，由浙江省市政行业协会负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议，请寄送浙江省市政行业协会（地址：杭州市拱墅区皇亲苑小区 5 幢 1 单元 101 室，邮编：310000，litlw1210@qq.com），以供修订时参考。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人：

主 编 单 位：浙江省市政行业协会

绍兴京越地铁有限公司

绍兴市建设工程质量安全管理中心

参 编 单 位：北京市政路桥股份有限公司

杭州市建设工程质量安全监督总站

中铁四局集团有限公司

北京城建设计发展集团股份有限公司

浙江省工程勘察设计院集团有限公司

上海勘察设计院（集团）有限公司

中煤邯郸特殊凿井有限公司

绍兴市轨道交通集团有限公司

浙江环宇建设集团有限公司

主要起草人：郑旭晨 王 昆 徐觉民 高 飞 潘 浩
沈 健 陈 雷 宋跃均 孙 果 李志星
魏志范 李志翔 黄 佳 张颖颖 杨维燕
庞 亮 陈成锋 李 会 夏磊刚 胡雷鸣
俞国潮 童朝宝 叶 罡 赵金金 夏 峰
马 健 方建华 陈雪峰 张 鹏 曹伟光
房明明 张 雪
主要审查人：赵宇宏 秦建设 游劲秋 褚金雷 易神州
李永明 邓铭庭

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	4
4	勘察	5
4.1	一般规定	5
4.2	勘探与测试	5
4.3	成果报告	7
5	设计	8
5.1	一般规定	8
5.2	冻结壁设计	9
5.3	冻结孔设计	16
5.4	初期支护设计	17
5.5	预加固支架设计	17
5.6	防护门设计	18
5.7	保温设计	18
5.8	冷冻站设计	19
5.9	冻结封孔	25
6	施工	26
6.1	一般规定	26
6.2	冻结孔施工	26
6.3	测温 and 液压孔施工	28
6.4	冻结器安装施工	28

6.5	冻结站施工	29
6.6	冻结壁检测与判定	32
6.7	联络通道开挖与构筑	33
6.8	冻结孔充填与封堵	36
6.9	充填注浆和融沉注浆	38
7	监测	40
7.1	一般规定	40
7.2	监测实施	40
7.3	监测频率与周期	40
7.4	监测控制值	41
7.5	监测信息化反馈	42
附录 A	冻结施工钻孔记录	43
附录 B	冻结加固冻结孔成孔汇总表	44
附录 C	冻结加固测温测压日报表	45
附录 D	冻结加固冻结运转日报表	46
	本规程用词说明	47
	引用标准名录	48
	附：条文说明	49

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic requirements	4
4	Investigation	5
4.1	General requirements	5
4.2	Exploration and testing	5
4.3	Report on achievements	7
5	Design	8
5.1	General requirements	8
5.2	Freeze wall design	9
5.3	Freezing hole design	16
5.4	Preliminary support design	17
5.5	Pre – reinforced bracket design	17
5.6	Protective door design	18
5.7	Thermal insulation design	18
5.8	Refrigeration station design	19
5.9	Freezing hole sealing	25
6	Construction	26
6.1	General requirements	26
6.2	Freezing hole construction	26
6.3	Temperature measurement and venting hole construction	28
6.4	Freezer installation construction	28

6.5	Freezing station construction	29
6.6	Frozen wall detection and determination	32
6.7	Excavation and construction of connected aisle	33
6.8	Filling and sealing of frozen holes	36
6.9	Filling and thawing settlement grouting	38
7	Monitoring	40
7.1	General requirements	40
7.2	Monitoring implementation	40
7.3	Monitoring frequency and period	40
7.4	Monitoring control value	41
7.5	Monitoring numerical information feedback	42
Appendix A	Frozen construction drilling record	43
Appendix B	Table of frozen reinforcement frozen hole	44
Appendix C	Freeze reinforcement temperature and pressure measurement daily report	45
Appendix D	Daily report of reinforcement operation	46
	Explanation of wording in this specification	47
	List of quoted standards	48
	Addition: Explanation of provisions	49

1 总 则

1.0.1 为规范冻结法在城市轨道交通工程中的应用，做到经济合理、质量可靠、施工安全和绿色环保，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于浙江省城市轨道交通工程采用盐水制冷系统冻结法技术的勘察、设计、施工和监测。

1.0.3 城市轨道交通工程冻结法的应用，除应符合本规程外，尚应符合国家和浙江省现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 冻结法 ground freezing method

在施工地下构筑物之前，用人工制冷的方法，对构筑物周围含水地层进行冻结，形成具有临时承载和隔水作用并满足工程施工安全需要的冻结壁，在其保护下进行地下构筑物安全施工的一种方法。

2.1.2 盐水冻结系统 brine freezing system

以氯化钙等盐溶液（简称盐水）为冷媒剂的间接冻结系统。

2.1.3 冻结壁 frozen soil wall

用冻结技术在构筑物周围地层所形成的具有一定厚度和强度的连续冻结岩土体。

2.1.4 冻结壁厚度 frozen soil wall thickness

冻结壁壁面上任一点与另一壁面之间的最短距离。

2.1.5 冻结壁平均温度 average temperature of frozen soil wall

冻结壁冻结范围内任一截面上温度分布的平均值。

2.1.6 交圈时间 frozen soil wall closing time

从地层冻结开始至构筑物周围主要冻结器布置圈上所有相邻的冻结器所形成的冻土圆柱按设计要求完全相交所需的时间。

2.1.7 冻结壁形成期 formation period of frozen wall

从地层冻结开始至冻结壁达到设计要求所需的时间。也称积极冻结期。

2.1.8 冻结壁维护期 maintenance period of frozen wall

冻结壁形成达到设计要求后，为了保证构筑物施工过程中的

安全，继续向冻结器输送冷量，以维持冻结壁满足设计要求的一段时间。也称维护冻结期。

2.1.9 冻结孔 freeze hole

布置在拟冻结土体内用于安装冻结器的钻孔，可分为垂直孔、水平孔、倾斜孔。

2.1.10 冻结器 ground freezing unit

由冻结管、置于冻结管内的供液管、回液管等组成，安设在冻结孔内，用以循环冷媒剂，并与地层进行热交换的装置。

2.2 符 号

R ——冻土的强度指标

g ——水库调洪后坝址处的等效面积

λ ——盐水流动阻力系数

μ ——盐水动力粘度系数

E_{yj} ——设计冻结壁有效厚度

V_{dp} ——冻结壁单侧平均扩展速度

E_{qr} ——冻土侵入开挖面以内厚度

S_{max} ——冻结孔成孔控制间距

V_{dp} ——冻结壁单侧平均扩展速度

m ——冷量损失系数，可取 $m = 1.2 \sim 1.5$

Re ——雷诺数

Q'_z ——冷凝器的总负荷

3 基本规定

- 3.0.1** 冻结法施工前应充分收集场内外地下建（构）筑物的分布情况，并应综合考虑施工环境开展勘察、设计、施工和监测。
- 3.0.2** 冻结法施工应根据冻结法施工专项设计和项目总体施工组织设计，编制冻结法施工专项方案和施工安全专项应急预案。
- 3.0.3** 冻结法施工前，施工单位应复核现场条件与设计工况是否相符，并向勘察和设计等单位反馈。
- 3.0.4** 冻结法施工前，应编制专项监测方案。
- 3.0.5** 冻结法施工所用的材料、半成品、成品、构配件等进场时，应对其外观、规格和型号等进行验收，质量证明文件应齐全，并按规定对材料进行抽检复试，合格后方可使用。
- 3.0.6** 冻结法施工所用的测控设备、仪器、仪表等应能正常使用且在计量检定合格期限内。
- 3.0.7** 施工单位应建立健全技术、质量、安全管理、职业健康和环境保护管理体系，并保持体系正常运行。

4 勘 察

4.1 一般规定

4.1.1 冻结法宜进行独立勘察并制定独立编制勘察方案，也可包含在轨道交通工程的岩土工程勘察方案中，勘察工作量的布置应满足拟建（构）物设计和施工的要求。

4.1.2 勘察开展前应搜集工作区以往类似工程研究资料、周边环境及地下建（构）筑物的分布资料，并应查明下列内容：

1 拟建场地地形与地貌特征，地基土的地质年代、成因类型、地层结构与分布规律；

2 场地地表水、地下水的水位，需冻结土层影响范围的水文地质条件，包括地下水的补给、径流、排泄条件，含水层埋深、厚度、地下水的含盐量，地下水水位变化幅度，流速、流向等参数；

3 场地不良地质作用和特殊岩土分布范围、发展趋势，分析评价对冻结法施工的危害程度及对工程的影响；

4 冻结土层的性状与分布特征，评价其均匀性、压缩性、渗透性；

5 场地原始地温、土层结冻温度、天然导热系数、天然状态比热容、天然状态导温系数等热物理特性指标。

4.1.3 勘察成果应结合冻结法施工作出分析评价，为冻结法设计与施工提出合理建议。

4.2 勘探与测试

4.2.1 勘探孔的布置与勘探深度应符合下列规定：

1 结合拟建建（构）筑物冻结法施工区域布置勘探孔，工程量不少于一个地质剖面线，每条剖面线上布置不应少于 2 个勘探孔，孔距不宜大于 45m，勘探孔可位于结构外侧 3m ~ 5m 布置。

2 控制性勘探孔深度进入隧道结构底板以下不少于 3 倍冻结壁厚度，一般性勘探孔深度进入隧道结构底板以下不少于 2 倍冻结壁厚度。勘探孔下部遇软弱层、透水层应适当加深，遇基岩层可适当减小，但不应小于进入隧道结构底板以下 5m。

4.2.2 钻探施工结束后，应对钻探孔进行全孔封闭且封堵密实。

4.2.3 勘探孔以取土样钻孔为主，针对冻结法施工影响土层采取土样。当场地存在影响冻结法施工的不良地质和特殊岩土应进一步取样查明。取样及样品制备应符合下列规定：

1 取样宜在拟冻结体以上及以下各 1 倍冻结厚度范围，取样数量应满足测试项目要求，细粒土采取原状土样，粗粒土可采取满足试验同等数量非原状土样，软土应采取薄壁土样，土样尺寸不小于 $\Phi 90\text{mm} \times 200\text{mm}$ ；

2 取样间距控制在 1.0m ~ 2.0m，对于薄层或夹层宜连续取样；勘察可结合主体结构取样数量统一考虑，勘察宜按单个工程冻结法施工土层确定取样数量；

3 每层土常温物理测试不少于 6 件，需要专门开展冻土力学强度测试的每层土取样数量不少于 21 件；

4 样品的保存和运输应符合现行相关勘察规范要求。

4.2.4 冻结范围土层室内试验应开展常温物理测试，可根据需要进行冻结土层的力学强度测试：

1 常规物理测试包括颗粒分析、导温系数、导热系数、比热容、融沉系数、冻胀系数、土层结冰温度；

2 冻结土层力学强度测试可按现行行业标准《人工冻土物理力学性能试验》MT/T 593 要求测试，包括不同温度（ -5°C 、 -10°C 、 -15°C ）的冻土抗压强度、冻土弹模、冻土泊松比，冻

土的剪切强度、抗折强度、蠕变参数。

4.2.5 在冻结法施工范围应专门布设地温测试点，测定冻结土层位置上、下各 1 倍沿洞身高度范围原始地温变化规律，定期测定探头各深度温度，记录测试点气温、天气、观测时间、测点温度等。

4.3 成果报告

4.3.1 冻结法勘察成果报告应包括下列内容：

1 勘察任务依据、拟建工程概况、勘察目的要求、勘察工作范围、采用方法和执行规范标准、完成工作量等；

2 场地水文气象、区域地质、地形地貌、现状环境和地下管线；

3 岩土分层特征、不良地质与特殊岩土、物理力学性质指标、施工工程分级和隧道围岩分级；

4 地下水类型、赋存与补径排条件、富水性与透水性、地下水位及变化情况、流速（流向）、腐蚀性评价；

5 冻结法施工适宜性评价、冻结法施工影响范围岩土工程评价、冻结层设计施工参数建议值。对建设后冻土工程地质条件变化作出预测；

6 场地环境条件与冻结法施工的相互影响、环境保护措施和岩土工程风险评价；

7 结论与建议。

4.3.2 成果报告应附下列图表：

1 勘探点平面位置图；

2 工程地质剖面图；

3 钻孔工程地质柱状图；

4 地基土物理力学性质指标及设计参数表；

5 冻结法试验成果报告；

6 室内土工试验成果等。

5 设 计

5.1 一般规定

5.1.1 冻结设计应综合考虑周边建（构）筑物、重要管线等周围环境安全。

5.1.2 地层冻结设计应包括下列内容：

- 1 冻结壁方案比选和设计；
- 2 冻结孔、泄压孔、测温孔、冷冻排管和透孔等设计；
- 3 冻结壁的监测与保护要求；
- 4 明确最少积极冻结时间；
- 5 充填、融沉注浆工艺及要求；
- 6 对周围环境和既有建（构）筑物可能产生影响的分析及

要求。

5.1.3 出现下列情况之一时，设计应采取针对性措施：

- 1 地下水流速大于 5m/d、有集中水流或地下水水位有异常波动；
- 2 土体中含有聚氨酯等隔热材料，且范围、分布难以确定；
- 3 近 3 个月内进行过水泥系土体地层加固；
- 4 土层含水量低，存在影响土体冻结强度；
- 5 存在其它影响地层冻结的因素。

5.1.4 冻结壁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，应在冻结壁或导热物体表面采取保温措施。

5.1.5 冻结壁形成及维护期间，必须降水施工时，冻结设计应考虑降水导致的冻结壁交圈等影响。

5.2 冻结壁设计

5.2.1 冻结壁设计应根据冻结壁功能要求、类别选择不同形式和安全性能的冻结壁。

5.2.2 冻结壁的功能设计应符合表 5.2.2 的规定。

表 5.2.2 冻结壁功能分类表

类别	功能与要求	适用范围
I	仅用于止水而无承载要求	岩石裂隙和混凝土界面缝隙止水
II	既要求承载又要求止水	含水砂土层的加固与止水

5.2.3 冻结壁结构设计应满足下列要求：

- 1 冻结壁宜按受压结构设计；
- 2 冻结壁结构形式应采用封闭的；
- 3 冻结壁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。

5.2.4 开挖后冻结壁应设初期支护，冻结壁承载力计算应按承受全部荷载考虑。

5.2.5 盾构始发接收前，围护结构外侧一定范围内的含水地层应预先进行加固，使之具有一定的强度和隔水性，凿除洞门内围护结构后，加固地层起到临时替代围护结构封水挡土的作用。

5.2.6 冻结加固体计算计算方法可按下式计算：

- 1 垂直冻结加固厚度可按下式计算：

$$h = \left(\frac{K_2 \beta W D^2}{4 \sigma_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2.6-1)$$

式中： W ——封门中心处的水土压力之和（ kN/m^2 ）；

D ——封门直径（ m ）；

σ_t ——冻土的抗折强度（ kN/m^2 ）；

β ——计算系数，可取 1.2；

K_2 ——安全系数，可取 1.5 ~ 2.0。

2 垂直冻结加固体中心最大弯拉应力可按下式计算：

$$\sigma_{\max} = \frac{3W \left(\frac{D}{2} \right)^2 \times (3 + \mu)}{8h^2} \leq \frac{\sigma_t}{K_1} \quad (5.2.6-2)$$

式中：h——冻结加固体厚度（m）；

μ ——冻土泊松比；

σ_t ——冻土抗折强度（kN/m²）；

K_1 ——抗折安全系数，按本规程表 5.2.9 选取。

3 水平冻结板块加固体设计计算，可沿用垂直冻结加固体的计算方法；

4 水平冻结圆筒形加固体可不做力学计算。

5.2.7 冻结加固体设计参数应符合下列规定：

1 冻结加固体的平均温度应根据承受荷载大小、冻胀融沉对环境造成的影响及工艺合理性确定。承受荷载大，安全要求高的工程宜取较低的冻结加固体平均温度。冻结加固体平均温度的计算可采用解析法或有限元进行数值验算。

2 不同类型的洞门板块冻结加固体平均温度宜按表 5.2.7-1 所示范围控制。

表 5.2.7-1 洞门板块冻结加固体平均温度控制参考值

类型	板块冻结加固体	
	上限	下限
垂直冻结	-10℃	-15℃
垂直 + 水平冻结	-10℃	-15℃
水平冻结	-12℃	-15℃

注：当实测土层含盐量数值超过 10000mg/kg 时，建议适当降低平均温度控制参考值。

3 水平冻结圆筒形加固体厚度宜控制在 1.4m ~ 2.0m 之间，不同盾构类型冻结孔布置与圆筒形加固体厚度相关参数宜按下表

确定。

表 5.2.7-2 冻结孔布置与圆筒形加固体厚度参数

隧道外半径 = 3.1m	冻结管布置圈半径 (m)	3.9	4.0	4.1
	加固体厚度 (m)	1.46 ~ 1.61	1.66 ~ 1.83	1.86 ~ 2.04
隧道外半径 = 3.35m	冻结管布置圈半径 (m)	4.1	4.2	4.3
	加固体厚度 (m)	1.46 ~ 1.61	1.66 ~ 1.83	1.86 ~ 2.04

注：加固体厚度控制参考值适用于各土层含盐量不超 10000mg/kg，当实测含盐量数值超过此标准，建议根据附表适当加强或采取其他措施。

4 其他尺寸盾构的加固体厚度可参考使用。

5 仅作为对洞门四周工作井围护结构封水的 I 类冻结壁，应在洞门四周一定范围保持负温状态的封水区域，封水区域冻土与围护结构交界面的平均温度不应高于 -5°C 。对于垂直冻结，洞门四周隧道径向封水路径不应小于 2m；对于水平冻结的圆筒形加固体，应保证冻结管之间冻土交圈，且厚度不宜小于 1m。

5.2.8 冻结壁设计基础参数的选取应包括下列内容：

1 冻结壁的外荷载计算应符合下列规定：

- 1) 冻结壁的荷载应包括土压力、水压力、土方开挖影响范围内地表建（构）筑物荷载、地表超载及其他临时荷载；
- 2) 对于地下水位以下的砂土、砂质粉土和碎石土宜按水土分算的原则计算土压力和水压力；对于地下水位以下的黏性土和黏质粉土宜按水土合算的原则计算；
- 3) 垂直土压力按计算点以上覆土重量及地面超载计算；侧向土压力按朗肯主动土压力计算，也可采用下式计算；基底土反力按静力平衡计算；
- 4) 侧向土压力应按下式计算：

$$P_s = K_0 P_t \quad (5.2.8)$$

式中： P_s ——侧向土压力（kPa）；

P_i ——计算点的垂直土压力 (kPa);

K_0 ——静止土压力系数, 可取 0.5 ~ 0.7。

2 冻结壁平均温度应根据冻结壁承受荷载大小 (或开挖深度)、盐水温度、冻结孔间距、冻结壁厚度、冻结管直径、冻结时间等综合确定。联络通道冻结壁平均温度的选取宜符合表 5.2.8-1 的规定。冻结壁与隧道管片交界面平均温度不应高于 -5°C 。

表 5.2.8-1 冻结壁平均温度设计参考值

开挖深度 H_j (m)	< 12	12 ~ 30	> 30
冻结壁平均温度 T_p ($^{\circ}\text{C}$)	-6 ~ -8	-8 ~ -10	≤ -10

3 盐水温度与盐水流量的确定应符合下列规定:

- 1) 盐水温度与盐水流量应满足在规定的时间内使冻结壁厚度和平均温度达到设计值的需要;
- 2) 最低盐水温度应根据设计的冻结壁厚度、平均温度、工期、地层环境及气候条件确定, 宜按表 5.2.8-2 选取。设计冻结壁平均温度低且地温高时宜取较低的盐水温度;

表 5.2.8-2 最低盐水温度设计参考值

冻结壁平均温度 T_p ($^{\circ}\text{C}$)	-6 ~ -8	-8 ~ -10	≤ -10
最低盐水温度 T_y ($^{\circ}\text{C}$)	-25 ~ -26	-26 ~ -28	-28 ~ -30

- 3) 积极冻结 7d 后盐水温度宜降至 -18°C 以下;
- 4) 积极冻结 15d 后盐水温度应降至 -24°C 以下;
- 5) 开挖时盐水温度应降至设计最低盐水温度以下, 在保证冻结壁平均温度、冻土与结构交界面温度和厚度达到设计要求且实测判定冻结壁安全的情况下, 可适当提高盐水温度, 但不宜高于 -25°C ;

- 6) 开挖时供路和回路盐水温差不宜高于 2℃；
- 7) 施工初期支护后冻结盐水温度不宜高于 -25℃，并确保冻结壁与隧道管片的交界面不解冻；
- 8) 冻结孔单孔盐水流量应根据冻结管散热要求、供路和回路盐水温差和冻结管直径确定，冻结管内盐水流动状态宜处于层流与紊流之间。

5.2.9 冻结壁厚度设计应符合下列规定：

1 冻结壁厚度应根据联络通道的工程地质及水文地质条件、埋藏深度、结构、几何特征和可能达到的冻结壁平均温度等综合条件确定，Ⅱ类冻结壁应按承载力要求设计冻结壁厚度。

2 冻结壁的计算方法应符合下列规定：

- 1) 冻结壁内力宜采用结构力学或数值计算方法计算；
- 2) 冻结壁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设计冻结壁平均温度下的冻土力学特性指标；
- 3) 采用数值计算方法时，数值计算应建立合理的计算模型。对于隧道的钢筋混凝土衬砌的弹性模量、泊松比、重度；未冻土的弹性模量、泊松比、重度；冻土的弹性模量、泊松比、重度宜根据现场试验进行选取。

3 开挖后应及时进行初期支护，冻结壁的暴露时间不宜大于 24h。

4 冻结壁可只进行抗压、抗折和抗剪强度验算。冻结壁的强度验算可按下式计算：

$$K_1 \sigma \leq R \quad (5.2.9)$$

式中： σ ——冻结壁应力（MPa）；

R ——土的强度指标（MPa）；

K_1 ——安全系数，Ⅱ类冻结壁强度检验安全系数宜按表 5.2.9 选取。

表 5.2.9 II 类冻结壁检验安全系数

项 目	抗 压	抗 折	抗 剪
安全系数	2.0	3.0	2.0

5 有特殊要求的工程冻结壁设计时应验算冻结壁的变形，计算冻结壁最大变形不应超过 30mm。

6 联络通道与管片交界处的冻结壁设计厚度不应小于 1.0m，且平均温度不高于 -5°C ，其他部位的冻结壁设计厚度不应小于 1.4m。

5.2.10 泄压孔应符合下列规定：

1 在与旁通道相接的隧道管片上应布置泄压孔，泄压孔个数不宜少于 2 个；

2 泄压孔应布置在开挖区非冻土内，深入地层不小于 0.3m；

3 泄压孔孔径不宜小于 38mm；应安装压力表和控制阀门，压力表的精度应达到 $\pm 0.02\text{MPa}$ ；泄压孔应保持畅通；

4 在冷冻站运转前，必须检测地层初始压力，并与泄压孔附近地层水文勘察资料比较，若发现异常，必须查明原因，并及时进行处理；

5 每隔 12h ~ 24h 观测 1 次地层压力；压力开始上涨后，应对泄压孔压力进行实时监测；所有观测应有原始记录，并有观测者签字；

6 泄压孔压力上涨超过初始压力 0.2MPa 时应放水泄压；

7 开挖前，泄压孔压力应上涨超过 7d，打开泄压孔 24h 以上无持续泥水流出；若泄压孔在积极冻结期无压力上升，应分析原因，并补打探孔，以判定冻结壁交圈情况。

5.2.11 冻结体开挖前应对冻结壁形成进行预评估，并应符合下列规定：

1 冻结壁有效厚度可按下式计算：

$$E_{yj} = 2V_{dp}t - E_{qr} \quad (5.2.11-1)$$

式中： E_{yj} ——设计冻结壁有效厚度（mm）；

V_{dp} ——冻结壁单侧平均扩展速度（mm/d）；

E_{qr} ——冻土侵入开挖面以内厚度（mm）；

t ——冻结时间（d）。

冻结壁单侧平均扩展速度可按表 5.2.11 选取或采用测温数据计算；

表 5.2.11 单排孔冻结壁（或冻土圆柱）单侧扩展速度设计参考值

冻结时间 t (d)	0 ~ 20	21 ~ 30	31 ~ 40	41 ~ 50	51 ~ 60
粘土冻结壁平均扩展速度 V_{dp} (mm/d)	34 ~ 28	28 ~ 24	24 ~ 22	22 ~ 20	20 ~ 18
砂土冻结壁平均扩展速度 V_{dp} (mm/d)	40 ~ 35	35 ~ 30	30 ~ 25	25 ~ 22	22 ~ 20

2 冻结壁交圈时间可按下式估算：

$$t_{jq} = \frac{S_{max}}{2V_{dp}} \quad (5.2.8-2)$$

式中： t_{jq} ——预计冻结壁交圈时间（d）；

S_{max} ——冻结孔成孔控制间距（mm）；

V_{dp} ——冻结壁单侧平均扩展速度（mm/d）。

3 冻结壁形成期，预计冻结壁厚度不应小于设计要求值，同时预计冻结壁平均温度不应高于设计要求值。

5.2.12 冻结效果预估的计算方法按下列规定进行：

1 冻结加固体厚度可按照设计积极冻结时间预估，厚度的预估可采用平均冻结发展速度测算法，也可采用解析法；

2 冻结加固体平均温度应根据设计冻结加固类型和冻结管布置方案进行预估，冻结加固体平均温度应处于本规程表 5.2.7-1 中下限与上限规定的范围之内；

3 作为冻结效果预估的冻结加固体平均温度计算可采用解

析法、图解法或通用经验公式进行。

5.3 冻结孔设计

5.3.1 冻结孔布置应符合下列规定：

1 冻结孔的布置应满足形成有效的冻结壁厚度和平均温度的设计要求；

2 冻结孔布置参数应包括冻结孔孔位、开孔角度、冻结孔开孔间距、成孔间距、冻结孔深度和冻结孔偏斜精度要求等；

3 线间距小于 20m 的联络通道，可采用从一侧布置冻结孔；对于线间距大于 20m 的联络通道，宜采用从隧道两侧布置冻结孔；

4 当单排冻结孔不能满足冻结壁设计要求时，可布置多排冻结孔；

5 冻结孔透孔的数量应根据流量计算确定，并不应少于 2 个；

6 冻结孔最大允许偏斜值应符合表 5.3.1 的规定；

表 5.3.1 冻结孔偏斜精度要求表

冻结孔类型	水平或倾斜冻结孔			竖直冻结孔	
冻结孔深度 H (m)	≤10	10 ~ 30	30 ~ 60	≤40	40 ~ 100
冻结孔最大偏斜值 (mm)	150	150 ~ 350	350 ~ 600	150 ~ 250	250 ~ 400

7 单排冻结孔最大成孔控制间距应符合表 5.3.2 的规定，多排冻结孔密集布置时，内部冻结孔成孔的控制间距可取边孔的 1.2 倍。

表 5.3.2 单排冻结孔成孔间距设计参考值

冻结孔类型	水平或倾斜冻结孔			竖直冻结孔	
冻结孔深度 H (m)	≤10	10 ~ 30	30 ~ 60	≤40	40 ~ 100
最大允许终孔间距 (mm)	1100 ~ 1300	1300 ~ 1600	1600 ~ 2000	1200 ~ 1400	1400 ~ 1800

5.3.2 盾构始发和接收端垂直冻结孔布置除应符合本规程 5.3.1 条的规定外，当采用实体冻结时，除贴近洞门的第一排孔外，中间孔应采用梅花形布置。

5.3.3 基底局部垂直冻结孔布置应符合下列规定：

- 1 除贴近围护的第一排孔外，中间孔应采用梅花形布置；
- 2 开孔间距宜控制在 1.8m ~ 2.2m，冻结孔布置应避开基坑内支撑位置。

5.3.4 在冻结孔未穿透管片的隧道管片内表面应敷设冷冻排管。冷冻排管的敷设范围不应小于界面冻结壁设计厚度，冷冻排管的内径不应小于 30mm，管间距不应大于 0.5m。冷冻排管应密贴隧道管片且应敷设保温层。

5.4 初期支护设计

5.4.1 初期支护应进行承载力验算，初期支护应能承受 20% ~ 30% 冻结壁承受的荷载，当出现下列情况之一时，初期支护宜按承受 50% 冻结壁荷载设计：

- 1 通道位置有砂土层；
- 2 通道长度大于 15m 或通道开挖时间需要 15d 以上；
- 3 通道开挖区附近 3m 内有特殊变形控制要求的重要建（构）筑物。

5.4.2 初期支护可采用木背板、钢筋网、型钢支架或钢筋格栅和喷射混凝土组成的结构形式。

5.5 预加固支架设计

5.5.1 预加固支架可采用多边形支撑或环形支撑。

5.5.2 在结构设计无明确规定时，预加固支架的设计应符合下列规定：

- 1 联络通道预留口两侧分别设置 1 榀预加固支架；
- 2 每榀预加固支架应设置不少于 7 个支撑点均匀地支撑在

隧道管片上，支撑点与管片之间宜设置不小于 16mm 厚的钢垫板，每个支撑点可提供的支撑力不应小于 500kN；

3 预加固支架框架宜采用型钢制作，并应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的要求。预加固支架之间连接应牢固可靠，确保其稳定性。

5.6 防护门设计

5.6.1 防护门的承载能力应根据安装位置处的水土压力设计，尚应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。

5.6.2 防护门宜安装在通道预留洞口隧道钢管片上。安装在混凝土管片上，应采取措施固定牢靠且密封完好。

5.6.3 防护门上应安装排气管、注浆管及控制阀门，防护门底部应设置足够大的排泥水阀门管、挡泥板，并配备注浆泵为防护门内供水。

5.6.4 防护门应进行抗压能力的计算，防护门安装后应按《压力容器》规范进行水密性试验或气密试验，在注浆泵连续工作时试验水压或气压应能保持在设计试压值。

5.6.5 初期支护施工结束后拆除防护门。开挖过程中出现断管、盐水泄漏等特殊情况，防护门和联络通道对面管片应在二次衬砌结构施工完成后方可拆除。

5.7 保温设计

5.7.1 冻结壁附近隧道管片内侧应敷设保温层，保温层应与管片表面密贴，粘结牢固。保温层敷设范围不得小于设计冻结壁边界外 1m。

5.7.2 保温层应采用阻燃材料，阻燃性能等级不应低于现行国家标准《建筑材料及制品燃烧性能分级》GB 8624 所规定的 B1 级。隧道管片保温层厚度不应小于 30mm，导热系数不应大于 $0.04\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，吸水率不应大于 2%。

5.7.3 冻结孔未穿透的另一侧管片，应在冻结体与管片交界面采取补强和保温措施，在其管片内侧表面敷设冷冻排管。冷冻排管的敷设范围不应小于冻结壁设计厚度。冷冻排管的内径不应小于 30mm，管间距不应大于 500mm，冷冻排管应与管片密贴。

5.7.4 联络通道开挖时在掌子面位置设置导洞，长度 1.0m ~ 1.5m，待开挖至对侧管片后再将导洞回扩至正常断面。当通道长度大于 15m 或通道开挖时间需要 15d 以上时，应在导洞部位采取保温措施，在导洞环向木背板后敷设 1 排 ~ 2 排冷冻排管。

5.7.5 测温孔布置应符合下列规定：

1 应设置测温孔监测地层温度，计算冻结壁厚度、冻结壁平均温度；

2 测温孔宜布置在冻结孔间距较大的冻结壁界面上或预计冻结薄弱处；

3 检测冻结壁厚度的测温孔不得少于 2 个，检测冻结壁平均温度的测温孔不得少于 4 个；在冻结壁内、外设计边界上均应布置测温孔，深度不应小于 2000mm；在集水井中部应布置测温孔，深度应与相邻的冻结孔深度相同；

4 测温孔内应安装测温管，管材宜采用钢管，不应渗漏；测温管规格应方便安装测点。

5.8 冷冻站设计

5.8.1 冷冻站制冷能力计算应符合下列规定：

1 冻结管吸热能力可按下式计算：

$$Q_g = qA \quad (5.8.1-1)$$

式中： Q_g ——冻结管总吸热能力（kJ/h）；

q ——冻结管吸热系数（kJ/m²h），可取（1000 ~ 1200）kJ/m²h；

A ——冻结管、含冷冻排管总表面积（m²）。

2 冷冻站所需制冷能力按下式计算：

$$Q_z = mQ_g \quad (5.8.1-2)$$

式中： Q_z ——需要制冷能力（kJ/h）；

m ——冷量损失系数，可取 $m = 1.2 \sim 1.5$ 。

5.8.2 冷冻机选择应符合下列规定：

1 制冷剂循环系统的冷凝温度应比冷却水循环系统的出水温度高 $3^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ ；

2 制冷剂循环系统的蒸发温度应比设计最低盐水温度低 $5^{\circ}\text{C} \sim 7^{\circ}\text{C}$ ；

3 冷冻机的型号与数量应根据计算工况制冷能力以及制冷剂循环系统的冷凝温度、蒸发温度、实际工况制冷量与标准制冷量之间的换算系数确定。选定冷冻机实际工况的总制冷能力不得小于计算制冷能力，并应配置备用机。

5.8.3 地层冻结盐水应符合下列规定：

1 地层冻结用盐水（冷媒剂）宜采用氯化钙水溶液；

2 氯化钙水溶液的凝固点应低于设计盐水温度 $8^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ ，比重不宜大于 1.27；

3 盐水中可掺加氢氧化钠或重铬酸钠以减轻盐水对金属的腐蚀；

4 氯化钙水溶液应充满循环系统中所有的容器和管路。氯化钙用量可按下式计算确定：

$$G = \frac{1.2g(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)}{\rho} \quad (5.8.3)$$

式中： G ——氯化钙用量（kg）；

g ——单位盐水体积固体氯化钙含量（ kg/m^3 ）；

ρ ——固体氯化钙纯度；

V_1 ——冻结器内盐水体积（ m^3 ）；

V_2 ——干管及配、集液圈内盐水体积（ m^3 ）；

V_3 ——蒸发器和盐水箱内盐水体积（ m^3 ）；

V_4 ——连接集、配液圈与冻结管的高压胶管内的盐水体积（ m^3 ）。

5.8.4 盐水管路设计应符合下列规定:

1 应按盐水流速计算供液管、干管和配、集液管管径。盐水在冻结器环形空间的流速宜为 $0.1\text{m/s} \sim 0.3\text{m/s}$, 在供液管中的流速宜为 $0.6\text{m/s} \sim 1.5\text{m/s}$, 在干管及配、集液管中的流速宜为 $1.5\text{m/s} \sim 2.0\text{m/s}$;

2 盐水干管及配、集液管可选用普通低碳钢无缝钢管且管壁厚度不小于 4.5mm , 或采用其他满足使用要求的新型材料; 供液管可选用钢管或聚乙烯增强塑料管, 供液管接头应有足够强度;

3 在盐水干管中宜安装软接头以减小温度应力和制冷设备运转引起的震动。

5.8.5 盐水泵的选型应符合下列规定:

1 盐水循环总流量应按下式计算:

$$W = \frac{Q_z}{\Delta T_0 \cdot \gamma \cdot c} \quad (5.8.5-1)$$

式中: W ——盐水循环计算总流量 (m^3/h);

Q_z ——计算制冷能力 (kJ/h);

γ ——盐水密度 (kg/m^3);

c ——盐水比热 ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$);

ΔT_0 ——去回路盐水温差 ($^\circ\text{C}$), 一般取 $\Delta T_0 = 1^\circ\text{C} \sim 2^\circ\text{C}$ 。

$$H_c = 1.15 (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) + h_5 + h_6 + h_7 \quad (5.8.5-2)$$

式中: H_c ——盐水泵计算扬程 (m);

h_1 ——盐水干管和集配液管中的压头损失 (m);

h_2 ——供液管中的压头损失 (m);

h_3 ——冻结器环形空间的压头损失 (m);

h_4 ——盐水管路中弯头、三通、阀门等局部阻力, 取值为 $(h_1 + h_2 + h_3)$ 的 20% (m);

h_5 ——盐水泵的压头损失 (m), 可取 $3\text{m} \sim 5\text{m}$;

h_6 ——封闭式循环系统中回路盐水管高出盐水泵的高度

(m), 宜取 3m ~ 5m;

h_7 ——蒸发器内的盐水压头损失 (m)。

其中:
$$h_1 + h_2 + h_3 = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \quad (5.8.5-3)$$

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (\text{紊流}) \quad (5.8.5-4)$$

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (\text{层流}) \quad (5.8.5-5)$$

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \gamma}{\mu \cdot g} \quad (5.8.5-6)$$

式中: d ——盐水管的直径 (m);

L ——盐水管的长度 (m);

g ——重力加速度 (9.81m/s^2);

ω ——盐水流速 (m/s);

λ ——盐水流动阻力系数;

Re ——雷诺数;

μ ——盐水动力粘度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

γ ——盐水密度 (kg/m^3)。

3 盐水泵电动机功率应按下式计算:

$$W = 1.25 \frac{W \cdot H_c \cdot \gamma}{102 \times 3600 \times \eta_1 \cdot \eta_2} \quad (5.8.5-7)$$

式中: W ——盐水循环计算总流量 (m^3/h);

H_c ——盐水泵计算扬程 (m);

η_1 ——盐水泵的效率, 取 0.75;

η_2 ——电动机的效率, 取 0.85;

γ ——盐水密度 (kg/m^3)。

4 确定盐水泵型号和数量时, 应综合考虑盐水循环计算总流量、盐水泵扬程和电机功率, 盐水泵在计算扬程时的总流量不得小于计算流量, 并应配备相同能力的备用泵。

5.8.6 冷却水设计应符合下列规定：

1 冷冻站冷却水总循环量应按下式计算：

$$W_0 = W_1 + W_2 \quad (5.8.6-1)$$

式中： W_1 ——冷却水计算总循环量 (m^3/h)；

W_2 ——冷凝器冷却水用量 (m^3/h)；

W_3 ——冷冻机冷却水用量 (m^3/h)。

其中采用壳管式冷凝器时的冷却水用水量应按下式计算：

$$W = \frac{Q'_z}{1000 \cdot \Delta T_1} \quad (5.8.6-2)$$

式中： Q'_z ——冷凝器的总负荷 (kJ/h)；

ΔT_1 ——冷凝器进出水温差 ($^{\circ}\text{C}$)，取 $\Delta T_1 = 3^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 。

采用蒸发式冷凝器时的冷却水用量和冷冻机的冷却水用量宜参照厂家提供参数确定。

2 不安装冷却塔时的补充水量宜按下式计算：

$$W_3 = \frac{W_0 (t_2 - t_1)}{t_2 - t_0} \quad (5.8.6-3)$$

式中： W_3 ——补充水量 (m^3/h)；

t_2 ——冷凝器出水温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

t_1 ——冷凝器进水温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

t_0 ——补充水温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

3 安装冷却塔时的补充水量宜按下式计算：

$$W_3 = \frac{W \Delta T_2}{600} + W_4 + W_5 \quad (5.8.6-4)$$

式中： W_3 ——补充水量 (m^3/h)；

W ——冷却塔循环水量，(m^3/h)；

ΔT_2 ——冷却塔进出水温差 ($^{\circ}\text{C}$)；

W_4 ——冷却塔飞溅损失水量 (m^3/h)，取 0.01 ~ 0.02 倍的 W ；

W_5 ——其他排放水量 (m^3/h)。

4 冷却水宜采用低矿化度水，水温宜低于 28°C ；

5 应按冷却水计算总循环量选择冷却水循环泵型号和台数，水泵扬程宜为 $12\text{m} \sim 40\text{m}$ 。冷冻站和冷却塔不在同一水平位置的要计算高差，并应设置满足设计能力的备用泵。

5.8.7 低温容器及管路保温设计应符合下列规定：

1 制冷剂循环系统的低温容器和管路、盐水箱、盐水干管和配、集液管等应采取保温措施；

2 保温层敷设宜使其外表面温度比环境露点温度高 2°C 以上，保温层不应产生凝结水，使冷量损失在允许范围内；

3 保温层的设置应符合本规程第 5.7.3 条的规定；

4 低温容器、管路的保温层均应铺设防潮层；

5 设计应符合现行国家标准《工业设备及管道绝热工程设计规范》GB 50264 有关规定。

5.8.8 供液管和回液管设计应符合下列规定：

1 供液管和回液管材质为钢管时应符合现行国家标准《输送流体用无缝钢管》GB/T 8163 的规定，为聚乙烯增强塑料管时应满足现场工作环境压力要求；

2 供液管和回液管的规格应根据供冷量进行设计，供、回液管的外径与壁厚参照值宜按下表选取；

表 5.8.8 供液管和回液管的外径与壁厚参照值

供液管品种	外径 (mm)	壁厚 (mm)
钢管	≥ 38	3 ~ 4
聚乙烯增强塑料管	≥ 50	≥ 4

3 盾构始发与接收端掘进范围内的供、回液管宜采用聚乙烯增强塑料管，其他部位的供、回液管宜采用无缝钢管。

5.9 冻结封孔

5.9.1 封孔材料必须能够有效阻止气体、液体等介质的泄漏，确保被封区域与外界环境完全隔绝，同时应具备良好的耐腐蚀性、耐老化性等性能，能够在特定环境条件下长期保持封孔效果。

5.9.2 封孔时要求分组停止冻结，并尽快割除车站（工作井）结构上的停冻的孔口管和冻结管，防止孔口管和冻结管周围冻结壁解冻漏水。

5.9.3 观察无渗漏后，割除孔口管、冻结管至钢管片、车站（工作井）结构内深度不小于 100mm。

6 施 工

6.1 一般规定

6.1.1 冻结法施工范围内应专门布设地温测试点，测定冻结土层位置上、下各 1 倍沿洞身高度范围地温变化规律，并做好记录。

6.1.2 土方开挖宜采用矿山法分段开挖构筑方式，应遵循矿山法开挖施工原则，严格控制冻结壁温度升高和变形，减小施工风险。

6.1.3 施工中应对地表及建（构）筑物、重要管线和隧道支护结构进行动态监测，并及时反馈信息。

6.1.4 冻结施工应不间断供电，并应配备备用电源。

6.1.5 施工过程中，应在隧道内安装远程视频系统及隧道上下通讯（电话）系统，并联系畅通。

6.2 冻结孔施工

6.2.1 设备选型、安装和调试应满足下列要求：

1 应根据地质条件、施工方法、工艺要求、施工现场环境等，选用相适应的钻孔设备、检测设备和材料；

2 平台搭设应牢固平整，便于施工，且应满足设计及安全施工要求；

3 钻孔设备安装完成且经调试运行正常后，方可进行钻孔施工。

6.2.2 开孔施工应符合下列规定：

1 冻结孔开孔位置、偏斜值、成孔间距及深度应符合设计

要求。

2 在隧道管片上施工冻结孔时，应采取二次开孔工艺，并安装孔口防喷涌装置。孔口管安装应满足下列要求：

- 1) 孔口管宜采用低碳钢无缝钢管，孔口管直径和管壁厚度应满足施工要求；
- 2) 孔口管安装应牢固，角度应符合设计要求。

6.2.3 钻进施工应满足下列要求：

1 冻结孔成孔方法可根据地层条件选用跟管钻进法、夯管法和顶管法等施工方法；

2 冻结孔的深度不应小于设计深度，且不宜大于设计深度 500mm；

3 冻结孔的偏斜值控制、成孔间距应符合本规程表 5.3.1、表 5.3.2 的规定及设计规定；

4 钻孔前，应测量复核联络通道中心线与左右线隧道实际夹角，并应根据实际夹角，调整冻结钻孔的参数；

5 当设计有透孔，应先施工穿透联络通道两端隧道的透孔，验证隧道管片上预留洞门的相对位置、隧道线间距长度，当两预留洞门相对位置偏差大于 100mm 时应修正冻结孔设计；

6 冻结孔施工方位应根据实际开孔偏差进行调整，以减小冻结孔的最大孔间距。应由下向上施工冻结孔，必要时应通过调整中间冻结孔的设计轨迹，并应减小冻结孔最大钻孔间距，使冻结孔间距均匀；

7 施工对穿冻结孔（透孔）时，当钻孔穿越对侧隧道管片时，应做好穿透位置的封堵工作；

8 冻结孔施工结束后应用密封材料封堵冻结管与隧道衬砌或管片结构之间的缝隙；

9 冻结孔施工过程中应及时测斜，并绘制冻结孔成孔偏斜图，测斜成果应符合本规程第 5.3.1 条和第 5.3.2 条的规定；

10 钻机拆除应在全部冻结孔验收合格后进行。

6.3 测温 and 液压孔施工

6.3.1 测温孔施工应满足下列要求：

1 测温孔应在所有冻结孔施工完成后施工，测温孔的位置应根据冻结孔的实际测斜成果及各种因素综合确定，其深度不应小于设计测温孔深度；

2 测温孔施工应符合本规程第 5.7.5 条和第 6.2.2 条的规定。

6.3.2 测温装置安装应符合下列规定：

1 测温管宜采用与冻结管管材材质相同的钢管，且不应渗漏，规格应便于安装测点；

2 测温电缆和测温元件安装后，管口应进行密封和保护；

3 测温元件和仪器的测量精度应达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

6.3.3 泄压孔施工应符合下列规定：

1 泄压孔应在所有冻结孔施工完成后施工，应符合本规程第 5.2.10 条和第 6.2.2 条的规定；

2 泄压孔孔口应安装压力表和用于泄水的旁通管和控制阀门。

6.4 冻结器安装施工

6.4.1 冻结管安装应符合下列规定：

1 冻结管材质和规格应符合设计要求，应采用低碳钢无缝钢管，不得采用焊接钢管；

2 冻结管接头衬管应与冻结管材的材质一致，接头牢固可靠，强度满足施工要求，且不宜小于母管强度的 60%，管端应留坡口，选用焊条应与管材材质相匹配，焊缝应饱满且与管壁齐平；

3 冻结管管材及连接应顺直，保证同心度；

4 冻结管周围及冻结区域不得漏水漏泥，出现漏水漏泥时

应采用注浆方法封堵；

5 冻结管下入地层后应进行动压试漏，试验压力应为全冻结管内盐水柱与管外清水柱的压力差及盐水泵工作压力之和的 1.5 倍，经试压 30min 压力下降不超过 0.05MPa，再持续 15min 压力不下降为合格；

6 冻结管与孔口管之间的缝隙应采用水泥浆或水泥-水玻璃双液浆封堵，并应焊接密封冻结管与孔口管之间的间隙。

6.4.2 供液管可采用聚乙烯增强塑料管或钢管，供液管内盐水流速、供液管与冻结管环形空间的盐水流动速度均应满足规定要求。

6.4.3 供液管下入冻结管时连接应牢固和严密，并下放到距离冻结管管底预留不应少于 100mm 的间隙。供液管管端应留有断面面积不小于供液管断面面积的回水通道。

6.4.4 冻结器宜采用串、并联方式分组与配、集液圈连接，每组串联冻结器长度应适中并基本一致，以保证各冻结器盐水流量均匀并满足设计要求。

6.4.5 冻结器与配、集液圈之间应用软管连接，软管质量应满足施工要求，软管在工况温度下耐压不应低于 1.0MPa。

6.5 冻结站施工

6.5.1 冻结站安装应满足下列要求：

1 冻结站应根据现场施工环境、条件确定合适位置，可布置在地铁车站地面广场、车站地下站厅或冻结工作面附近的隧道内；

2 冻结站厂房防火应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 的相关规定；

3 冻结站应通风良好，必要时可安装轴流风机强制通风，冻结站设在地面时，制冷系统的高压部分应避免阳光直晒；

4 冻结站制冷设备、盐水泵、冷却水泵及管路系统的安装，

应符合现行国家标准《制冷设备、空气分离设备安装工程施工及验收规范》GB 50274、《机械设备安装工程施工及验收通用规范》GB 50231 及《工业金属管道工程施工及验收规范》GB 50235 中的有关规定。配电系统安装及调试应符合现行国家标准《电气装置安装工程 盘、柜及二次回路接线施工验收规范》GB 50171 的规定；

5 冻结站采用的设备、压力容器及管道阀门应清洗干净并经压力试验合格。液面指示器、安全阀等安装前应进行灵敏性试验；

6 冷却水源水质不符合冷凝器等设备的使用要求时，应设置冷却水水质处理装置，提高冷却效率；

7 盐水循环系统在供路、回路干管上应安装温度、压力测点和控制阀门。测温孔插座位置、尺寸及角度应符合有关规定和设计要求；

8 盐水循环系统最高部位处应设置排气阀，盐水箱应安设盐水液面可视自动报警系统；

9 盐水管路系统应进行压力试验，试验压力不小于盐水泵最大工作压力的 1.5 倍，且不宜低于 0.70MPa，并应保持 30min 压力下降不超过 0.05MPa，再延续 15min，压力不变时为合格；

10 冷冻机充制冷剂前，制冷系统各部位应进行试漏检验，并应符合表 6.5.1 的规定或设备说明书的要求。

表 6.5.1 试漏压力

部位	高压系统	低压系统
试压表压力（MPa）	1.6 ~ 1.8	1.2

11 冻结站管路密封性试验合格后，对制冷系统的低中压容器、管路及盐水箱、盐水干管、配集液管等应按设计要求铺设保温层和防潮层，并应对制冷系统进行标识，采用不同颜色以区分供路和回路，并在管路上标识介质与流向。

6.5.2 冻结站运转应满足下列要求：

1 冻结站正式运转前应对冷却水、冷媒剂（盐水）及制冷剂系统进行试运转，各系统试运转应满足下列要求：

- 1) 补充水量、水温及水质应达到设计要求，冷却水循环系统运转正常；
- 2) 盐水比重及总流量应达到设计要求，盐水循环系统正常运行；
- 3) 冷却水、盐水系统运转正常后方可加注制冷剂，制冷剂加注前应对设备及管路进行检漏，合格后方可加注。

2 冻结站正式运转应满足下列要求：

- 1) 制冷系统运转正常，盐水温度逐渐下降；
- 2) 配电系统应能连续正常供电；
- 3) 冻结站内灭火器材、电器接地等安全设施应齐全；
- 4) 冷冻机易损件、仪表、制冷剂和冷冻润滑油均应配备足够。

3 应建立冻结站运转管理机制，指定专人负责运转记录工作，按本标准附录 D 的格式记录。

6.5.3 积极冻结应符合下列规定：

1 设计规定时间内，制冷站制冷量、盐水循环流量应达到设计要求；

2 设计规定时间内，盐水循环温度应达到最低设计温度，冻结壁达到设计要求后供、回路盐水温差不宜大于 2℃；

3 积极冻结应按设计指标进行运行，以保证冻结壁能达到设计厚度和最低平均温度要求，并进行监控、检验，当达不到设计要求时应及时进行调整。

6.5.4 维护冻结应符合下列规定：

1 维护冻结应符合设计制冷参数，确保开挖期间冻结壁的功能和围护结构的安全，不应停止或减少供冷；

2 当施工需要停止个别或单组冻结孔供冷时，应分析对冻

结壁整体稳定性的影响，并应制定相应的技术措施，确保开挖和结构施工安全；

3 冻结壁各项指标达到设计值后，或由于各种原因暂时无法开挖时，可进入维护冻结。

6.5.5 冻结站停冻与拆除应满足下列要求：

1 联络通道主体结构施工结束后方可停止冻结，拆除制冷设备和管路。

2 盾构始发和接收停冻应满足下列要求：

1) 盾构始发端应在盾尾脱出冻结区，且洞门与正环管片间隙封堵完成后方可停冻；

2) 盾构接收端应在最后一环管片拼装完成，且洞门与管片间的间隙封堵完成后方可停冻。

3 冻结站拆除时，应回收盐水并制定相应环保处理措施。

4 拆除设备和管路应有技术措施。

6.6 冻结壁检测与判定

6.6.1 冻结法地层加固效果应符合下列规定：

1 冻结壁的厚度和平均温度根据土体测温孔温度检测进行计算；

2 冻土与相关结构的交界面温度通过测温孔和探孔温度进行计算；

3 冻结封水区内的水文情况根据卸压孔、探孔的出水情况和温度判定；

4 盐水供、回路温差应逐渐减小，且稳定。

5 冻结法地层加固效果应根据冻结壁的厚度、平均温度、冻土与相关结构的交界面温度，以及冻结封水区内的水文情况等指标综合判定。

6.6.2 温度检测应符合下列规定：

1 施工期间的测温孔测点检测频率宜按表 6.6.1 确定；

表 6.6.1 检测频率

施工工况	检测频率
冻结施工前	采集原始地温
积极冻结期内	1 次/d，若有异常应加密至 1 次/2h
维护冻结期内	1 次/2d ~ 3d

2 盐水循环温度应达到最低设计温度，冻结壁达到设计要求后供、回路盐水温差不宜大于 2℃；

3 维护冻结期间的盐水温度不应高于 -25℃；

4 冻结壁解冻期间，可通过在联络通道内布置测温孔检测冻结壁温度回升和解冻情况。

6.6.3 泄压孔压力检测应符合本规程第 5.2.10 条的规定。

6.6.4 探孔检测应符合下列规定：

1 冻结器供冷发生异常或冻结效果难以确定的部位应打探孔检测冻结壁温度或检测开挖区内土体的稳定情况；

2 探孔宜设置在推测的零度线附近及管片与冻土交界面冻结薄弱处，且每侧隧道应设置不少于 2 个。探孔深度应进入地层不小于 0.5m，并进行测温。

6.7 联络通道开挖与构筑

6.7.1 预加固支架与防护门应满足下列规定：

1 采用冻结法施工联络通道时，预加固支架应按联络通道结构设计要求在冻结壁交圈前安装完成。

2 联络通道应在开挖侧通道预留洞口上安装应急防护门。防护门按设计要求制作，安装与使用应满足下列规定：

- 1) 防护门应能灵活开关，关闭后应能承受安装位置的地下水土压力，且能有效阻止联络通道内水、土流出，开启后不得影响正常的开挖和结构施工；
- 2) 防护门安装好后应进行气密性试验，试验值满足设计要求；

- 3) 防护门开关应便于人工操作，紧固螺栓、风管及连接件、扳手等配件及操作工具应准备到位，且紧靠防护门放置；
- 4) 当联络通道开挖时发生透水、冒砂等情况，防护门应立即关闭，并向防护门内加压，使防护门内压力保持在设计值；
- 5) 联络通道初期支护完成后方可拆除防护门，对特殊地层按设计要求执行。

3 集水井位置有透水的砂性土层时，应设集水井口防护门或盖板。

6.7.2 联络通道开挖条件应满足下列规定：

1 开挖前建设单位应组织施工前条件核查工作，应具备下列资料：

- 1) 地层检查孔报告及地层剖面图；
- 2) 冻结壁形成检查资料，内容包括：冻结孔和测温孔的施工、冻结站运行情况、干管盐水温度变化、冻结器盐水流量、测温孔温度变化、泄压孔水压变化及泄水情况、冻结壁厚度、平均温度和冻结壁与隧道管片交界面温度、根据测温结果绘制的重要部位冻结壁剖面图等记录和图表；
- 3) 工程监测报告；
- 4) 联络通道设计文件；
- 5) 经审批的施工组织设计、施工专项方案及应急预案等。

2 开挖应满足下列规定：

- 1) 冻结壁厚度，平均温度等检验合格；
- 2) 积极冻结时间、盐水温度和盐水流量等冻结运转参数达到设计值，检查冷冻机等机电设备及电源完好，冻结系统运转正常；
- 3) 本规程第 6.7.2 条第 1 款所列的全部资料；

- 4) 在两侧隧道开挖断面内未冻结区域打设不少于 2 个探孔，探孔内无持续的泥水流出。当联络通道处于高风险地层或联络通道位于水体下时，在两侧隧道开挖断面内未冻结区域打设不少于 3 个探孔，分别为未冻结开挖区的上部、中部、下部，探孔内无泥水流出，时间持续不少于 24h；
- 5) 隧道预加固支架和防护门按设计要求安装完成且通过验收；应急预案、应急物资已落实并按规定通过相关验收；
- 6) 其他开挖相关准备工作已完成。
- 3 应设置通风排水系统，隧道内使用轴流风机进行通风，使用隧道排水管路进行污水排水；
- 4 开挖应在施工前条件核查通过后进行。
- 6.7.3 联络通道开挖应满足下列规定：**
- 1 联络通道开挖宜采用图 6.7.3 流程施工：

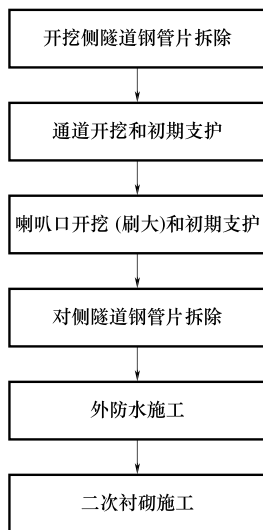


图 6.7.3 联络通道开挖流程图

2 兼做区间泵房的联络通道的集水井须在通道二次衬砌施工完成后再开挖。

3 开挖与支护施工参数应该与开挖方式和支护结构相适应，做到对冻结壁及时、有效的保护。

4 土方开挖质量控制应满足设计要求。

5 初期支护质量控制与验收指标应满足设计要求。

6.7.4 联络通道衬砌结构施工应满足下列规定：

1 联络通道结构及防水层应严格按照设计和有关施工规范施工；

2 混凝土入模温度、初凝时间等参数应根据施工工序安排、混凝土运送及冻结法施工环境温度情况，按混凝土施工有关规定确定；

3 通道拱部混凝土应按有关规定施工或采取措施确保浇筑密实；

4 联络通道集水井应在衬砌混凝土不拆除模板养护 48h 后方可开挖。

6.8 冻结孔充填与封堵

6.8.1 联络通道冻结孔充填与封堵应符合下列规定：

1 封孔时要求分组停止冻结，并尽快割除隧道管片上停冻的孔口管和冻结管填充封堵，防止孔口管和冻结管周围冻结壁解冻漏水；

2 对遗弃在地层中的冻结管应进行充填，并保证充填密实；

3 钢管片上的孔口管割除后应采用 10mm 厚钢板进行焊接封堵，焊缝高度 6mm；

4 混凝土管片上割除孔口管或冻结管后留下的孔口用速凝堵漏剂封堵，并预埋注浆管进行注浆堵漏；

5 钢管片非钻孔格仓充填应采用微膨胀混凝土进行挂网充填、找平。

6.8.2 盾构始发和接收拔管与封堵应满足下列规定：

- 1** 停止冻结需在盾构机完全始发和接收后进行。
- 2** 冻结管拔除、盾构始发与接收工作应满足下列条件后进行：

- 1) 实测探孔在围护结构与冻土交界面温度满足设计要求；
- 2) 打开探孔确认无泥水涌出；
- 3) 盾构机设备完好，推进前准备工作完成。

3 水平冻结管拔除应符合下列规定：

- 1) 冻结孔由隧道中心向外逐圈拔除，第 1 圈中心孔及外侧第 2 圈上部冻结孔应先拔除，其他冻结孔继续冻结；第 2 圈冻结孔应间隔拔除；最外圈水平冻结孔在盾构机始发与接收完成后停止冻结，并按本规程 6.8.1 条的规定进行充填和封堵；
- 2) 拔除冻结管前，应提前准备好拔管用工器具、物资等，拔除冻结管可采用热盐水或热蒸汽循环方式加热土体至可扭动冻结管后进行，严禁土体过度加热；
- 3) 拔除的冻结管产生的土体孔应立即用预先准备的与冻结孔孔径匹配的强度不低于 M10 的水泥砂浆柱或预制的粘土柱回填，回填长度不应小于土体孔长的 70%；
- 4) 拔管过程中如出现断管现象，应立即采取措施进行续拔。

4 垂直冻结管拔除应满足下列规定：

- 1) 盾构始发与接收推进范围内垂直冻结管拔除应根据地层条件、盾构机位置、推进速度等因素综合确定；
- 2) 冻结管应一次性拔除，当设计有特殊要求时，可拔除至盾构机壳上方；
- 3) 垂直冻结管拔除宜采用盐水加热方式，拔除工具应安全可靠；
- 4) 冻结管一次性拔除后，应及时用强度不低于 M10 的水

泥砂浆柱或预制的粘土柱回填密实。

5 未拔除冻结管封堵应满足下列规定：

- 1) 水平未拔除冻结管，应按本规程第 6.8.1 条的规定进行处理；
- 2) 垂直未拔除冻结管，应割除冻结器头部，并回填密实。

6.9 充填注浆和融沉注浆

6.9.1 联络通道充填和融沉注浆应满足下列规定：

1 衬砌背后充填注浆和融沉注浆应在停止冻结并完成冻结孔封孔工序后进行；

2 注浆孔宜在联络通道结构施工时预埋。注浆管预埋深度以穿透结构层为宜；

3 衬砌后充填注浆宜在停止冻结后 3d ~ 7d 内进行；

4 衬砌后充填注浆宜采用单液水泥浆。注入水泥浆前应先注清水，检查各注浆孔之间砌后间隙是否畅通。注浆宜按由下而上的顺序进行，当上一层注浆孔连续返浆后即可停止下一层注浆，直至注到拱顶结束；

5 充填注浆结束后应根据地层沉降监测情况进行冻结壁融沉注浆。融沉注浆应循“少量、多点、多次、均匀”的原则；

6 融沉注浆浆液宜以单液水泥浆为主，水泥 - 水玻璃双液浆为辅。

6.9.2 盾构始发与接收融沉注浆应满足下列规定：

1 融沉注浆应在盾构始发与接收完成后配合周边环境及隧道变形监测进行；

2 注浆范围应为冻结影响区域，利用盾构隧道衬砌结构（管片）上的预留注浆孔作为地层融沉注浆孔，有条件时可采用地面打孔分区注浆；

3 融沉注浆以水泥单液浆为主，当地层漏浆严重，沉降控制效果不理想时，可采用水泥 - 水玻璃双液浆；

4 注浆压力不宜大于结构设计要求的允许值。

6.9.3 融沉注浆若采用强制解冻，宜分区、对称进行，并应在解冻的同时进行跟踪注浆；强制解冻时应加强对周围环境的监控，并应布置专用测温孔检测冻结壁解冻范围。

6.9.4 强制解冻宜采用在冻结器中循环热水的方式。

6.9.5 注浆过程中应填写注浆记录表。融沉注浆结束后，割除露出结构表面的注浆管，封堵并做好标记。

6.9.6 地层沉降大于 0.5mm/d 或累计地层沉降大于 3.0mm 时，应进行融沉补偿注浆，地层隆起达到 3.0mm 时应暂停注浆。冻结壁已全部融化，且实测地层沉降速率连续 2 次小于 $0.5\text{mm}/15\text{d}$ 时，可停止融沉注浆。

7 监 测

7.1 一般规定

7.1.1 监测工作应为验证设计、施工方案的安全性、合理性，优化设计和施工参数，分析和预测工程结构和周边环境的安全状态及其发展趋势，实施信息化施工等提供资料。

7.1.2 当监测数据达到预警指标，或是现场巡查发现可能会严重威胁工程自身安全及周边环境安全的情形时，应进行警情报送。

7.2 监测实施

7.2.1 冻结法施工期间应对影响范围内的隧道结构、周围岩土体、重要环境、冻结施工工艺等对象进行监测和现场巡查。

7.2.2 对冻结法施工隧道的监测，应以冻结施工结构为中心，按先密后疏的原则布设监测点，同时各类型监测点宜布设在同一个断面上，以便于数据的对比与分析。

7.2.3 监测方法与观测精度应满足现行国家标准《城市轨道交通工程监测技术规范》GB 50911 的相关规定。

7.3 监测频率与周期

7.3.1 针对冻结法施工隧道工程的监测，应从冻结孔钻孔前开始至融沉注浆结束止，且隧道结构与周围环境监测对象的变形速率达到稳定标准后结束。

7.3.2 施工期间的监测频率宜按表 7.3.2 确定，现场巡查频率应不低于监测频率。

表 7.3.2 监测频率

监测内容	监测频率				
	钻孔 期间	冻结 期间	开挖 期间	融沉注浆	
				自然解冻	强制解冻
管线竖向位移	1 次/d	1 次/2d	1 次/d	前 3 个月 1 次/ (2~5) d; 第 4、5 个月 1 次/ (5~10) d; 第 6 个月 1 次/ (10~15) d	第 1 个月 1 次/1d; 第 2 个月以后 1 次/ (10~15) d
建（构）筑物 竖向位移、倾斜	1 次/d	1 次/2d	1 次/d		
地表竖向位移	1 次/d	1 次/2d	1 次/d		
隧道结构竖向 位移、净空收敛	1 次/2d	1 次/2d	1 次/d		
联络通道结构竖 向位移、净空收敛	—	—	—		
冻结温度	—	1 次/2d	1 次/d	—	—

7.3.3 冻结法施工过程中应根据监测数据变化情况和现场巡查情况适时调整监测频率，当遇到下列异常情况之一时，应提高监测频率：

- 1 监测数据明显异常或速率较大；
- 2 现场巡视检查中发现初期支护、周围岩土体或重要周边环境存在明显异常情况；
- 3 存在勘察未发现的不良地质，且影响工程安全；
- 4 出现险情或事故后重新组织施工；
- 5 冻结法施工过程中冻结设备因故障停机、冻结参数异常或冻结效果不良。

7.4 监测控制值

7.4.1 监测控制值应根据设计要求确定，当无具体要求时，可按表 7.4.1 确定。

表 7.4.1 监测控制值

监测项目	监测控制值	
	变化速率 (mm/d)	累计值 (mm)
隧道结构竖向位移	1 ~ 2	10
隧道结构净空收敛	1 ~ 2	10
联络通道结构竖向位移	1 ~ 2	10
联络通道结构净空收敛	1 ~ 2	10
地表竖向位移	2 ~ 3	10 ~ 30
管线竖向位移	2 ~ 3	10 ~ 20
建（构）筑物竖向位移	2 ~ 3	10 ~ 20

注：D 为隧道结构外径（mm）。

7.4.2 地下管线与建（构）筑物的监测控制值还应根据现状情况、使用功能、产权单位的具体要求制定。

7.4.3 冻结法监测应根据监测控制值、工程特点及当地工程经验设置分级预警标准。

7.5 监测信息化反馈

7.5.1 监测技术成果宜包括现场监测资料、计算分析资料、图表、影像资料和文字报告等，成果资料应内容完整清晰，签字盖章齐全。

7.5.2 监测日报、警情快报、阶段性报告和总结报告应按《城市轨道交通工程监测技术规范》GB 50911 的相关规定，及时向相关单位报送。

7.5.3 监测数据的处理与信息反馈宜利用成熟的数据处理与信息化平台，及时上传成果文件，实现数据采集、处理、分析、查询和管理的一体化以及监测成果的可视化。

7.5.4 监测数据或现场巡查发现异常时，应及时形成警情快报，利用网络、电话、短信、信息管理系统软件等快捷工具上报建设单位及相关单位。

附录 A 冻结施工钻孔记录

表 A 冻结施工钻孔记录

工程名称		桩号及部位		施工日期			
孔位类型：		孔号：		设计孔深：m	设计角度：		
时间	钻进加尺(m)	偏值		偏斜率(‰)	偏向		备注
		垂直(mm)	水平(mm)		垂直(°)	水平(°)	
冻结管密闭试压	初始压力(MPa)	30min压力(MPa)	45min压力(MPa)	备注：			
冻结管长度(m)							
实际孔深(m)							
备注栏							
班长：				质检员：			
技术负责人：				监理工程师：			
年 月 日							

附录 B 冻结加固冻结孔成孔汇总表

表 B 冻结加固冻结孔成孔汇总表

工程名称		孔号及部位				施工日期				
序号	孔号	设计长度 (m)	实际长度 (m)	长度差 (m)	水平方向偏斜值		垂直方向偏斜值		成孔日期	备注
					偏向	偏值 (mm)	设计仰俯值	偏向	偏值 (mm)	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
班长：		质检员：			技术负责人：			监理工程师：		年 月 日

附录 C 冻结加固测温测压日报表

表 C 冻结加固测温测压日报表

工程名称				孔号及部位			
冻结天数	运转台数	盐水设计温度 (℃)	盐水温度 (℃)		供路干管		
					回路干管		
冻结孔盐水回路温度 (℃)							
孔号	温度	孔号	温度	孔号	温度	孔号	温度
测温孔温度 (℃)							
深度 孔号							
泄压孔压力 (MPa)							
孔号				压力			
测量:	质检:		技术负责:		监理:	年 月 日	

附录 D 冻结加固冻结运转日报表

表 D 冻结加固冻结运转日报表

工程名称：		日期：										年 月 日 — 年 月 日			
班 组	记录 时间	吸气 压力 (MPa)	排气 压力 (MPa)	盐水 水位 (cm)	油压 (MPa)	进水 压力 (MPa)	回水 压力 (MPa)	电压 (V)	电流 (A)	能量 (%)	油温 (℃)	水温 (℃)	盐水温度 (℃)		记录人
													供路	回路	
白 班															
夜 班															
备注：记录时间建议2h一次。															
班长：		质检员：				技术负责人：				监理工程师：				年 月 日	

本规程用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

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

引用标准名录

- 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 《钢结构焊接规范》 GB 50661
- 《工程结构通用规范》 GB 55001
- 《钢结构通用规范》 GB 55006
- 《混凝土结构通用规范》 GB 55008
- 《地铁设计规范》 GB 50157
- 《建筑结构荷载规范》 GB 5009
- 《混凝土结构设计规范》 GB 50010
- 《建筑地基基础设计规范》 GB 50007
- 《建筑抗震设计规范》 GB 50011
- 《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666
- 《建筑设计防火规范》 GB 50016
- 《制冷设备、空气分离设备安装工程施工及验收规范》 GB 50274
- 《机械设备安装工程施工及验收通用规范》 GB 50231
- 《岩土工程勘察规范》 GB 50021
- 《城市轨道交通工程监测技术规范》 GB 50911
- 《混凝土结构耐久性设计标准》 GB/T 50476
- 《土工试验方法标准》 GB/T 50123
- 《钢筋焊接及验收规程》 JGJ 18
- 《建筑工程冬期施工规程》 JGJ/T 104
- 《人工冻土物理力学性能试验》 MT/T 593
- 《城市轨道交通冻结法设计施工技术规程》 DB/T 29 - 251

浙江省工程建设标准

城市轨道交通工程冻结法
应用技术规程

Technical specification for freezing method construction
of urban rail transit

DBJ33/T 12 × × - 2025

条文说明

目 次

1	总则	53
2	术语和符号	54
2.1	术语	54
3	基本规定	55
4	勘察	56
4.1	一般规定	56
4.2	技术要求	56
5	设计	60
5.1	一般规定	60
5.2	冻结壁设计	61
5.3	冻结孔布置	62
5.4	初期支护设计	62
5.5	预加固支架设计	63
5.6	防护门设计	63
5.7	保温设计	63
5.8	冷冻站设计	63
5.9	冻结封孔	64
6	施工	65
6.1	一般规定	65
6.2	冻结孔施工	65
6.3	测温 and 泄压孔施工	66
6.5	冻结站施工	66
6.7	联络通道开挖与构筑	67
6.8	冻结孔充填与封堵	69

6.9	充填注浆和融沉注浆	69
7	监测	71
7.1	一般规定	71
7.2	监测实施	71
7.3	监测频率与周期	73
7.4	监测控制值	74
7.5	监测信息化反馈	74

1 总 则

1.0.1 轨道交通工程作为城市交通的重要组成部分对城市政治经济、文化教育、科学技术等方面的发展影响极大，也是城市建设中的一个重要方面。随着轨道交通工程的快速发展，各地对施工过程中的质量安全问题提出了更高的要求。冻结施工因其施工方法灵活、形式多样，冻结后可靠性高、强度高、设备简单、技术经济效果较好，隔水性良好以及对环境无污染等优点，近几年在地下工程中倍受重视，特别是在松软含水地层地铁联络通道开挖施工中具有不可替代性，并在特殊情况的工程抢险中也有较多应用。因此及时、全面的制定本规程以指导城市轨道交通工程冻结法施工势在必行。

本条是编制本规程的目的，以统一城市轨道交通工程冻结法施工中勘察、设计、施工和监测，达到确保施工安全和工程质量的目的。在执行本规程时，要掌握本规程的指导原则。

1.0.2 冻结分低温冻结和超低温冻结。因市政工程埋深一般不超过 50m，冻结基本用不到超低温冻结，因此本规程适应于低温冻结的轨道交通建设的车站基坑、盾构工作井、暗挖竖井、区间隧道联络通道、横通道及盾构始发、接收端的地层的封水、土体加固等采用常规低温冻结工法的勘察、设计、施工和监测。

1.0.3 本条规定在执行本规程时，要掌握与现行的国家标准、行业标准和浙江省的相关标准的衔接性，因此设计时除执行本标准外，尚应符合国家和浙江省现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.2 用低温盐水等人工制冷循环吸收地层热量的方法，在拟建地下建（构）筑物的周围及基底的含水或不稳定地层进行人工冻结，形成具有临时承载或隔水作用的冻结壁结构物，在冻结壁的保护下进行地下开挖和构筑施工的一种对周边地层进行临时性预加固或封水的岩土工程施工方法。

2.1.3 目前冷媒剂主要采用盐水，其它冷媒剂可参考本规程。

2.1.6 设计冻结壁厚度一般指在拟建地下建（构）筑物开挖面外侧的冻结壁所要达到的最小厚度，该最小厚度称有效冻结壁厚度。

2.1.11 按不同的冻结设计要求布置，用于安装冻结器的钻孔，有竖向孔、横向孔、斜向孔之分。冻结孔一般围绕地下构筑物外侧的环线布置，该环线称冻结孔布置圈。

2.1.13 冻结管和供、回液管要求导热性好、耐低温，抗盐水电力不渗漏，一般采用低碳无缝钢管或增强聚乙烯塑料管。

3 基本规定

3.0.2 冻结法施工要求根据总体施工组织设计，编制冻结专项施工方案、冻结专项应急预案。

3.0.6 冻结法施工中使用的试验、检测、测量、质量检查等设备、仪器、仪表等计量器具，新的计量器具要求有出厂检定证书，旧的计量器具按照《中华人民共和国计量法》中对强制检定器具（A类）、周期管理计量器具（B类）、一般管理计量器具（C类）有的规定，按照规定的内容和时间间隔进行检定。

4 勘 察

4.1 一般规定

4.1.1 冻结法勘察宜进行专项勘察。目前，浙江省轨道交通工程常规勘察中对可能采用冻结法施工的联络通道、进出洞门等建（构）筑物，勘探点布置一般结合主体结构一并布置，若主体结构勘察中未包含则需要专门进行专门勘察。

岩土工程勘察常规方法包括工程地质调查与测绘、勘探、取样、原位测试、室内试验、长期观测，以及对施工区域工程地质条件的评价、预测等。冻结法施工应用于局部地下空间工程需要，勘察应根据建（构）筑物特点、类型、结构形式及埋置深度选择合理勘察手段，并结合地质条件针对性进行评价。

4.1.3 地下水对冻结法施工影响较大，地下水的流速、流向会影响冻结壁延时交圈，地下水的含盐量影响地下水结冻温度，专项勘察应进行查明。根据经验，施工区含水层地下水活动频繁、地下水流速超过 2m/d 时，应提供地下水流向、流速等资料。

4.2 技术要求

4.2.1 勘探孔的布置应根据工程建设规模满足现行规范的控制精度要求，按拟建建（构）筑物的边线和角点进行布置，地质条件变化较大应加密勘探点以满足勘察精度要求。目前，浙江省内城市轨道交通工程常规区间双线隧道净距在 $11\text{m} \sim 13\text{m}$ ，联络通道通常按对角线进行布置勘探点，车站进出洞按垂直隧道洞门外侧布置勘探点，孔间距按隧道结构 $3\text{m} \sim 5\text{m}$ 布设将在 $35\text{m} \sim 40\text{m}$ ，若双线隧道净距大，两侧布置的勘探点将不能有效控制地

层变化，需要考虑中间内插勘探孔以满足勘察精度。

一般性勘探孔深度要求进入冻结深度以下 2 倍冻结壁厚度，是考虑设计提供冻结壁厚度为确保安全的低限值，实际施工冻结壁厚度大于设计值，勘探深度应包含全部冻结土层，故确定为 2 倍冻结厚度。控制性孔深度应充分考虑可能对冻结影响的因素，查明如地下含水层、软弱夹层、破碎带等，据此按 3 倍冻结壁厚度作为实际控制孔深的原则。当可以确定对冻结法影响不大的基岩层或稳定的厚度大于 5m 的硬土层时，勘探孔深度可以适当减少。

4.2.2 勘探点封孔可采用下列方法：1. 采用干黏土球回填，并应边回填边夯实，有套管护壁的钻孔应边起拔套管边回填；2. 采用水泥浆或 4：1 水泥、膨润土浆液通过泥浆泵由孔底向上灌注回填，泥浆泵压力为 0.3MPa ~ 0.6MPa，灌至孔口后观测 10min，浆面稳定后停止灌浆；3. 其他有效封孔方法。勘探点不回填封孔可能造成以下危害：1. 地表水和地下水通道，影响冻结效果，2. 钻孔成为管涌通道，对工程构成威胁，3. 深层承压水循钻孔形成基坑突涌，4. 对地下工程造成透水、涌砂，影响工程安全。钻孔的封堵，潜水含水层一般应采用黏土球回填，承压水含水层应采用水泥浆或 4：1 水泥浆、膨润土浆液通过泥浆泵从孔底向上灌注封孔。

4.2.3 冻结法设计所需土层热物理参数为工程范围典型代表土层获取的试验值，有成熟地区经验的也可参照经验值采用。浙江省内冻土力学强度测试尚处于经验积累阶段，目前杭州、绍兴、宁波等地市已开展专项研究，考虑冻土力学强度的取样数量多、测试费用高、试验难度大，对有成熟经验的土层可采用经验值作为设计依据，故本规范未对冻土力学强度作为必要条件限制，但对于无经验积累的土层应进行冻土力学强度测试。

冻结法施工垂向影响范围主要为上、下各 1D（D 为隧道直径或高度），设计需要地基土的原始地温、结冰温度、导热系数、

导温系数、比热容、冻土的抗压强度、抗剪强度、抗弯强度、冻胀率和融沉系数。

考虑到浙江区域地层性质的差异性和可能采用施工条件的差别，为满足不同含水率及不同冻结温度下形成冻土强度的评价要求，根据需要可利用钻孔取土后的扰动土进行不同含水率、不同冻结温度下的物理力学参数和冻胀率的测试，样品数量和制备参照表 4-1 要求：

表 4-1 原状土试样规格和数量

指标	试样尺寸	数量（件）	需样总长
原状土及冻土导热系数	Φ61.8mm×20mm	4	1 个 Φ105mm×300mm
原状土及冻土比热	Φ61.8mm×20mm	4	1 个 Φ105mm×300mm
土体冻结温度试验	Φ30mm×50mm	4	1 个 Φ105mm×300mm
冻土抗压强度（冻土弹模、冻土泊松比）	Φ61.8mm×125mm	15	7 个 Φ105mm×300mm
蠕变参数	Φ50mm×100mm	5	3 个 Φ105mm×300mm
弯拉强度	200mm×50mm×50mm	4	采用重塑土样进行
冻胀率	Φ80mm×40mm	4	1 个 Φ105mm×300mm
有载冻胀	Φ80mm×40mm	6	3 个 Φ105mm×300mm
融沉系数	Φ80mm×40mm	4	1 个 Φ105mm×300mm
剪切强度	Φ50mm×100mm	8	3 个 Φ105mm×300mm
合计			21 个 Φ105mm×300mm

4.2.4 试验成果应结合浙江省地方特色和冻结法工艺特点进行优化，作为设计计算使用的参数。已做过区域性人工冻土物理力学性能试验研究或已开展过较多人工冻土物理力学性能试验工作的地区，冻结法设计、施工时可利用其相关成果。

土体温度是指在冻结加固范围内，处在自然状态未受到人工干扰的地层原始温度。

已做过区域性人工冻土物理力学性能试验研究或已开展过较多人工冻土物理力学性能试验工作的地区，冻结法设计、施工时可利用其相关成果。

外界温度是指冻结加固区域的周围温度。冻结层的原始地温是设计参数之一，地表以下地温的影响因素较多，且存在一定动态变化，因此需要专门布设地温测试点进行长期动态观测。

冻结土层常规物理测试可采用《土工试验方法标准》GB/T 50123。冻结土层力学指标测试目前国内主要采用煤炭行业标准《人工冻土物理力学性能试验》MT/T 593，考虑测试方法和手段的不断更新，本规程仅作参考性使用，技术条件满足即可。

4.2.5 正常地温自地面以下分为变温层（大气影响深度）、常温层、地温梯度递增层，地形、气候、地下水位等对常温带的温度和深度有直接的影响，气温又与纬度有关。根据现有浙江地区的地温观测经验，自地面以下至地下水位层深度地温变化较大，深度6m以下受气温影响开始趋小，多为18℃~20℃，深度15m~18m以下开始相对较为稳定趋于16℃~18℃，常温层厚度一般有20m~60m，厚度根据地层不同各有差异。目前，勘察常规地温观测可分为地埋观测法和直接观测法，由于影响地温因素很多，直接观测法短时间不一定能完全反映冻结法施工层的地温特征，因此，本规程规定要求定期观测地温，其目的是能正确反映地温变化特征，对有相关经验的地区可以采用直接观测法的实测值为设计依据，对无经验的地区建议采用地埋观测法，观测周期不少于1年，观测间隔可根据实际需要采用十天或一月为间隔。

5 设 计

5.1 一般规定

5.1.2 地层设计中应考虑冻结施工过程中的补充注浆及施工完成后的融沉注浆，设计文件中应对此进行明确。

5.1.3 有本条列出的情况时，设计中应要求通过试验或现场实测对冻结产生的影响作出评估，对于特殊情况下的冻结法应进行特殊设计，如：冻结法与盾构铺轨施工存在交叉时，应考虑将冻结站设置在影响范围之外，并考虑距离对冻结法的影响。

条文中第4款“近3个月内进行过水泥系土体地层加固”，是充分考虑水泥水化热对冷冻效果的影响。

1 工程特征出现下列情况之一时应采取针对性措施：

- 1) 联络通道结构顶部覆土厚度小于6m，或大于25m；
- 2) 两隧道轴线间距大于20m，或小于9m；
- 3) 区间圆隧道直径（外径）大于10m；
- 4) 侧式泵站；
- 5) Z型通道；
- 6) 叠加通道；
- 7) 通道位于江底、湖底等水体下；
- 8) 被扰动过的地层。

2 水文地质条件出现下列情况之一时应采取针对性措施：

- 1) 土层结冰温度低于 -2°C 或有地下热源可能影响土体冻结；
- 2) 在含有承压水的地层中施工；
- 3) 存在瓦斯、有毒有害气体、暗浜、古河道、岩溶等不

良地质条件。

3 当主要影响范围（不得小于1倍中心埋深范围）内竖向投影区域内存在下列情况之一时应采取针对性措施：

- 1) 居民住宅、保护建筑、综合管廊、隧道及其他重要建筑（构）筑物或沉降敏感区域等；
- 2) 城市主干道、桥梁或地下通道；
- 3) 给水、排水、热力、燃气、输油、电力、通信等重要管线；
- 4) 铁路、公路、机场、轨道交通设施；
- 5) 江河、湖泊；
- 6) 同步施工的其他地下工程；
- 7) 其他影响因素。

5.1.5 采取降水措施时，应计算冻结壁处降水引起的地下水流速，条文中关于“影响区域”范围取值应根据土层情况及项目特点进行确定，一般淤泥质等渗透性系数较小的土层建议取值100m，砂层等渗透性系数较大的土层建议取值200m。

5.2 冻结壁设计

5.2.3 条文中第2款当冻结壁围护区底部敞开时，应进行越流、管涌等地下水动力学验算。

条文中第3款采用“开挖区域外有效冻结壁+开挖区域内完全冻结”的冻结壁形式有利于控制开挖过程中的冻结壁变形，提高开挖施工安全性，但不利于冻融变形控制，并会影响施工进度。

5.2.4 初期支护或内支撑的主要作用是在施工联络通道衬砌前补偿冻结壁因蠕变而引起的承载力降低、防止冻结壁表面局部化冻、塌落和控制冻结壁变形。

5.2.5 盾构始发接收前，围护结构外侧一定范围一般为盾构盾体长度，具体以设计图纸为准。常见冻结法加固形式有水平冻

结、垂直冻结、水平 + 垂直组合冻结。

5.2.8 条文中第 1 款地面超载、主动土压力等冻结壁荷载应参考已有《建筑基坑支护技术规程》等规程计算。

5.2.11 在一般施工工况下，采用经验方法预计冻结壁形成是可行的，但应分析散热边界条件和施工参数变化可能给冻结壁形成带来的不利影响。施工中应通过冻结壁温度实测判定冻结壁的形成状况，特别是实测冻结壁与隧道管片交接面等复杂边界处和冻结壁扩展异常处的冻结壁形成状况。

冻结壁平均温度可参照《简明建井工程手册》相关计算公式，采用成冰公式法、面积法或数值分析法进行计算。

5.3 冻结孔布置

5.3.1 条文中第 3 款对于线间距大于 20m 的联络通道，考虑到目前跟管钻进技术水平，从一侧打孔钻孔偏斜较大，打钻质量不易保证，因此从两侧打孔，减小了钻孔长度，能够有效控制终孔间距，有利于冻结壁的形成。

条文中第 5 款因联络通道超长，根据目前跟管钻进技术水平，透孔难以实现时，要对接络通道两侧开口位置标高、里程进行闭合导线测量，得出实际的位置与设计的偏差，指导冻结孔的布置位置和钻进方向。

冻结孔最大允许成孔间距指设计冻结壁厚度范围内冻结孔终孔位置和相邻冻结孔的垂直距离。

5.4 初期支护设计

5.4.2 初期支护常用的方式有 2 种，一种是型钢 + 木背板 + 钢筋网 + 喷射混凝土，木背板后砂浆充填形式；另一种是钢筋格栅 + 木背板 + 钢筋网 + 喷射混凝土形式。两种初期支护方式均可选择，具体方式以设计为准。

5.5 预加固支架设计

5.5.1 预加固支架多采用多边形支撑，有过轨道要求的常采用环形支撑，便于轨道铺设。

5.5.2 条文中第1款预加固支架安装在隧道管片环缝处可能与防护门等冲突，此时预加固支架可向外侧平移安装，当出现下列情况之一时，两侧分别设置2榀预加固支架：

1 联络通道处于高风险地层（砂层、承压水层、圆砾层、流塑或者软塑高灵敏地层等）；

2 联络通道位于水体（河、湖或者江）下；

3 联络通道埋深超过30m的或者埋深小于10m的。

5.6 防护门设计

5.6.4 水密性实验压力应结合设计图纸和《压力容器》规范要求确定，同时应保证一定量余量。

5.6.5 隧道联络通道开挖过程中出现断管、盐水泄露等有可能存在涌水涌砂的风险，防护门和对面管片在通道结构做完后拆除，拆除后施工两侧的喇叭口，施工缝应按照设计要求处理。

5.7 保温设计

5.7.2 隧道管片保温层可采用聚氨酯、橡塑、聚苯乙烯和聚乙烯软质泡沫等保温材料。保温层的吸水率小于1%为宜，且不得浸泡在水中。在7月~9月间施工，保温层厚度不宜小于40mm。

5.8 冷冻站设计

5.8.1 冻结管吸热能力计算应包括冻结管、干管和冷冻排管，冻结站设置在地面时，应考虑地面承载力是否满足冻结站受力要求。

5.8.2 冷冻机的蒸发温度、冷凝温度和工况制冷能力计算应以产品说明书为准，并考虑设备老化制冷效率降低的情况。

5.8.3 本条第1款中，氯化钙应考虑适量备用，以防盐水意外损失。氯化钙实际纯度应经过现场试验确定。

5.8.4 本条第3款中，在盐水干管中安装软接头可减小温度应力和制冷设备运转引起的振动对干管稳定性的影响。

5.9 冻结封孔

5.9.1 采用 C30 硫铝酸盐微膨胀水泥充填剩余空间与钢管片内齐平；钢管片表面焊接 12mm 厚钢板，焊缝高度 8mm。钢板应覆盖钻孔格仓，并与格仓肋板搭接不小于 50mm。钢板与钢管片之间的空隙应采用环氧砂浆进行密实充填。钢板表面涂刷与钢管片同材质防锈漆。

对遗弃在地层中的冻结管应进行充填，充填前采用压缩空气吹干管内盐水；充填冻结管材料应采用 M10 以上水泥砂浆或 C20 以上细石混凝土，对于上仰角冻结管充填管长度应不小于管口以内 1.5m，对于下俯角冻结管原则上应全段充填。

孔口管割除部位采用 10mm 厚钢板进行焊接封堵，焊缝高度 6mm。焊缝处涂抹遇水膨胀止水胶后，在割除区域侧壁施工 M12 以上膨胀螺栓 2 根（外侧预留长度不小于 3cm），并与孔口管残留部分焊接连接，遇到肋板时应与肋板进行焊接。

取出非钻孔格仓保温材料并采用 C30 硫铝酸盐微膨胀混凝土进行挂网充填、找平。

针对盾构始发与接收等冻结加固封孔可参考以上措施实施。

6 施 工

6.1 一般规定

6.1.4 积极冻结期间，供电中断造成短暫停冻，应按停冻时间的2倍相应延长积极冻结时间，开挖施工期间供电中断造成停冻，应立即启动备用电源，加大温度监测频率，密切关注冻结壁状态。

6.2 冻结孔施工

6.2.1 设备选型、安装、调试应满足下列规定：

2 冻结孔施工平台一般由扣件式钢管搭设，应符合《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规程》的规定，并且要求在水平方向上与隧道管片撑严。

6.2.2 开孔施工应符合下列规定：

1 在特殊情况下冻结孔开孔位置误差大于100mm时，可适当调整相邻冻结孔的开孔位置，使冻结孔开孔间距比较均匀。冻结孔的开孔位置和偏斜影响冻结孔的成孔间距，冻结孔成孔间距对于冻结壁的形成质量与形成速度起到关键作用。在一般情况下，较小、较均匀的冻结孔成孔间距对冻结壁形成是最为有利的。

2 孔口管安装应符合下列规定：

- 1) 孔口管应避开管片接缝、螺栓孔并宜避开钢管片肋板、混凝土管片主筋；
- 2) 孔口管端部应加工鱼鳞扣长度不少于200mm。

6.2.3 钻进施工应满足下列规定：

1 跟管钻进指用冻结管作钻杆钻进的施工方法，冻结管端部连接钻头和逆止阀，钻进到设计深度后用丝堵密封冻结管端头。软土地层用夯管法施工冻结孔有以下优点：一是地层水土不会流失且有压密作用，有利于控制地层沉降；二是冻结管接头采用内衬管对焊接头，不易渗漏、断裂；三是管端无钻头，有利于提高冻结壁与对侧隧道管片之间的冻结质量；四是施工中孔口出水冒泥的可能性极小，有利于施工安全。实践表明，当冻结孔深度在 20m 以内时，冻结孔成孔偏斜质量可以满足设计要求。跟管钻进或夯（顶）进冻结管时，应安装孔口密封装置并有效阻止漏水漏泥。

6 冻结孔的间距是确定冻结效果的重要因素，因此规定在成孔后测量冻结孔最大钻孔间距，绘制冻结孔轨迹，若偏差超过设计要求，进行调整后施工的轨迹。

8 冻结孔施工结束后，应根据地层沉降监测情况确定注浆量，一般情况下注浆体积可取流失土体体积的 2 倍。应避免注浆对周围冻结孔施工的影响。

6.3 测温 and 泄压孔施工

6.3.2 测温装置安装应符合下列规定：

2 管口进行密封和保护，主要是为防止测温元件及电缆在后续施工过程被移位、损坏和提高测温的准确性。

6.3.3 泄压孔施工应符合下列规定：

1 泄压孔施工应深入地层不小于 300mm；

3 泄压孔孔径不应小于 38mm，泄压孔孔口安装压力表的精度应达到 $\pm 0.02\text{MPa}$ 。

6.5 冻结站施工

6.5.1 城市轨道交通工程建设施工，因其位于城市内，施工安全、环境保护标准要求高，为此制定本条规定。

6.5.2 冻结器一旦开始冻结，制冷系统的一些易损件会出现问题，为防止因制冷站停止运转时间过长，造成冻结壁失效发生安全问题，要求一些易损件需要有备品，便于及时更换。

6.5.4 盾构始发或接收，土压平衡盾构机是无法建立土仓压力的，只有在盾尾脱出冻结区，且洞门管片间隙封堵完成后才能建立土仓压力；盾构接收端只有最后一环管片拼装完成，且洞门与管片间的间隙封堵完成后，才不会发生洞口喷涌。

6.7 联络通道开挖与构筑

6.7.1 预加固支架与防护门安装应符合下列规定：

1 预加固支架一般在交圈前安装完毕。

预加固支架安装在隧道管片环缝处可能与防护门等冲突，此时预加固支架可向外侧平移安装。

2 防护门的作用是在开挖过程中如冻结壁透水、漏泥或失稳，可以用水压平衡法阻止冻结壁继续透水、漏泥或变形。

安装防护门前应检查钢管片之间和钢管片格仓之间是否密封，否则应采用焊接、注浆等方法提前进行处理。

如关闭防护门时联络通道挖空的体积不大，可以配合向挖空区注入聚氨酯等注浆充填材料。

6.7.3 联络通道开挖应满足下列规定：

2 开挖与支护施工参数应满足下列规定：

- 1) 初期支护可采用由喷射混凝土、型钢（或格栅）支架、木背板和砂浆充填层组成的结构形式；
- 2) 初期支护型钢支架可采用型钢制作安装。型钢支架、喷射混凝土强度等级满足设计要求；
- 3) 初期支护的承载力应符合设计要求；
- 4) 可采取全断面开挖方式，开挖面土体存在坍塌风险时可以放坡，也可以采取留核心土、注浆加固或分台阶开挖等措施；

- 5) 掘进段长宜取 500mm ~ 1000mm，并宜与初期支护的钢架间距对应。
- 3 土方开挖质量控制应满足下列规定：**
- 1) 开挖断面方向尺寸应满足设计要求，通道开挖中心线偏差不应大于 20mm，且单侧超挖不得大于 30mm；
 - 2) 最大空帮距不宜大于 2 榀支架支护段长，重要建（构）筑物下适当减小最大空帮距；
 - 3) 冻结壁暴露时间应控制在 24h 内。
 - 4) 冻结壁暴露面最大收敛位移不应大于 20mm。
- 4 初期支护质量控制与验收指标应符合下列规定：**
- 1) 型钢（格栅）支架制作应符合有关钢结构和混凝土施工质量验收规范的规定；
 - 2) 型钢（格栅）支架安装的垂直度偏差不应大于 20mm，标高偏差不应大于 20mm，支架轴线偏差不应大于 20mm，相邻支架间距偏差不应大于 30mm，同一支架横梁两端水平高差不应大于 20mm，相邻支架间距应连接牢固；
 - 3) 木背板厚度误差不应大于 5mm，背板间隙不应大于 10mm，背板搭接钢支撑长度不应小于 30mm；
 - 4) 工字钢支架安装完毕后即可喷射混凝土，提前确定好喷射混凝土配合比，喷射施工前先进行试喷，试喷合格后再投入喷射施工。喷射混凝土强度等级、厚度应符合设计要求，厚度误差不应大于 $\pm 20\text{mm}$ ，每次喷砼完毕后，即时检查厚度，若厚度不够需进行补喷达到设计厚度；
 - 5) 木背板背后充填应密实，不应留空洞。
- 6.7.4 联络通道衬砌结构施工应满足下列规定：**
- 2** 在一般情况下联络通道结构施工 环境温度不会对混凝土强度增长产生明显影响，不同龄期的混凝土强度可按标准养护条

件预计。但是，在施工结构时如果初期支护表面有明显结霜，则应监测混凝土浇筑后的温度变化，根据实测温度预计不同龄期的结构混凝土温度强度。结构混凝土一般可不加防冻剂。

6.8 冻结孔充填与封堵

6.8.1 冻结孔充填与封堵应满足下列规定：

1 二衬结构或盾构管片结构体上冻结管割除的深度不小于 100mm，这样能够很好的充填冻结管孔、很好的密封和找平结构表面及其应有的强度；

6.8.2 盾构始发和接收拔管与封堵应满足下列规定：

5 垂直未拔除冻结管，只需将冻结器头部割除、供液管拔除，冻结管须割除至基底以下不小于 100mm，冻结管割除后应及时用强度不低于 M10 的水泥砂浆柱或 C20 以上细石混凝土回填密实。

6.9 充填注浆和融沉注浆

6.9.1 联络通道充填和融沉注浆应满足下列规定：

1 充填注浆的目的：一是防止冻结壁局部解冻透水后衬砌后间隙导水而增加衬砌漏水的可能性，二是通道拱顶混凝土不容易浇注密实，及时充填注浆有利于补强结构并减小冻结壁解冻过程中的变形。注清水时如发现衬砌后间隙不畅通，可以通过检测预留注浆孔内温度，判断衬砌后间隙是否结冰。若衬砌后间隙结冰，可适当延长充填注浆时间，增加注浆次数；

2 注浆管外露注浆管头应用丝堵拧紧，布孔密度以 $2\text{m}^2 \sim 4\text{m}^2/\text{个}$ 为宜；

4 衬砌后充填注浆宜采用水灰比为 0.8 : 1 ~ 1 : 1 单液水泥浆；

5 为了减小融沉注浆对地层的扰动，及时跟踪注浆，根据融化速度控制注浆；

6 水泥-水玻璃双液注浆，水泥浆与水玻璃溶液体积比宜为 1 : 1，其中水泥浆水灰比宜为 0.8 : 1 ~ 1 : 1，水玻璃波美度可根据设计浆液凝结时间进行调整。

6.9.3 冻结壁强制解冻的目的主要是为了加快融沉补偿注浆速度，缩短冻结对周边环境影响的时间。强制解冻按冻结壁底板、冻结壁两侧、冻结壁顶板的顺序循环进行。在强制解冻初期，跟踪注浆以注单液水泥浆为主。强制解冻，需要防止地层加速沉降影响周边地下管线和建（构）筑物安全，并加强通道结构及隧道管片漏水的封堵。

6.9.4 强制解冻热水温度宜控制在 40℃ ~ 70℃。

7 监 测

7.1 一般规定

7.1.2 警情报送是工程监测的重要工作之一，当监测数据达到预警标准时应进行警情报送。此外，当现场巡查过程发现下列情形之一、可能会严重威胁工程自身及周边环境安全时，也应进行警情报送：

- 1 联络通道、隧道结构出现明显变形、较大裂缝、断裂、较严重渗漏水或涌砂涌土等；
- 2 周边地表出现突然明显沉降或较严重的突发裂缝、坍塌；
- 3 建（构）筑物、桥梁等周边环境出现危害正常使用功能或结构安全的过大沉降、倾斜、裂缝等；
- 4 周边地下管线变形突然明显增大或出现裂缝、泄漏等；
- 5 冻结设备故障或异常，影响冻结系统正常运转时；
- 6 根据当地工程经验判断应进行警情报送的其他情况。

7.2 监测实施

7.2.1 软土地区冻结法联络通道施工过程中需要进行有效的监测控制，结合杭州、上海等地多年的工程经验，主要可以将监测对象分为三大类，即邻近的隧道结构、周围岩土体及周边环境。参考行业标准《隧道联络通道冻结法施工及验收规范》NB/T 10222 及上海市地方标准《城市轨道交通工程施工监测技术规范》DG/TJ 08 - 2224 的相关规定，周围岩土体、重要环境对象的监测范围不宜小于以联络通道中心埋深的 1.5 倍区域，或以联络通道中心为圆心、半径 20m 的区域，并按监测范围较大

者确定，相关监测项目可根据下表确定。

表 7-1 监测项目要求

序号	监测对象	监测项目
1	隧道结构	竖向位移
2		净空收敛
3	周围岩土体	地表竖向位移
4	建（构）筑物	竖向位移
5		倾斜
6	地下管线	竖向位移
7	冻结施工过程	冻结温度

冻结法施工过程中应进行现场巡查，巡查宜包括下列内容：

表 7-2 现场巡查要求

分 类	巡查内容
施工情况	钻孔、冻结或开挖施工工况
	联络通道开洞口、始发接收洞门凿除等情况
	冻结法设备运行状况、冻结施工参数、冻结效果等情况
隧道情况	隧道衬砌破损、开裂、错台情况
	渗漏水情况
周边环境	建（构）筑物、桥梁墩台或梁体等的裂缝情况
	地下管线的破损、泄漏情况
	周边路面或地表裂缝、沉陷等情况
	工程周边开挖、堆载、打桩等可能影响工程安全的其他活动
监测设施	基准点、监测点的完好状况、保护情况
	监测元器件的完好状况、保护情况

7.2.2 以冻结法施工联络通道为例，结构本体监测点可按下列规定布设：

1 以联络通道为中心在隧道左、右线的前后方向的隧道衬砌上布点，在联络通道正对的衬砌以及两侧位置分别按 2m、4m、6m、6m、6m 的间距各布设 1 组监测断面；

2 每个监测断面宜在拱顶、拱底、两侧拱腰处布设结构净空收敛监测点，拱顶、拱底的净空收敛监测点可兼作竖向位移监测点；

3 联络通道结构完成后宜在通道内均匀布设不少于 3 组拱底、拱顶竖向位移监测点及净空收敛监测点。

7.3 监测频率与周期

7.3.1 冻结法联络通道施工一般从冻结孔钻孔开始，因此要求监测工作在钻孔前完成相关监测点的布设及初始值采集。上海市地方标准《城市轨道交通工程施工监测技术规范》DG/TJ 08 - 2224 规定“融沉注浆施工结束后，地表沉降速率连续 2 次小于 0.5mm/15d 时，可停止监测”。行业标准《隧道联络通道冻结法施工及验收规范》NB/T 10222 规定“融沉注浆的结束应以地面沉降变形稳定为依据，当冻结壁已全部融化，可停止监测”。省内杭州、绍兴、宁波等地轨道交通管理部门一般要求联络通道施工应在隧道移交运营后方可停止监测，同时，监测速率稳定的标准一般设置为最后 100d 联络通道结构的沉降速率不超过 0.04mm/d。本规程要求，冻结法联络通道、冻结法盾构始发与接收的监测工作，在隧道结构与周围环境监测对象的变形速率达到稳定标准后结束。

7.3.2 监测频率主要参考杭州地区联络通道监测的现行做法，以及上海市地方标准《城市轨道交通工程施工监测技术规范》DG/TJ 08 - 2224 的相关规定。除本规程第 6 章中要求施工单位对冻结温度的检测外，监测单位应在日常监测期间中对冻结温度变化情况进行必要的监测。

7.3.3 当监测数据出现明显异常、施工现场或地面巡查发现险

情、联络通道采取强制解冻、工程险情或事故后重新组织施工等，应适时进行加密监测。

7.4 监测控制值

7.4.1 监测控制值一般以变化速率和累计值进行双控，同时应考虑前期施工已造成的既有变形数据。

7.5 监测信息化反馈

7.5.1 监测成果主要包括现场实测资料和室内数据处理成果两大类。通过仪器量测、现场巡查等手段获得各类现场实测资料后，需及时地进行计算、分析和整理工作，将现场实测资料转化为完整、清晰的分析、处理成果。室内数据处理成果可以采用图表、曲线等直观且易于反映工程安全问题的表现形式，同时对相关图表、曲线也应附必要的文字说明。

7.5.3 目前国内地铁建设越来越多地引入专业的信息化平台，用于监测数据的管理工作，可以将监测成果及时、准确地反馈给工程参建各方，提高监测成果的时效性。如杭州地区的“轨道交通工程建设安全风险监控与管理信息系统”、上海地区的“城市轨道交通地下工程监控和风险管理信息系统”已运行多年，可实现监测数据上传、可视化展示、分析等功能，为信息化施工提供了很好的技术支持。

7.5.4 软土地区进行冻结法联络通道施工风险较高，因此，当监测数据超过控制值、现场巡查发现异常时，应从施工工况、监测变形速率、数据累计变形值的大小、数据变化的趋势和规律等多方面加以综合分析和判断，形成监测警情快报，提出相应的处理措施建议，并迅速上报相关单位和建设管理部门，以便参建各方及时采取及时有效的措施。