

ICS

点击此处添加中国标准文献分类号

DB 37

山东省地方标准

DB ××/T ××××—××××

城市轨道交通联络通道冻结法施工技术规范

点击此处添加标准英文译名

(征求意见稿)

××××—××—××发布

××××—××—××实施

山东省市场监督管理局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 工程勘察和试验	5
5 地层冻结设计	5
6 冻结施工	13
7 开挖与结构施工	17
8 冻结法施工的监测与检测	22
9 应急预案	26
附录 A（资料性附录） 人工冻土试验取样及试样制备	27
附录 B（资料性附录） 土的冻胀试验	28
附录 C（资料性附录） 人工冻土静水压力下固结试验	29
附录 D（资料性附录） 人工冻土单轴抗压强度试验	31
附录 E（资料性附录） 人工冻土三轴剪切强度试验	33
附录 F（资料性附录） 人工冻土单轴蠕变试验	35
附录 G（资料性附录） 人工冻土三轴蠕变试验	37
附录 H（资料性附录） 人工冻土抗折强度试验	39

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本标准由XX提出。

本标准由XXX归口。

本标准起草单位：

本标准主要起草人：

城市轨道交通联络通道冻结法施工技术规程

1 范围

本标准规定了山东省城市轨道交通隧道联络通道冻结法的工程勘察和试验、地层冻结设计、冻结施工、开挖与结构施工、冻结法施工的监测与检测、应急预案。

本标准适用于山东省内城市轨道交通建设中区间隧道联络通道的冻结法施工。盾构进出洞加固工程、基坑工程采用冻结法施工时可参照本标准。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 50007 建筑地基基础设计规范
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50026 工程测量规范
- GB 50231 机械设备安装工程施工及验收通用规范
- GB 50235 工业金属管道工程施工规范
- GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范
- GB 50274 制冷设备、空气分离设备安装工程施工及验收规范
- GB 50911 城市轨道交通工程监测技术规范
- GBJ 50171 电气装置安装工程 盘、柜及二次回路接线施工及验收规范
- CJJ/T 8 城市测量规范
- MT/T 593 人工冻土物理力学性能试验

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

联络通道 contact passage

地铁区间隧道之间设置的横向逃生通道。通道及泵站因其紧急疏散和汇集、排放区间积水的双重功能而被相辅应用。本规程中的联络通道是通道和泵站的统称。

3.2

冻结法 ground freezing method

DB ××/T ××××—××××

在施工地下构筑物之前，用人工冻结的方法，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，然后在冻结壁的保护下进行构筑物掘砌作业的一种施工方法。

注：在不稳定含水地层中修建地下工程时，借助人工制冷手段暂时加固地层和隔断地下水的一种特殊施工方法。

3.3

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。又称冻土帷幕或冻土墙。冻结壁由两两相交的冻土圆柱组成，相邻冻土圆柱的交界面称冻结壁界面。

3.4

冻结壁形成期 period of frozen soil wall formation

从地层冻结开始至冻结壁形成达到设计要求所需的时间。也称积极冻结期。

3.5

冻结孔 freeze hole

按设计要求布置在联络通道周围用于安装冻结器的钻孔，有垂直孔、水平孔、倾斜孔之分。冻结孔一般沿围绕构筑物的环线布置，该环线称冻结孔布置圈。

3.6

冻结孔间距 a space between two adjacent freeze holes

相邻两冻结孔之间的距离。冻结孔不同深度处的冻结孔间距一般也是不同的。相邻冻结孔孔口之间的距离称冻结孔开孔间距。实际施工完成的冻结孔间距称冻结孔成孔间距。

3.7

冻结器 freezing apparatus

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。冻结器由冻结管和置于冻结管内的供液管等组成。

3.8

泄压孔 ppressure release hole

用来观测和释放土层水土压力的孔（管）。

3.9

测温孔 temperature measurement hole

布置在冻结壁及冻结降温区内、用于安装温度传感器监测不同时期地层温度分布状况的钻孔。测温数据用来计算冻结壁扩展速度、冻结壁厚度和冻结壁平均温度等冻结壁形成特性参数。

3.10

测斜 deviational measurement

DB ××/T ××××—××××

检查冻结孔、测温孔、泄压孔在不同深度上的偏斜值和偏斜方位的工作。

3.11

冷冻站 refrigeration plant

在拟建旁通道附近集中安设制冷设备和设施的场所。冷冻站主要由制冷剂（氟利昂等）循环系统、冷媒（盐水等）循环系统、冷却水循环系统及供电系统构成。

3.12

强制解冻 artificial thawing

冻结法施工完成后，利用人工加热的方法将原冻结壁解冻，缩短解冻周期的方法。

3.13

原状土 undisturbed soil

土样取出后其颗粒、含水率、密度、胶结性和结构等物理性能保持不变的土样。

3.14

重塑土 remolded soil

土样取出经重新制备后其胶结性、含水率、密度和结构等物理性能有所改变的土样。

3.15

试样 specimen

按规定制备，用于人工冻土物理力学性能试验的土样。

3.16

冻结原状土试样 frozen undisturbed soil specimen below

从冻结土结构物中取得冻结原状土，进行加工而成的冻土试样。

3.17

冻结重塑土试样 frozen remolded soil specimen below

由原状土经烘干、破碎、配土、加工成型，再负温冻结而成的冻土试样。

3.18

软岩 soft rock

软岩为松散软弱的岩体总称。

3.19

冻胀率 frost heave ratio

试样在无侧向变形无纵向荷载条件下，经单向冻结，其纵向的高度增量与试样原高度比值。

3.20

冻胀力 frost heave pressure

试样在无侧向变形无纵向荷载，且上下端面限制（无变形）的条件下，经单向冻结后所产生的单位面积轴向推力。

3.21

开敞系统冻胀试验 frost heave test of open system

在试样的一端供给恒温水源，另一端保持在恒定负温下所进行的冻胀试验。

3.22

封闭系统冻胀试验 frost heave test of close system

试样的一端无外部水源供给，并保持恒定环境温度，而另一端保持在恒定负温下所进行的冻胀试验。

3.23

冻土静水压力下固结 consolidation under hydrostatic pressure for frozen soil

在某一恒定静水压力作用下冻土试样随时间延长而体积缩小的试验过程。

3.24

抗压强度灵敏度 sensitivity of compression strength

冻结原状土抗压强度与冻结重塑土抗压强度之比值，用St表示。

3.25

三轴剪切试验 tri-axial shear test

在不同的恒定围压（即小主应力 $\sigma_2 = \sigma_3$ ）下施加轴向压应力（主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ ）进行剪切直至破坏过程。

3.26

人工冻土单轴蠕变 artificial frozen soil uniaxial creep

人工冻土在无侧向应力时轴向压应力不变的条件下，其变形随时间的延长而改变的性质。

3.27

蠕变加载系数 creep loading coefficient

蠕变试验中试样所受应力与瞬时单轴抗压强度的比值，用Ki表示。

3.28

人工冻土三轴蠕变 artificial frozen soil tri-axial Creep

人工冻土在三向压缩应力不变，且轴向应力大于围压应力条件下，其变形随时间延长而改变的性质。

3.29

人工冻土抵抗折断的能力。

4 工程勘察和试验

4.1 勘察钻孔

4.1.1 采用冻结法施工的联络通道应在详勘基础上开展专项勘察，专项勘察应包括勘察孔全深范围内的土层分布图、土层名称、层顶标高、层厚、取样点位置、土体性状、包含物及物理特征等。

4.1.2 联络通道的详勘钻孔在平面距离联络通道中心线 10 m~25 m 范围内，且两侧各不少于 1 个；钻孔深度应大于联络通道结构底板埋深的 5.0 m 以上。

4.1.3 勘察钻孔资料应说明含水层及地下水活动特征，包括含水层埋深、厚度、渗透系数、地下水水位及其变化幅度，以及含水层与地表水体的水力联系等。应对承压含水层与联络通道结构的相对位置及其对设计与施工的影响进行详细分析。

4.2 水文地质

4.2.1 应对联络通道附近的水源井、降水井进行调查，收集水源井、降水井的用途、数量、方位、距离、水质、深度，抽水层位及深度，抽水时间，日抽水量以及抽水影响半径等资料。

4.2.2 联络通道附近 200 m 范围内的透水砂层中冻结壁在形成期间不应采取降水措施。如需降水施工，应实测含水层的层位、地下水流速、流向，并在冻结设计及施工时考虑降水产生的不利影响。

4.2.3 对于处于泉水补给区、存在地下暗河的联络通道施工前宜对场区进行地下水流速监测，当含水层水的流动速度超过 5 m/d 时，应采取相应的冻结方案，保证地层正常冻结。

4.2.4 沿海地区冻结法施工应对地下水进行含盐量测试，并测定其冰点。

4.3 周边环境

地表环境及地下管线资料。施工前应核查场地条件、联络通道施工影响范围内的地表、建（构）筑物、设备、管线等情况及相应的保护要求等。

4.4 冻土试验

4.4.1 在联络通道冻结设计前，应通过人工冻土物理力学性能试验获取冻土试验资料。

4.4.2 冻土试验资料包括土层的热物理参数和冻土的物理力学参数，具体参数包括：

——热物理参数包括原始地温、结冰温度、导热系数、比热、冻胀率和融沉率等；

——冻土的物理力学参数，包括弹性模量、泊松比、抗压强度、剪切强度、抗折强度、蠕变参数等。

相关试验方法应符合本规范附录 A~H 的规定。

5 地层冻结设计

5.1 一般规定

5.1.1 联络通道冻结设计应在冻结施工期间以保证土方开挖和结构施工的安全，并使周边环境和建（构）筑物不受损害为原则。

5.1.2 冻结壁宜作为开挖后临时承载结构，并应设置初期支护形成复合承载体系。

5.1.3 联络通道冻结设计应包含以下内容：

DB ××/T ××××—××××

- 冻结壁设计；
- 冻结孔布置设计；
- 制冷系统设计；
- 对冻结壁的监测与保护；
- 初期支护结构设计；
- 应急防护门结构设计及隧道支撑设计；
- 对周围环境和构筑物可能产生的影响分析；
- 融沉注浆工艺；
- 工程风险等级评估。

5.1.4 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：

- 地下水流速大于 5 m/d，有集中水流或地下水水位有明显（ ≥ 2 m/d）波动；
- 土层结冰温度低于 -2 °C或有地下热源可能影响土体冻结；
- 土层含水量低可能影响土体冻结强度；
- 用其他施工方法扰动过的地层；
- 存在沼气、地下古河道、泉脉等地质条件的地层；
- 有其他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。

5.1.5 当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。

5.1.6 在冻结壁形成期间，冻结壁内或冻结壁外 200 m 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。

5.2 冻结设计基础资料

冻结设计的基础资料包括：

- 联络通道处地层详勘资料，包括地层岩性及物理力学性质、水文地质、冻土物理力学性质参数等；
- 联络通道结构施工图；
- 联络通道位置盾构推进里程、高程、左右线隧道轴线夹角及有关隧道测量数据；
- 拟建联络通道附近隧道施工的有关情况、隧道内及端头井附近的交通及场地条件、地区气象资料等其它与联络通道冻结法设计、施工有关的资料。

5.3 冻结壁设计

5.3.1 冻结壁结构形式

冻结壁按其功能与要求分为三类，见表1。应根据冻结壁功能要求分类选择不同形式和安全性能的冻结壁结构。

表1 冻结壁功能分类表

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	既要求承载又要求止水	如含水砂土层的加固与止水

5.3.2 冻结壁结构设计原则

原则包括：

- 冻结壁设计使用时间包括形成期和维护期；
- 冻结壁应按封闭形式设计；通道部分可采用直墙圆拱冻结壁，集水井可采用“V”字形冻结壁冻结加固；冻结壁的几何形状宜与拟建地下结构的轮廓接近，并易于布置冻结孔；
- 冻结壁结构形式的选择应有利于控制土层冻胀与融沉对周围环境的影响；
- 开挖后冻结壁应设初期支护或内支撑，冻结壁承载力设计应按承受全部外荷载计算。

5.3.3 冻结设计参数

5.3.3.1 冻结壁的外荷载计算应符合下列规定：

- 冻结壁的荷载应包括土压力、水压力、土方开挖影响范围以内地表建（构）筑物荷载、地表超载及其它临时荷载；
- 土压力和水压力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；对于地下水位以下的粘性土、粘质粉土宜按水土合算的原则计算；
- 垂直土压力按计算点以上覆土重量及地面建筑物荷载，地面超载计算；侧向土压力按朗肯主动土压力计算，也可采用经验公式（1）计算；基底土反力按静力平衡计算。

$$P_s = KP_t \dots \dots \dots (1)$$

式中：

- P_s ——为侧向土压力；
- P_t ——为计算点的垂直土压力；
- K ——为侧压力系数。

5.3.3.2 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、冻结时间综合确定。联络通道冻结壁平均温度可按表2选取。冻结壁与隧道管片交界面平均温度不应高于-5℃。冻结壁平均温度也可采用成冰公式法（公式2）、面积法或数值分析法进行计算。

$$T_p = T_c \left(1.135 - 0.352\sqrt{l} - \frac{0.875}{\sqrt[3]{E}} + 0.266\sqrt{\frac{l}{E}} \right) - 0.466 \dots \dots \dots (2)$$

式中：

- T_p ——为冻结壁的平均温度；
- T_c ——为冻结管外壁温度；
- L ——冻结管间距，m。

表2 冻结壁平均温度设计参考值

项目	参考值		
开挖深度 H _j , m	≤12	12~30	≥30
冻结壁平均温度 T _p , °C	-8~-6	-10~-8	≤-10

5.3.3.3 在进行冻结设计时，应了解冻土的物理力学参数。对于重大工程、工程所处土层无相似冻土试验数据可参考的情况下应按照本标准的要求做冻土物理力学性能试验。

5.3.3.4 盐水温度与盐水流量的确定应符合下列要求：

- 盐水温度与盐水流量应在规定的时间内使冻结壁厚度和平均温度达到设计值；
- 最低盐水温度应根据设计的冻结壁厚度、平均温度、地层环境及气候条件确定，宜按表 3 选取。设计冻结壁平均温度低、地温高时宜取较低的盐水温度；
- 积极冻结 7 d 后盐水温度宜降至-18℃以下，积极冻结 15 d 后盐水温度应降至-24℃以下，开挖构筑时盐水温度应降至设计最低盐水温度以下。施工初期支护后冻结盐水温度不宜高于-25℃；开挖时，去、回路盐水温差宜高于 2℃；
- 冻结孔单孔盐水流量应根据冻结管散热要求、去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。并联的冻结孔单孔盐水流量之和不得小于盐水循环总流量。冻结孔单孔盐水流量可按表 4 选取，冻结管直径大时宜取较大的盐水流量。

表3 低盐水温度设计参考值

项目	参考值		
冻结壁平均温度 T_p °C	≤ -10	-10~-8	-8~-6
最低盐水温度 T_y °C	-32~-30	-30~-28	-28~-26

表4 单孔盐水流量设计参考值

冻结孔串联长度 L_k , m	≤ 40	40~80	≥ 80
单孔盐水流量 Q_{yk} , m ³ /h	3.0~5.0	5.0~8.0	≥ 8.0

5.3.4 冻结壁厚度设计

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

5.3.4.2 冻结壁的计算方法应符合下列要求：

- 冻结壁内力宜采用结构力学或数值计算方法计算；
- 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。

5.3.4.3 开挖后应及时进行初期支护，冻结壁的暴露时间不宜大于 24 h。

5.3.4.4 按下列公式进行冻结壁的强度验算，可只进行抗压、抗折和抗剪强度检验。

$$K\sigma \leq R \dots\dots\dots (3)$$

式中：

σ ——冻结壁应力；

R ——冻土的强度指标；

K ——安全系数，III类冻结壁强度检验安全系数宜按表 5 选取，II类冻结壁强度检验安全系数宜取 III类冻结壁的 0.9 倍。

表5 III类冻结壁强度检验安全系数

项目	抗压	抗折	抗剪
安全系数	2.0	3.0	2.0

5.3.4.5 进行冻结壁设计时应验算冻结壁的变形，计算冻结壁最大变形应不超过 30 mm。

DB ××/T ××××—××××

5.3.4.6 联络通道喇叭口处的冻结壁设计厚度不应小于 1 m，其它部位的冻结壁设计厚度不应小于 1.4 m。

5.3.5 冻结壁形成预计

5.3.5.1 冻结壁有效厚度可按下式计算：

$$E_{yj} = 2v_{dp}t - E_{qr} \dots\dots\dots(4)$$

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)。

5.3.5.2 冻结壁单侧平均扩展速度可按表 6 选取或采用测温数据计算。

表6 单排孔冻结壁（或冻土圆柱）单侧扩展速度设计参考值

项目	参考值				
	0~20	21~30	31~40	41~50	51~60
冻结时间 t (d)					
冻结壁单侧平均扩展速度 v_{dp} (mm/d)	34	28	24	22	20

5.3.5.3 冻结壁交圈时间可按下式估算：

$$t_{jq} = \frac{S_{max}}{2v_{dp}} \dots\dots\dots(5)$$

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 (m)；
- v_{dp} ——冻结壁单侧平均扩展速度 (m/d)。

5.3.5.4 在冻结壁形成期，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。

5.3.5.5 冻结壁交圈后的温度分布可简化为定常温度场计算。冻结壁扩展过程和平均温度可采用通用经验公式、图解法或数值方法计算。

5.4 冻结孔布置设计

5.4.1 冻结孔布置原则

5.4.1.1 冻结孔的布置应符合平均温度的设计要求，形成有效的冻结壁厚度。

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

5.4.1.3 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。

5.4.1.4 冻结孔布置设计时应布置不少于 2 个的透孔，用于验证隧道管片预留门洞位置和对侧冻结管与冷冻排管供冷。

5.4.2 冻结孔偏斜

5.4.2.1 冻结孔最大允许偏斜值即冻结孔成孔轨迹与设计轨迹之间的距离。冻结孔偏斜精度应符合表7规定。

表7 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
冻结孔最大偏斜值 (mm)	150	150~350	350~600	150~250	250~400

5.4.2.2 冻结孔最大允许终孔间距指设计冻土范围内冻结孔终孔位置和相邻冻结孔的垂直距离。集水井位置开挖时冻结时间比隧道正常段长 10 d~15 d, 冻结孔深度小于 10 m 时允许终孔间距为 1400 mm。单排冻结孔成孔控制间距应符合表 8 规定。

表8 单排冻结孔成孔控制间距设计值

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
最大允许终孔间距 (mm)	1100~1300	1300~1600	1600~2000	1200~1400	1400~1800

5.4.3 冻结管

5.4.3.1 冻结管应选用导热和低温性能好的材质, 宜采用低碳钢无缝钢管。

5.4.3.2 冻结管外径可选用 $\Phi 89$ mm~127 mm, 不宜小于 $\Phi 73$ mm, 管壁厚度不宜小于 5 mm。

5.5 制冷系统设计

5.5.1 制冷能力计算宜按照以下规定计算:

——冻结管吸热能力按公式 6 计算:

$$Q_g = qA \dots\dots\dots(6)$$

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 1047kJ/m²h~1172kJ/m²h;

A ——冻结管总表面积 (m²)。

——冷冻站所需制冷能力按公式 7 计算:

$$Q_z = mQ_g \dots\dots\dots(7)$$

式中:

Q_z ——需要制冷能力 (kJ/h);

M ——冷量损失系数, 当冷冻站制冷能力强、盐水管路短、保温质量好、在冬季进行冻结时, m 取 1.10~1.15; 当冷冻站制冷能力弱、盐水管路长、保温质量差、在夏季进行冻结时, m 取 1.20~1.25。

5.5.2 冷冻机选择应符合下列规定:

——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 °C~5 °C;

——制冷剂循环系统的蒸发温度应比设计最低盐水温度低 5 °C~7 °C;

——冷冻机的型号与数量应根据计算制冷能力、制冷剂循环系统的冷凝温度、蒸发温度确定;

——选定冷冻机的总制冷能力不得小于计算制冷能力, 并应考虑备用机。

5.5.3 地层冻结盐水应符合下列规定:

DB ××/T ××××—××××

- 地层冻结用盐水（冷媒剂）宜采用氯化钙水溶液；
- 氯化钙水溶液的凝固点应低于设计盐水温度 8℃~10℃，比重不宜高于 1.27；
- 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；
- 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：

$$G = \frac{1.2g(V_1 + V_2 + V_3)}{\rho} \dots\dots\dots(8)$$

式中：

- G ——氯化钙用量（kg）；
- g ——单位盐水体积固体氯化钙含量（kg/m³）；
- ρ ——固体氯化钙纯度，无水氯化钙取96%，晶体氯化钙取70%；
- V_1 ——冻结器内盐水体积（m³）；
- V_2 ——干管及集、配集液圈内盐水体积（m³）；
- V_3 ——蒸发器和盐水箱内盐水体积（m³）。

5.5.4 盐水管路设计应符合下列规定：

- 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 m/s~0.3 m/s，在供液管中的流速宜为 0.6 m/s~1.5 m/s，在干管及配、集液管中的流速宜为 1.5 m/s~2.0 m/s；
- 盐水干管及配、集液管可选用普通低碳钢无缝钢管或焊接钢管，管壁厚度不宜小于 4.5 mm。供液管可选用钢管或聚乙烯增强塑料管，供液管接头必须有足够强度以防断裂；
- 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。

5.5.5 盐水泵设计应符合下列规定：

- 盐水循环总流量应按下式计算：

$$W = \frac{Q_Z}{\Delta T \cdot \gamma_1 \cdot c} \dots\dots\dots(9)$$

式中：

- W ——盐水循环计算总流量（m³/h）；
- Q_Z ——计算制冷能力（kJ/h）；
- γ_1 ——盐水密度（kg/m³）；
- c ——盐水比热（kJ/kg℃）；
- ΔT ——去回路盐水温差（℃）一般取 $\Delta T=1^\circ\text{C}\sim 2^\circ\text{C}$ 。

- 盐水泵扬程应按下式计算：

$$H_c = 1.15(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) + h_5 + h_6 + h_7 \dots\dots\dots(10)$$

式中：

- H_c ——盐水泵计算扬程（m）；
- h_1 ——盐水干管和集配液圈中的压力损失（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，可取3m~5m；
- h_6 ——封闭式循环系统中回路盐水管高出盐水泵的高度，宜取1.5m；
- h_7 ——蒸发器内的盐水压头损失（m）。

其中,

$$h_i = \lambda_i \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{\omega_i}{2g} \quad (i = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (11)$$

$$\lambda_i = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{R_{ei}}} \text{ (紊流)} \dots\dots\dots (12)$$

$$\lambda_i = \frac{64}{R_{ei}} \text{ (层流)} \dots\dots\dots (13)$$

$$R_{ei} = \frac{\omega_i d_i \gamma}{\mu \cdot g} \dots\dots\dots (14)$$

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/s²;
- ω ——盐水流速 (m/s) ;
- λ ——盐水流动阻力系数;
- R_e ——雷诺数;
- μ ——盐水动力粘度系数 (kg·s) ;
- γ_2 ——盐水密度 (kg/m³)。
- 盐水泵电动机功率按下式确定:

$$N = 1.25 \frac{W \cdot H_c \cdot \gamma_3}{102 \times 3600 \times \eta_1 \cdot \eta_2} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

- η_1 ——盐水泵的效率, 取0.75;
- η_2 ——电动机的效率, 取0.85;
- γ_3 ——盐水密度 (kg/m³)。
- 应按盐水循环计算总流量、盐水泵扬程和电机功率选择水泵型号和台数, 配备盐水泵在计算扬程下的总流量不得小于计算流量, 并应设足够的备用泵。

5.5.6 冷却水设计应符合下列规定:

——冷冻站冷却水总循环量按下式计算:

$$W_0 = W_1 + W_2 \dots\dots\dots (16)$$

式中:

- W_0 ——冷却水计算总循环量 (m³/h) ;
- W_1 ——冷凝器冷却水用量 (m³/h) , 数值按下式计算:

$$W_1 = \frac{Q'_z}{1000 \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

- Q'_z ——冷冻站总制冷能力, (kJ/h) ;
- ΔT ——冷凝器进出水温差, (°C) , 取 $\Delta T = 3 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

W_2 ——冷冻机冷却水用量 (m^3/h)，数值按下式计算：

$$W_2 = \frac{3.6Q_1}{1000 \cdot c \cdot \Delta T} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

Q_1 ——冷凝器负荷，(kJ)；

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

c ——水的比热容， $c=4.1868\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

注：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。

——补充水量宜按下式计算：

$$W_3 = \frac{W_0(t_2 - t_1)}{t_2 - t_0} \dots\dots\dots (19)$$

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 ($^{\circ}\text{C}$)。

——冷却宜应采用不结垢冷却水，水温宜低于 28°C ；

——应按冷却水计算总循环量选择冷却水循环泵型号和台数，水泵扬程以 $12\text{ m}\sim 40\text{ m}$ 为宜。冷却水循环泵应有足够备用。

5.5.7 低温容器及管路保温设计应符合 GB 50264 及以下规定：

- 制冷剂循环系统的中压、低压容器和管路、盐水箱、盐水干管和配集液管等低温容器和管路必须保温；
- 保温层敷设宜使其外表面温度比环境露点温度高 2°C ，保温层不产生凝结水，宜使冷量损失在允许范围内；
- 低温容器、管路的保温层均应铺设防潮层。

6 冻结施工

6.1 一般规定

6.1.1 联络通道冻结法施工前的准备工作，应符合下列规定：

- 冻结施工前，应进一步查清联络通道处的详细地质资料，了解盾构推进施工情况，同时应查清冻结施工影响范围内的地下管线、构筑物及建筑物分布，提出施工中的保护措施；
- 建设单位组织完成设计交底，并进行图纸会审；
- 由盾构施工单位提供联络通道位置的实际施工里程和标高，由专业施工单位和监理单位进行复测和复核；
- 编制施工组织设计或施工方案并通过专家评审；
- 应完成冻结施工的材料、设备的准备，主要包括冷冻机、制冷剂；罗盘和经纬仪，并在设备仪器在开工前和施工过程中应进行检验校核，确保设备精确；
- 应急预案应按程序上报并审批，应急物资按要求摆放于施工现场。

6.1.2 联络通道的开口位置及相邻两环隧道管片应采取加强措施或采用钢管片；管片上宜预留排水口，并做好保护措施。

6.1.3 冻结壁形成质量达到设计要求,且开挖准备工作验收合格后转入开挖工序。

6.1.4 土方开挖采用矿山法短段掘砌的方式,随挖随支,防止冻结壁温度升高和变形。

6.1.5 施工中应对地表及其构筑物、隧道及支护结构进行动态监测并及时反馈信息。

6.1.6 在保证质量和安全的前提下,应加快开挖与结构的施工进度,减小施工风险。

6.2 冻结孔施工

6.2.1 应根据隧道的允许空间搭设冻结孔施工平台,平台应牢固平整,并符合有关技术规程的规定。冻结孔施工平台搭设应有利于冻结孔成孔设备移位和固定。

6.2.2 冻结孔成孔方法可选用跟管钻进法、夯管法等施工方法。

6.2.3 冻结孔的开孔位置、偏斜值、成孔间距及深度应符合设计要求。

6.2.4 开孔位置误差不得大于 100mm。

6.2.5 冻结孔开孔间距误差不得大于 150 mm。

6.2.6 冻结孔孔口应避开隧道管片接缝、螺栓孔并宜避开混凝土管片主筋。

6.2.7 在隧道管片上施工冻结孔时,应采取二次开孔工艺,即先安装孔口管和阀门后再开透隧道管片,孔口管安装应符合下列要求:

——孔口管宜采用低碳钢无缝钢管,孔口管内径宜大于冻结管外径 10 mm~20 mm,管壁厚度宜为 5 mm~7 mm。孔口管管端应加工长度不小于 150 mm 的鱼鳞扣;

——在混凝土管片上安装孔口管时,应先用取芯钻机钻进深 150 mm~200 mm、直径大于孔口管管径 2 mm~4 mm 的钻孔,鱼鳞扣缠上麻丝,插入深度不宜小于 150 mm,并用不少于 3 根直径不小于 12 mm 的锚筋将孔口管与隧道管片固定牢靠。孔口管与管片之间不得渗漏。

6.2.8 冻结孔钻进要求:

——跟管钻进或夯(顶)进冻结管时,孔口密封装置与冻结管之间应用盘根充填,不得漏水漏泥。采用跟管钻进时,循环液应从孔口管上的旁通排出,并应控制排出土体体积不大于冻结孔体积,否则立即用水泥单液浆或水泥—水玻璃双液浆进行注浆补偿。注入量不应小于流出量的 1.5 倍;

——用钻进法施工冻结孔时,在黏土或淤泥等不透水地层中可采用清水钻进;在流砂或粉土层中应采用泥浆钻进,并根据地层情况调整泥浆成份、配比,防止钻孔塌孔引起地层沉降。

6.2.9 冻结孔施工结束后应采用水泥浆或水泥—水玻璃双液浆封堵冻结管与孔口管之间的缝隙。在注浆封堵结束后,应采用厚度不小于 5 mm 的钢板将冻结管与孔口管间的外端部间隙焊接密实。

6.2.10 施工冻结孔时应采用以下措施控制冻结孔成孔间距:

——冻结孔施工方位应根据实际开孔误差调整,以减小冻结孔的最大偏斜值;

——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。当两预留洞门相对位置偏差大于 100 mm 时应修正冻结孔设计方位;

——宜间隔施工冻结孔,必要时通过调整中间冻结孔的设计施工轨迹,减小冻结孔最大成孔间距,使冻结孔间距均匀;

——开孔孔位、方向和冻结孔后视点应准确布设,校验、控制冻结孔施工方向;用经纬仪和罗盘确定开孔倾角和方位角。

——施工第一个冻结孔时,应复核地质、水文情况,根据施工情况优化冻结孔施工工艺参数;

——应确保冻结管加工质量,先配管确认冻结管连接顺直后再用于施工;

——在开始钻进或下入冻结管时,应检查钻杆或冻结管的方位与倾角,确保孔口段冻结管方位满足设计要求。

6.2.11 冻结孔施工过程中应及时测斜。对于深度小于 20 m 的冻结孔可在冻结孔成孔后，采用经纬仪灯光测斜；对于深度大于 20 m 的冻结孔，在施工时应每隔 10 m~15 m 采用水平陀螺测斜仪等方法测斜。

6.2.12 可采取在冻结孔成孔间距超标的两冻结孔中间增加布置冻结孔的方法使冻结孔成孔间距满足设计要求。

6.2.13 冻结孔施工完成后应根据测斜数据绘制成孔三维图及喇叭口、正常通道、对侧隧道与联络通道交界面、集水井等断面的冻结孔偏斜孔位图。

6.3 冻结器的安装

6.3.1 冻结管安装

6.3.1.1 冻结管材质和规格应符合设计要求。

6.3.1.2 每节冻结管材宜有长度及顺序编号记录。

6.3.1.3 当采用丝扣连接时，冻结管管壁厚度不宜小于 8 mm；当采用内接箍连接时，冻结管管壁厚度不宜小于 6 mm，管壁厚度不宜大于 10 mm。

6.3.1.4 冻结管连接可采用螺纹连接或带内衬管对焊连接。

6.3.1.5 冻结管接头强度不宜小于母管强度的 60%；当需要拔管或预计冻结壁变形大，有可能引起冻结管断裂时，冻结管接头强度应不小于母管强度的 80%，并宜采用加内衬管的对焊连接接头。跟管钻进时冻结管连接宜采用螺纹接头并用焊接补强密封接头缝，夯管时冻结管宜采用带内衬管对焊连接。

6.3.1.6 冻结管材与接头内衬管的材质应一致，管端宜留坡口，选用焊条应与管材材质相匹配，焊缝应饱满且与管壁齐平。冻结管焊接后，应将焊缝冷却 5 min~10 min，再将冻结管下入地层。

6.3.1.7 冻结管管材及连接应顺直，不得有明显弯曲。

6.3.1.8 冻结管下入地层深度不得小于设计深度，不宜大于设计深度 0.5 m。冻结管管口露出孔口管不宜小于 100 mm。

6.3.1.9 冻结管内不得留有任何杂物。

6.3.1.10 冻结管下入地层后必须进行试压。试验压力应为冻结工作面盐水压力的 1.5 倍~2 倍，且不宜低于 0.70 MPa。经试压 30min 压力下降不超过 0.05 MPa，再延续 15 min 压力保持不变为合格。

6.3.1.11 渗漏的冻结管处理应符合下列规定：

——试压不合格的冻结管必须进行处理达到密封要求后方可使用。无法处理时应补孔；

——冻结管出现渗漏时，可在漏管中下入小直径冻结管的方法进行处理，并在小直径冻结管外侧充满清水或泥浆。小直径冻结管应采用低碳钢无缝钢管，内径不得小于 57 mm，管壁厚度宜为 3 mm~4 mm，宜采用直接对焊连接。下套管的冻结孔数不得多于冻结孔总数的 5%。小直径冻结管下放深度和耐压要求应与普通冻结管相同。

6.3.2 供液管安装

6.3.2.1 供液管可采用聚乙烯增强塑料管或钢管。供液管的管径应以供液管内截面积和供液管与冻结管之间环向间隙截面积相近为原则选用，供液管内和供液管与冻结管间隙的盐水流动速度宜满足第 5.2.3.4 条的要求。

6.3.2.2 供液管下入冻结管时连接应牢固、严密，并应下放至距离冻结管管底 100 mm 位置。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。

6.3.2.3 冻结管端盖和去、回路羊角的连接应牢固、严密，不得渗漏。

DB ××/T ××××—××××

6.3.2.4 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宜适中并基本一致，以保证各冻结器盐水流量均匀并满足设计要求。冻结器与配、集液圈之间宜用软管连接，软管在工况温度下耐压不应低于 1 MPa。管路连接应便于安装流量计监测单孔盐水流量，每组冻结器的进出口应安装阀门和温度测点，以便控制单孔流量。

6.3.2.5 冻结器安装完成后，先用清水对系统进行试压检漏，试压值不小于正常盐水系统压力的 1.2 倍。若发现渗漏要重新补焊。

6.4 冷冻站安装

6.4.1 冷冻站可设置在地铁车站地面广场、车站地下站厅层或冻结工作面附近的隧道内，如冷冻站布设在冻结工作面，宜采用高压供电。

6.4.2 冷冻站厂房防火应符合 GB 50016 的规定。

6.4.3 冷冻站应通风良好。采用冷却塔给冷却水降温时，冷却站应加强通风排热，冷却站通风条件不能满足设备降温需求时可安装轴流风机强制通风。

6.4.4 冷冻站设在地面时，制冷系统的高压部分应避免阳光直晒。

6.4.5 冷冻站制冷设备、盐水泵、冷却水泵及管路系统的安装，应符合 GB 50274、GB 50231 及 GB 50235 中的有关规定。配电系统安装及调试应符合 GBJ 50171 规定。

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

6.4.7 冷却水源水质不符合冷凝器等设备的使用要求时，应安设冷却水水质处理装置，提高冷却效率。

6.4.8 冻结站盐水系统的管路应采用低碳无缝钢管，管件、法兰盘等应采用耐低温的碳素钢制作。

6.4.9 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。干管上及位于配液管首尾冻结器的供、回液管上，应设置流量计。

6.4.10 管路上的测温孔插座位置、尺寸及角度应符合有关规定和设计要求。

6.4.11 冷冻站制冷剂循环系统、盐水干管、配集液管应进行密封性试验，且符合下列规定：

- 盐水管路系统必须进行压力试验，试验压力不得小于冻结工作面盐水压力的 1.5 倍，并应持续 1 h 压力不下降；
- 冷冻机充制冷剂前，制冷系统各部位必须进行试漏检验，并应符合表 9 的规定或设备其他相关规定的要求。

表9 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

6.4.12 冷冻站管路密封性试验合格后，对制冷系统的低压、中压容器、管路及盐水箱、盐水干管、配集液管等必须按设计要求铺设保温层和防潮层，并宜对制冷系统按统一规定的颜色刷漆。

6.5 冷冻站运转

6.5.1 冷冻站正式运转前应对冷却水、冷媒剂及制冷剂系统进行试运转，各系统应符合下列要求：

- 补充水量、水温及水质应达到设计要求，冷却水循环水系统运转正常；
- 盐水比重及总流量应达到设计要求，盐水循环系统正常运转，空气放净，无杂物堵塞；
- 冷却水、盐水系统试运转后可充制冷剂。在充制冷剂时系统压力应控制在 0.2 MPa~0.3 MPa，宜用专用仪器检漏，合格后才能正式充制冷剂。制冷剂充量应达到设计要求。

6.5.2 冷冻站正式运转前应满足下列要求：

- 在充制冷剂过程中，制冷剂、盐水、冷却水系统应运转正常，盐水温度逐渐下降；
- 配电系统应能连续正常供电；同时应做好应急供电准备；
- 冷冻站内消防器材、防雷装置、电器接地等安全设施应齐全；
- 冷冻机易损件、仪表、制冷剂和冷冻机油均应配备足够。

6.5.3 冷冻站正常运转应符合下列规定：

- 制冷剂、盐水、冷却水循环系统温度、流量、压力应正常，经过 3 d~7 d 盐水温度应逐渐下降并达到设计要求，各冻结器回液温度宜正常、基本一致，头部、胶管结霜宜均匀；
- 制冷剂冷凝压力和蒸发压力应与冷却水温度、盐水温度相对应；
- 冷媒温度应比制冷剂蒸发温度高 5 °C~7 °C，冷凝温度应高于冷却水温度 3 °C~5 °C；
- 冷却水进出水温差宜为 3 °C~5 °C；
- 开挖期间联络通道盐水去回路温差不应大于 2 °C。

6.5.4 冻结施工时隧道管片保温应满足下列要求：

- 在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 2 m。
- 隧道管片保温应采用导热系数和吸水率小、阻燃性好的保温材料。导热系数不应大于 0.04 W/m·h，吸水率不应大于 2 %。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。保温层厚度不应小于 30 mm，可取 30 mm~50 mm。
- 在冻结辅面的隧道管片表面敷设冷冻排管用于冻结壁补强和保温。冷冻排管的敷设范围不应小于冻结壁设计厚度。冷冻排管的冷量一般由冻结站低温盐水供应，冷冻排管的内径不应小于 30 mm，管间距不应大于 500 mm。冷冻排管与管片间的空隙应用水泥或黏土填实。

6.5.5 在开挖期间不得擅自停止或减少冻结孔供冷。若在积极冻结期间发生短暂停冻，应按停冻时间的 2 倍相应延长积极冻结时间；若确因施工需要停止个别冻结孔供冷时，应分析对冻结壁整体稳定性的影响，并制定相应技术措施，确保开挖和结构施工安全。

6.5.6 初期支护结构完成后或冻结壁各项参数达到设计值又由于各种原因暂时无法开挖时，应进入维护冻结。维护冻结的盐水温度不高于 -25 °C，单个冻结孔盐水流量不小于 5 m³/h。

6.5.7 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。

7 开挖与结构施工

7.1 隧道支撑和防护门

7.1.1 在联络通道开挖前，应按隧道结构设计要求安装隧道支撑。在联络通道结构设计无明确规定时，隧道支撑的设计和安装应符合下列要求：

- 隧道内每个联络通道预留口应设不少于 4 榀隧道支撑，应分别安装在洞口两侧的隧道管片中心处。隧道支撑安装偏离隧道管片中心处截面不宜大于 20 mm；
- 每榀隧道支撑应设不少于 7 个支撑点均匀地支撑隧道管片上，支撑点与管片之间宜设置不小于 16 mm 厚的钢垫板。每个支撑点应能提供最大到 500 kN 的支撑力，可以根据实际调整；
- 支撑上半部的 4 个~5 个支撑点上应安装最大顶力 500 kN 的千斤顶以调整支撑力；
- 隧道支撑框架宜用型钢制作，应满足 GB 50017 的要求。隧道支撑之间应有效连接，确保其稳定性；
- 隧道支撑安装完毕后，应顶实千斤顶，每个千斤顶的顶力不得大于 100 kN，且各个千斤顶的顶力应均匀；

——各千斤顶的顶力应根据实测隧道收敛变形进行调整，收敛大的部位要求千斤顶力大，不收敛的部位千斤顶不加力。千斤顶顶力达到设计最大值后隧道仍继续变形时，应采取其它加固措施。

7.1.2 开挖前应在开挖侧通道预留洞口上安装应急防护门，且设计、安装与使用应符合下列要求：

- 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，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；
- 防护门的承载能力应按安装位置处的水土压力设计；
- 防护门宜安装在通道预留洞口隧道钢管片上；若安装在混凝土管片上，应采取措施固定牢靠且密封完好；防护门结构设计和安装应符合 GB 50017 的规定；
- 防护门耐压设计值应根据隧道埋深及水土压力确定。在防护门上应安设压风管、排风管、注浆管及控制阀门，并配备风量不小于 6 m³/min 的空压机为防护门内供气，安装好防护门后应进行气密性试验，要求在不停空压机时试验气压能保持在设计值；或可采用在防护门上应安设排气管、注浆管及控制阀门，并配备注浆泵为防护门内供水；防护门安装后应进行水密性试验，在不停泵时试验水压应能保持在设计试压值；
- 防护门开关应便于人工操作，并配备紧固螺栓、扳手等配件及操作工具；
- 联络通道开挖时发生透水、冒砂事故时，应立即关闭防护门，并向防护门内压水，使防护门内水压维持在设计压力；
- 通道挖通并施工初期支护后可拆除防护门，透水沙层联络通道应在主体结构全部完成后拆除防护门。

7.1.3 在集水井位置有透水的砂性土层时，应设集水井井口防护门或盖板。开挖集水井时如发生透水冒砂事故，立即关上防护门，并向集水井内压气或注入聚氨酯等注浆充填材料。防护门应能承受所在深度的地下水压。

7.2 开挖

7.2.1 开挖前应进行试挖，试挖判定具备开挖条件后再进行正式开挖。

7.2.2 试挖应具备下列资料：

- 地层检查孔报告及地层剖面图；
- 应形成冻结壁检测分析报告，内容包括：
 - 冻结孔和测温孔的施工资料；
 - 冷冻站运行情况；
 - 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；
 - 实测冻结壁厚度；
 - 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的冻结壁剖面图等施工记录、图表与分析结论。
- 联络通道结构施工图；
- 经审批的施工组织设计、安全技术措施及应急预案。

7.2.3 试挖应具备下列条件：

- 冻结壁形成质量检验合格；
- 积极冻结时间、盐水温度、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；

DB ××/T ××××—××××

- 第 7.2.2 条所列的全部资料齐全；
- 隧道支撑和防护门按设计要求安装完成且通过验收；
- 编制试挖报告并经上级主管部门和监理等批复确认。

7.2.4 试挖前应完成以下施工准备工作：

- 隧道支撑和防护门按设计要求安装完成；
- 搭设开挖和构筑施工平台；
- 施工材料与施工机具准备就绪；
- 水、电供应能满足施工需要；
- 按应急预案准备好应急材料与设备；
- 周边环境监测监护实施到位；
- 地面设开挖工作面的视频监测系统，并具备与冻结和开挖工作面的可靠通讯联络系统。

7.2.5 试挖时应在联络通道入口未冻区内管片上开设直径 80 mm~120 mm 的探孔，探孔挖深 400 mm~600 mm，检查孔内无泥、水连续流出。则可判定具备正式开挖条件。

7.2.6 联络通道开挖应采取短段掘砌的作业方法，随挖随支，严格控制冻结壁温度升高和变形。

7.2.7 开挖横断面方向尺寸应满足设计要求，通道开挖中心线偏差应不大于 20 mm。且单侧超挖不得大于 30 mm。

7.2.8 开挖循环进尺宜取 500 mm~800 mm，并应与初期支护的钢格栅间距一致。可采取全断面开挖方式，开挖面土体难以自立时可以放坡，最大空顶距不大于 1000 mm。

7.2.9 冻结壁暴露时间应控制在 24 h 内，冻结壁暴露面最大收敛位移不得大于 20 mm。

7.2.10 单侧泵房上部结构开挖时，应在端墙部位设置临时壁座。

7.2.11 夏季开挖过程中，宜对喇叭口处的初期支护内侧采用 50 mm 厚泡沫塑料板进行保温。

7.2.12 正式开挖应采用以下施工顺序：

- a) 在施工完通道衬砌后再施工集水井；
- b) 通道施工可按下列步骤进行：
 - 1) 开挖侧开门洞；
 - 2) 通道开挖和初期支护；
 - 3) 喇叭口开挖（刷大）和初期支护；
 - 4) 隧道钢管片拆除；
 - 5) 外防水施工；
 - 6) 钢筋绑扎、预埋件安设和立模；
 - 7) 混凝土浇注。
- c) 集水井施工可按下列步骤进行：
 - 1) 开挖和初期支护；
 - 2) 外防水施工；
 - 3) 钢筋绑扎、预埋件安设和立模；
 - 4) 混凝土浇注。
- d) 施工完集水井衬砌后施工井盖和防火门门框，根据联络通道结构设计要求施工内防水或抹面；
- e) 应在施工完初期支护后、施工外防水或衬砌之前再割除开挖区内的冻结管。

7.3 初期支护

7.3.1 初期支护应能承受 25 %~50 %的冻结壁外荷载。在以下情况之一时初期支护宜按承受 50 %冻结壁外荷载设计：

DB ××/T ××××—××××

- 通道长度大于 15 m 或通道开挖时间需要 15 d 以上；
- 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。

7.3.2 初期支护可采用由钢筋格栅、钢筋网和喷射混凝土层组成的复合结构形式，也可采用由喷射混凝土、型钢支架、木背板和砂浆充填层组成的结构形式

7.3.3 钢筋格栅及钢筋网加工应满足以下要求：

- 钢筋格栅及钢筋网采用的钢筋种类、型号、规格等应满足是设计要求，其施焊应满足设计及钢筋焊接规范要求；
- 拱架应圆顺，直墙架应直顺，允许偏差为：拱架矢高及弧长 0 mm~+20 mm，强架长度±20 mm，拱、墙架横断面尺寸（高、宽）0 mm~+10 mm；
- 钢筋格栅组装后应在同一平面内，允许偏差为：高度±30 mm，宽度±20 mm，扭曲度 20 mm；
- 钢筋网加工允许偏差为：钢筋间距±10 mm；钢筋搭接长度±15 mm。

7.3.4 钢筋格栅安装应符合下列规定：

- 钢筋格栅应垂直通道中线，允许偏差为：横向±30mm，纵向±50mm，高程±30mm，垂直度 5%；
- 钢筋格栅与壁面应楔紧，每片钢筋格栅节点及相邻格栅纵向必须分别连接牢固。

7.3.5 初期支护钢支架可采用 18~22 号工字钢等型钢制作，钢支架内侧净尺寸按联络通道结构轮廓外放 20 mm~30 mm 计算；木背板厚度可取 30 mm~50 mm；充填层可采用粗砂或水泥砂浆，厚度以 30 mm 为宜。

7.3.6 喷射混凝土原材料应符合下列规定：

- 水泥：应选用普通硅酸盐水泥，标号不应低于 325 号；
- 细骨料：采用中砂或粗砂，细度模数应大于 2.5，含水率控制在 5 %~7 %；
- 粗骨料：采用卵石或碎石；粒径不应大于 15 mm；
- 掺合剂：对于速凝剂，使用前应做与水泥相容性试验及水泥净浆凝结效果试验，初凝时间不应超过 5 min，终凝时间不应超过 10 min；同时应掺入适量的防冻剂，确保喷射混凝土强度。

7.3.7 混合料应搅拌均匀并符合下列规定：

- 配合比：水泥与砂石重量比应取 1:4~4.5；砂率应取 45 %~55 %；水灰比应取 0.4~0.45；速凝剂掺量应通过试验确定；
- 原材料称量允许偏差为：水泥和速凝剂±2 %；砂石±3 %；
- 混合料应随拌随用，存放时间不应超过 20min。

7.3.8 喷射混凝土作业应紧跟开挖工作面，并符合下列规定：

- 混凝土喷射应分片依次自下而上进行并先喷钢筋格栅与壁面间混凝土，然后再喷两钢筋格栅之间混凝土；
- 每次喷射厚度为：边墙 70 mm~100 mm；拱顶 50 mm~60 mm；
- 分层喷射时，应在前一层混凝土终凝后进行，如终凝 1 h 后再喷射，应清洗喷层表面；
- 喷层混凝土回弹量，边墙不宜大于 15%，拱部不宜大于 25 %；

7.3.9 喷射混凝土应密实、平整、无裂缝、脱落、漏喷、漏筋、空鼓、渗漏水等现象。平整度允许偏差为 30 mm。

7.3.10 喷射混凝土 2 h 后应养护，养护时间不应少于 14 d，当气温低于+5 ℃时，不得喷水养护。

7.4 结构施工

7.4.1 联络通道结构及防水层应按照设计和有关施工规范施工。

7.4.2 集水井开挖应在浇筑完通道二次衬砌混凝土且其强度达到设计值的 60 % 以上后再进行。

7.4.3 混凝土初凝时间应根据施工工序安排和混凝土需要二次倒运等情况确定。每次浇筑混凝土时应现场用试模制成标准试块，用于检测混凝土抗压强度等级和抗渗等级。同时应考虑环境温度较低可能对混凝土强度增长的影响。

7.4.4 混凝土浇注宜采用混凝土输送泵，应采取措施确保通道拱部混凝土浇筑密实。

7.4.5 在结构混凝土与隧道管片接触部位应按设计要求施工锚筋，且纵筋与隧道管片应按设计要求锚固连接。

7.4.6 排水管应包裹在结构混凝土层里，不得与土层直接接触；排水管与隧道连接处应密封严实。

7.5 冻结孔封堵

7.5.1 应在停止冻结后 3 d~5 d 内将隧道内冻结孔封堵完成。

7.5.2 冻结孔封堵质量应遵循下列规定：

- 停冻后应对遗弃在地层中的冻结管采用强度等级不低于 M10 的水泥砂浆或 C15 以上混凝土进行充填，自冻结管口向孔内充填长度不应小于 1.5 m，充填时要排除冻结管内盐水；
- 充填后应及时割除隧道管片上的孔口管和冻结管，隧道管片上割除孔口管或冻结管深度应进入管片不小于 60 mm；
- 混凝土管片上割除孔口管或冻结管后留下的孔口应用速凝堵漏剂封堵或其它耐久性材料、密封性高的工艺封堵，并预埋注浆管进行注浆堵漏；
- 钢管片上的孔口应焊接厚度不小于 12 mm 钢板，然后按设计用混凝土填满钢管片格仓；
- 冻结管充填和封孔应有原始记录。

7.6 充填注浆和融沉注浆

7.6.1 停止冻结并完成冻结孔封堵工序后应进行衬砌后充填注浆和地层融沉补偿注浆。

7.6.2 注浆管应在联络通道初期支护施工时预埋。注浆管预埋深度应穿透初期支护层，注浆管头部应用丝堵拧紧，布孔密度宜为 (2 m²/个~4 m²/个)。可使用联络通道位置相关管片预留注浆孔进行注浆。

7.6.3 充填注浆主要填充初期支护与冻土帷幕之间的空隙。衬砌后充填注浆应在停止冻结后 1d~7d 内实施。注浆时衬砌混凝土强度应达到设计强度的 60 % 以上。

7.6.4 衬砌后充填注浆宜采用水灰比为 0.8:1~1:1 单液水泥浆。注浆前应先注清水，检查各注浆孔之间衬砌后间隙是否畅通。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该层注浆，直至拱顶充填满为止。注浆压力不得大于静水压力。

7.6.5 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补偿注浆。融沉补偿注浆应遵循少量、多次、多点、均匀的原则。

7.6.6 融沉补偿注浆浆液宜以水泥-水玻璃双液浆为主，单液水泥浆为辅。水泥-水玻璃双液浆的配比应符合下列规定：

- 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，水玻璃溶液可采用 B35~B40 水玻璃加 1 倍~2 倍体积的水稀释，波美度可根据设计浆液凝结时间进行调整；
- 注浆压力不得大于 0.5 MPa 或联络通道结构设计要求的允许值；
- 注浆范围应为整个冻结区域。

7.6.7 注浆设备宜采用双液注浆泵，注浆泵应配备压力表、流量计等量测仪表。

7.6.8 地层沉降大于 0.5 mm/d 或累计地层沉降大于 3 mm 时，应进行融沉补偿注浆；地层隆起达到 3 mm 时应暂停注浆。

7.6.9 冻结壁已全部融化，且实测地层相对周边非冻区沉降持续一个月每半月不大于 0.5 mm 时，可停止融沉补偿注浆。

7.6.10 融沉注浆结束后，应割除露出结构表面的注浆管，并在管口段填充深度不小于 100 mm 的速凝堵漏剂。

7.6.11 注浆过程中应填写各项注浆记录表与质量抽检报告，并作为注浆加固质量验收依据。

7.6.12 融沉补偿注浆时可以对冻结壁进行强制解冻。强制解冻宜分区、对成进行，并在解冻的同时进行跟踪注浆。强制解冻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。

7.6.13 强制解冻宜采用在冻结器中循环热水的方式。热水温度宜控制在 30℃~70℃ 之间，加热盐水的电加热器功率不宜小于冷冻机电机功率。

8 冻结法施工的监测与检测

8.1 一般规定

8.1.1 冻结施工的过程中应对冻结温度、变形、冻结压力等内容进行监测和检测

8.1.2 监测和检测方案应由具有相应资质的监测单位编制，并按规定程序批准后实施。

8.1.3 监测单位应对监测数据和现场巡查情况分析整理，确保数据正确、可靠，按时提交监测报表；当监测值达到报警值，应立即发出报警通知。

8.1.4 测点布置及测量方法应符合 GB 50026、GB 50911 和 CJJ/T 8 等有关规范的规定。

8.1.5 监测方案应包括工程概况、工程地质条件、周边环境状况、监测目的、监测依据、测点布置及布点图、监测方法及精度、监测频率、监测报警值、监测成果的主要内容、监测人员组成及主要仪器设备、信息反馈制度等，同时应针对项目特点提出相应防范措施。

8.1.6 现场检测和监测应在工程施工期间完成。对有特殊要求的工程，应根据工程特点，确定必要的项目，在使用期内继续进行。

8.2 温度监测

8.2.1 在联络通道施工期间应监测冻结施工影响范围内的盐水温度、冻结壁与结构接触界面的温度、冻结站运转。

8.2.2 联络通道在冻结施工影响范围内应对去、回路盐水温度进行监测，包括总管去、回路盐水温度、冻结孔串联安装的回路盐水测量。去、回路总管的盐水温度监测点可利用设在总管上预留测孔；支路回路盐水的温度监测点可设在回路调节阀门附近，对每组串联回路管的盐水温度进行监测。

8.2.3 在联络通道施工期间冻结壁与结构接触面的温度应符合下列要求：

- 冻结壁温度监测的方法应采用测温孔内安装康铜线热电偶，使用温度仪进行测量；
- 应根据温度监测结果定期分析冻结壁的形成情况。

8.2.4 冷冻站的运转监测应包括下列内容：

- 冷冻机及其辅助设备中的温度、压力、流量、液位、电流、电压等的记录，运转情况，每次制冷剂充量及冷冻润滑油加油量的记录；
- 冷冻机运转情况，包括：盐水系统压力、清水系统压力、冷冻机上各仪表的数值、盐水箱液位、盐水进水和回水温度、清水进水和回水温度等数据；
- 配集液管冷媒温度，冻结器头部冷媒温度，以及冻结器头部胶管结霜情况；
- 补充水及循环水水泵的运转情况，补充水的流量及水温，冷凝器进、出水温度及流量。

8.2.5 测温孔的布置和范围：

——测温孔布置应符合以下规定：

- 测温管宜采用钢管，且不应渗漏；
- 在与联络通道相接的隧道内均应设置测温孔监测冻结壁厚度、冻结壁平均温度、冻结壁与隧道管片界面温度和开挖区附近地层冻结情况；
- 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；
- 检测冻结壁厚度的测温孔不得少于 2 个，在冻结壁内、外设计边界上均应布置测温孔，测温孔深度应不小于 2 m。检测冻结壁平均温度的测温孔不宜少于 4 个，在冻结壁内、外设计边界和冻结壁中部均应布置测温孔。在冻结壁的上、下设计边界上均应布置 1 个以上测温孔，深度应不小于 2 m。在集水井中部应布置 1 个以上测温孔，深度应与附近的冻结孔深度一致。检测冻结壁与隧道管片界面温度的测温孔深度应进入地层不小于 0.1 m。

——测温管内测点布置应能满足冻结、开挖构筑及融沉注浆施工的要求，测定冻结壁与隧道管片界面温度时，测点距离界面不大于 50 mm；

——在解冻期间，可在联络通道内布置测温孔，监测冻结壁温度回升情况。

8.2.6 温度监测的频率：

——在开始冻结前应测量原始地温。从开始冻结至试挖，所有测点温度应每隔 12 h~24 h 观测一次以上，在开挖和结构施工期间，所有测点每隔 4 h~12 h 观测一次以上；停冻后至冻结壁全部融化期间宜每隔 1 d~3 d 测量一次，监测点根据测量情况调整。冻结壁全部化冻后可停止温度监测；

——制冷系统和盐水系统的温度通过安装的温度计直接读取或用温度仪量测每 2~3h 一次；

——各组干管去、回路温度每天监测 1~2 次；并视回路温度变化情况，随时调整监测频率；

——冻结壁帮壁温度使用高精度点温计或用精密水银温度计测量，冻结壁温度监测频率每天 1~3 次；当工作面温度过高等不利情况时，每 2h 一次；

——冻结站运转前期，应每隔 12 h~24 h 监测一次，压力开始上涨后，应每隔 6 h~12 h 监测一次。

8.3 变形监测

8.3.1 在联络通道施工期间应监测冻结施工影响范围内的隧道管片、地表、地下管线及邻近建（构）筑物的变形。

8.3.2 联络通道监测应从钻孔开始至融沉注浆后 4~5 个月为止，且满足监测数据稳定的要求。

8.3.3 联络通道的施工监测范围应符合下列规定：

——隧道管片变形监测范围不应小于联络通道两侧隧道管片各 50 m；

——地面及周围建构筑物 and 管线变形监测范围应以联络通道中心为圆心、半径不小于联络通道埋深的 1.5 倍。地面及周围建构筑物和管线变形监测范围且不小于旁通道正上方地面投影外侧 20 m。

8.3.4 联络通道施工期间监测点的布设应符合下列要求：

——地面监测点应在隧道纵向和横向上布设成监测剖面，应分别布设深层监测点。在地面布设深层监测点时应穿透路面结构硬壳层，埋设进入原状土 60 cm 以上的沉降标杆；

——隧道内垂直位移监测点应在联络通道两侧各 50 m 范围内按先密后疏的原则布设，联络通道两侧 10 环范围内每 2 环布设一个测点，10 环外每 4 环布设一个测点，监测点宜按环号进行编号；

——隧道管径收敛监测断面应布设在联络通道邻近两侧管片上，然后往两端按 2 环、4 环间距延伸各布设 2 个断面，每条线布设 6 个断面，上下行线共计布设 12 个断面，监测断面宜按环号进行编号，监测断面布置的部位应与隧道垂直位移监测点同环。

8.3.5 隧道变形及周边环境监测点应在施工开始前连续采集 3 次稳定的数据作为初始值，联络通道施工期间应按信息化监测要求实施同步监测。联络通道施工监测应尽量利用隧道施工监测测点。在施工过程中监测频率宜按表 10 确定，可根据监测数据变化幅度进行调整。

表10 监测频率

监测内容	监测频率				
	钻孔期间	冻结期间	开挖	融沉注浆	
				自然解冻	强制解冻
地下管线垂直位移监测	1 次/天	1 次/2 天	1 次/天	前 3 个月 1 次/(2~5) 天；第 4、5 个月 1 次/(5~10)	第 1 个月 1 次/1 天；第 2 个月以后 1 次/(10~15) 天
邻近建（构）筑物垂直位移监测	1 次/天	1 次/2 天	1 次/天		
地表剖面垂直位移监测	1 次/天	1 次/2 天	1 次/天		
隧道垂直位移监测	1 次/天	1 次/2 天	1 次/天		
隧道收敛监测	1 次/2 天	1 次/2 天	1 次/天		

8.3.6 隧道管片监测报警值应根据地质条件、设计参数及当地经验确定，当无具体报警值，可参照表 11 确定。

表11 隧道管片监测报警值

监测内容	监测报警值				
	日报警值(mm/d)				累计报警值(mm)
	钻孔期间	冻结期间	开挖	融沉注浆	
隧道垂直位移监测	±1	±1.5	±2	±2	±10
收敛监测	±2				±10

8.3.7 联络通道施工周边地下管线监测报警值应在调查分析管线功能、材质、工作压力、铺设年代等的基础上，结合工程经验综合确定。当无具体报警值，可参照表 12 确定。

表12 地下管线监测报警值

监测对象		项目	
		日报警值(mm/d)	累计报警值(mm)
刚性管线	压力管	±2	±10
	非压力管	±2~±3	
柔性管线		±3~±5	

8.3.8 联络通道施工地表剖面沉降及邻近建（构）筑物的监测报警值应根据主管部门的要求确定，当无具体报警值，可参照表 13 确定。

表13 地表剖面沉降及邻近建（构）筑物监测报警值

监测内容	监测报警值				
	日报警值(mm/d)				累计报警值(mm)
	钻孔期间	冻结期间	开挖	融沉注浆	
地表沉降	±3	±2	±3	±3	+10~-30
临近建（构）筑物垂直位移	±2	±2	±2	±2	10~30

8.3.9 建（构）筑物垂直位移的累计报警值应根据建（构）筑物对变形的适应能力确定；

8.3.10 建（构）筑物的变形控制指标应符合 GB 50007 中关于倾斜、局部倾斜、沉降量和沉降差控制的要求。

8.3.11 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，且不注浆的情况下实测地表沉降持续一个月每半个月不大于 0.5 mm 时，可停止监测。

8.4 压力监测和检测

8.4.1 冻结管下入地层后必须进行试压。试验压力应为冻结工作面盐水压力的 1.5 倍~2 倍，且不宜低于 0.70 MPa。经试压 30 min 压力下降不超过 0.05 MPa，再延续 15 min 压力保持不变为合格。

8.4.2 制冷系统和盐水系统的工作压力，直接通过系统上安装的压力表量测，每 2 h~3 h 一次。

泄压孔压力等的监测应符合下列要求：

——泄压孔孔口应按安装压力表和用于泄水的联络通道和控制阀门。压力表的精度应达到±0.02 MPa 以上；

——冻结站运转前期，应每隔 12 h~24 h 观测一次地层水压。水压开始上涨后，应每隔 6 h~12 h 测量一次以上。

8.5 质量检测与验收

8.5.1 联络通道冻结施工中对冻开孔位置及开孔方向、终孔偏斜值、冻结孔的耐压、冻结孔的长度监测应符合下列要求：

——施工前应根据联络通道结构施工图准确定位，冻结孔的开孔位置误差不宜大于 100 mm，应避免开管片接缝、螺栓孔、主筋和钢管片肋板；

——冻结孔最大允许偏斜 150 mm（冻结孔成孔轨迹与设计轨迹之间的距离），通道部分冻结孔终孔间距不大于 1.3 m，集水井部分冻结孔终孔间距不大于 1.4 m；

——冻结孔布孔质量验收应以冻结孔成孔间距和冻结孔与开挖面距离为准。当冻结孔布孔位置受到限制时，可加大冻结孔成孔控制间距。冻结孔深度为冻结孔安装冻结管的深度。

8.5.2 联络通道冻结施工中冻结管的材质和规格、下入地层深度、试压值应符合下列要求：

——碰到对侧隧道管片而不能循环盐水的冻结管端部长度不得大于 150 mm；

——冻结管安装完成后应进行试压，试验压力应为冻结工作面盐水压力的 1.5~2.0 倍，且不小于 0.8 MPa，经试压 30 min 压力下降不超过 0.05 MPa，再延续 15 min 压力不变为合格。

8.5.3 联络通道冻结施工中供液管的材质和规格、下入冻结管的深度应符合下列要求：

——供液管可选用钢管或聚乙烯增强塑料管，供液管接头必须有足够强度；

——供液管下入冻结管时连接应牢固、严密，并应下放至距离冻结管管底 100 mm 位置。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。

8.5.4 冻结器安装完成后，先用清水对系统进行试压检漏，试压值不小于正常盐水系统压力的 1.2 倍，若发现渗漏要重新补焊。

8.5.5 对冻结器制冷发生异常如盐水有漏失，或冻结效果难以确定的部位应打探孔检测冻结壁温度或开挖区内土体的稳定情况。可以从隧道两侧开挖区域内打通长探孔检验冻结效果。

8.5.6 联络通道开挖构筑中应对开挖循环掘进长度、支护步距、空顶距、开挖断面尺寸、通道开挖中心线偏差进行中间检验，并符合有关规定：

——开挖循环进尺宜取 500 mm~800 mm，首次掘进长度不小于 1200 mm，应与初期支护的钢格栅间距一致；

——可采取全断面开挖方式且开挖断面超挖不大于 30 mm，开挖面土体难以自立时可以放坡，最大空顶距不大于 1000 mm，开挖中心线偏差不大于 20 mm。

8.5.7 初期支护轴线偏差不大于 20 mm，型钢支架垂直度偏差不大于 20 mm，标高偏差不大于 20 mm，水平高差不大于 20 mm，型钢支架间距偏差不大于 30 mm，支架间拉杆焊接牢固。

8.5.8 喷射混凝土的原材料、配合比、搅拌、试件的制作和试验和厚度检测应符合下列要求：

——喷射混凝土的原材料、配合比、搅拌、试件的制作和试验应符合 GB 50086 的要求；

——喷射混凝土厚度的检查应符合下列规定：

- 控制喷层厚度应预埋厚度控制钉、喷射线；喷射混凝土厚度应用钻孔法检查；
- 喷射厚度检查点密度：结构性喷层每 100 m²/个，防护性喷层为 400 m²/个，隧洞拱部喷层为每 50 m²/个~80 m²/个；
- 喷层厚度合格标准：用钻孔法检查的所有点中应有 60 %的喷射厚度不小于设计厚度，最小值不应小于设计厚度的 60 %，检查孔处喷层厚度的平均值不应小于设计厚度。

8.5.9 防水层材料中止水带表面不应有开裂、缺胶、海绵状等缺陷，在 1 m 长度范围内，止水带表面深度不大于 1 mm，面积不大于 10 m²的凹痕、气泡、杂质、明疤等缺陷不应超过 3 处。

8.5.10 联络通道结构竣工后，混凝土抗压强度和抗渗压力应符合设计要求，无漏筋、漏振，其允许偏差应符合有关规定。

8.5.11 注浆过程中应填写各项注浆记录表与质量抽检报告，并作为注浆加固质量验收依据。

9 应急预案

9.1 一般规定

9.1.1 为确保区间联络通道冻结法施工安全，每项工程均应编制应急预案及相应处置措施。

9.1.2 在开工前应由施工单位编制应急预案，报施工单位技术负责人审批并交监理单位审查后实施。

9.2 管理要求

9.2.1 应急预案应按施工阶段对其相应风险源进行识别分析，并采取对策进行处置。

9.2.2 应急预案应明确应急组织机构、人员岗位职责和应急劳务队伍组成人员。

9.2.3 应急预案应根据风险分析，准备应急材料和应急设备。

9.2.4 应急预案应开展有针对性的演练。

9.2.5 冻结施工应包含但不限于为以下质量安全问题与突发事件制订防范措施：

——冻结孔施工过程中孔口管脱落、冻结管断裂、钻头逆止阀损坏等发生孔口水砂涌出；

——冻结和开挖过程中发生冻结管断裂和盐水漏失；

——发生严重机电事故或停电引起长时间停冻；

——开挖过程因冻结壁不交圈、解冻或破坏引起出水冒泥，因冻结壁严重变形引起初期支护严重变形或破坏。

——地层水土流失、冻胀、融沉和开挖引起周边隧道管片、地下管线和地面道路、设备及建（构）筑物严重变形甚至破坏。

——施工过程中发生重大人身伤亡事故。

附 录 A
(资料性附录)
人工冻土试验取样及试样制备

- A.1 土样采取时每层粘土取样应不少于 26 个，且土样的尺寸应满足试验项目的要求。
- A.2 试样应符合下列规定：
- 冻土的单轴抗压强度试验、单轴蠕变试验、三轴剪切强度试验、三轴蠕变试验，静水压力下固结试验试样的尺寸应符合下列要求： $\phi 61.8 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 和 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ，试样最小尺寸应大于土样中最大颗粒粒径的 10 倍；土壤冻胀试验试样规格： $\phi (50 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}) \times (25 \text{ mm} \sim 75 \text{ mm})$ ，高径比为 0.5；冻土抗折强度试验试样规格： $200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ；
 - 试样击实密度应均匀，重塑土含水率和粗细颗粒混合都应均匀。两次测定的重塑土密度与原状土密度的差值应不大于 0.03 g/cm^3 ，并应取两次测量值的平均值。
- A.3 土样采集及接收管理：
- 从冻结壁或冻土墙采集的冻土块，应用修土刀修成所需尺寸，并作好土性、标高、层位及数量等土样记录；
 - 试验后的土样，应保存至提交试验报告后半年，如委托单位事先提出特殊要求，可协商确定。

附 录 B
(资料性附录)
土的冻胀试验

B.1 试样应采用直径为 50 mm~150 mm 的常温圆柱体，高径比为 0.5，每层土试样数量不应少于 3 个。

B.2 冻胀率测试应符合下列规定：

——试验前应将冻胀仪器的冷板温度调节至所需试验温度，若为开敞系统，需接通恒温水源；

——测读试样高度变化值应按 1 min、2 min、5 min、10 min、20 min、30 min、1 h、2 h、3 h、6 h、12 h 读取（12 h 后每隔 2 h 测读试样高度变化值）。若为封闭系统冻胀试验，直至读数不变后 1 h 为止；若为开敞系统冻胀试验，直至 2 h 内试样高度变化值小于等于 0.02 mm，或由数据采集系统自动记录。

B.3 冻胀力测试应符合下列规定：

——应在冷板温度达到试验温度时，开始试验，若为开敞系统，需接通恒温水源；

——试样在某级荷载下间隔 2h 不再冻胀时，则试样在该级荷载下达到稳定，允许冻胀量不应大于 0.01 mm，记录施加的平衡荷载，或由数据采集系统自动记录。

B.4 冻胀率应按下列公式确定：

$$\varepsilon_{fh} = \Delta h / h_0 \times 100 \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

ε_{fh} —— t 时刻试样的冻胀率，%；

Δh —— $0 \sim t$ 时间内试样的轴向变形，单位为mm；

h_0 ——试验前试样高度，单位为mm。

B.5 冻胀力应按下列公式确定：

$$\sigma_{fh} = F / A \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

σ_{fh} —— t 时刻试样的冻胀力，单位为MPa；

F —— t 时刻试样的轴向荷载，单位为N；

A —— t 试样的截面积，单位为 mm^2 。

冻胀率试验或冻胀力试验应分别以三个试样测量值的平均值作为试验结果。当三个试样冻胀率或冻胀力中的最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的15 %时，该组试验应重做。

附录 C
(资料性附录)
人工冻土静水压力下固结试验

- C.1 试验应采用负温原状土试样和负温重塑土试样，制备方法按MT/T 593.1-2011 中 6.2.2 和 6.2.3 的规定进行，且每种围压取 2 个试样。
- C.2 固结静水压力按 0.013H 确定，其中 H 为土样所处层位深度（单位：m）。
- C.3 压力室排气管应畅通，静水压力系统无漏液现象。
- C.4 试验温度为 -15℃ ~ -1℃ 内的某一温度时，其波动度应不大于 ±0.2℃，试验温度为 -15℃ 以下的某一试验温度时，其波动度应不大于 ±0.3℃。
- C.5 固结仪压力室应密封安装，并充满不冻液，通过体变仪向三轴压力室供液增压应保持所需压力，当三轴压力室进液增量趋于零时停止加压。
- C.6 固结系数应按下列方法确定：

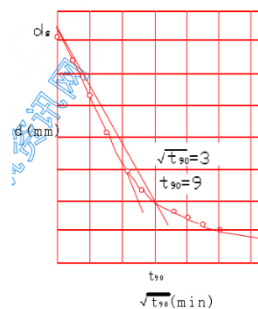
——时间平方根法：对某一级压力，以试样的变形为纵坐标，时间平方根为横坐标，绘制变形与时间平方根关系曲线(图 C.1)，延长曲线开始段的直线，交纵坐标于 d_s 为理论零点，过 d_s 作另一直线，令其横坐标为前一直线横坐标的 1.15 倍，则后一直线与 $d-\sqrt{t}$ 曲线交点所对应的时间的平方即为试样固结度达 90% 所需的时间 t_{90} ，该级压力下的固结系数应按下式计算：

$$C_v = \frac{0.848\bar{h}^2}{t_{90}} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

C_v ——固结系数 (cm²/s)

\bar{h} ——最大排水距离，等于某级压力下试样的初始和终了高度的平均值之半(cm)。



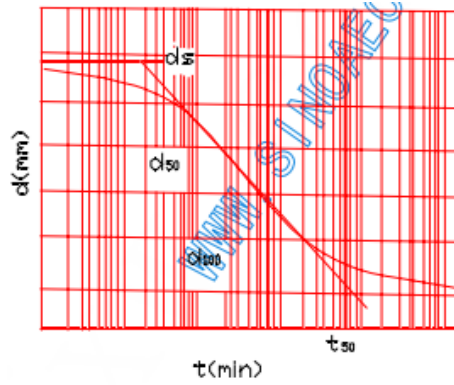
图C.1 时间平方根法求 t_{90}

注：将图中试样轴向变形 d 换算为本试验的 ΔV ，绘制 $\Delta V-\sqrt{t}$ 及对应的半对数坐标下的体变曲线。

——时间对数法：对某一级压力，以试样的变形为纵坐标，时间的对数为横坐标，绘制变形与时间对数关系曲线(图 C.2)，在关系曲线的开始段，选任一时间 t_1 ，查得相对应的变形值 d_1 ，再取时间 $t_2=t_1/4$ ，查得相对应的变形值 d_2 ，则 $2d_2-d_1$ ，即为 d_{01} ；另取一实际那依同法求得 d_{02} 、 d_{03} 、

d_{04} 等，取其平均值为理论零点 d_s ，延长曲线中部的直线段和通过曲线尾部数点切线的交点即为理论终点 d_{100} ，则 $d_{50}=(d_s+d_{100})/2$ ，对应于 d_5 的时间即为试样固结度达 50%所需的时间 t_{50} ，某一级压力下的固结系数应按下式计算：

$$C_v = \frac{0.197\bar{h}^2}{t_{50}} \dots\dots\dots (C.2)$$



图C.2 时间对数法求 t_{50}

附 录 D
(资料性附录)
人工冻土单轴抗压强度试验

- D.1 试验所选用的冻土压力仪采用单轴应变速率控制式必须具备使试样轴向应变速率为 1.0 %/min 和 0.1 %/min 的加载条件；采用负荷增加速率控制式必须具备在 0 MPa/min~60 MPa/min 范围内恒定任一加载速率值。
- D.2 试验温度应符合冻结壁的温度，通常选取 -10 ℃；也可进行多种试验温度的试验。
- D.3 试样应采用冻结原状土试样和冻结重塑土试样，制备方法按 MT/T 593.1-2011 中 6.2.2 和 6.2.3 的规定进行。每层土每个试验温度试样数量 4 个。
- D.4 选取的试样应变速率为 1.0 %/min，设定加载速率，当轴向应变在 3 % 之内时，每增加 0.3 %~0.5% (或轴向变形 0.5 mm) 测读一次轴向变形和力值；超过 3 % 时，每增加 0.6 %~1.0 % (或轴向变形 1 mm) 测读一次。
- D.5 当力值达到峰值或稳定时，再继续增加 3%~5% 的应变值，停止试验；如果力值一直增加，则试验进行到轴向应变达到或大于 20 % 为止。如果在刚性试验机上做应力-应变全过程试验，则一直进行到应力接近零为止。
- D.6 单轴负荷增加速率控制式下冻土瞬时单轴抗压强度试验应确定负荷增加速率，使试样在 30s±5s 内达到破坏或轴向变形大于 20 % 为止。
- D.7 应变应按下列公式确定：

$$\varepsilon_1 = \Delta h / h_0 \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

- ε_1 ——轴向应变；
 Δh ——轴向变形，单位为 mm；
 h_0 ——试验前试样高度，单位为 mm。

- D.8 试样横截面积校正应按下列公式确定：

$$A_a = A_0 / (1 - \varepsilon_1) \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

- A_a ——校正后试样截面积，单位为 mm²；
 A_0 ——试验前试样截面积，单位为 mm²。

- D.9 应力计算应按下列公式确定：

$$\sigma = F / A_a \dots\dots\dots (D.3)$$

式中：

- σ ——轴向应力，单位为兆帕 (MPa)；
 F ——轴向荷载，单位为牛顿 (N)。

- D.10 抗压强度灵敏度计算应按下列公式确定：

$$S_t = \sigma_b / \sigma_b^1 \dots\dots\dots (D.4)$$

式中：

DB ××/T ××××—××××

σ_b ——原状人工冻土瞬时单轴抗压强度，单位为MPa；

σ_b^1 ——重塑人工冻土瞬时单轴抗压强度，单位为MPa。

D. 11 单轴抗压强度以三个试样测量值的平均值作为试验结果，当三个试样单轴抗压强度中的最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15 %时，该组试验应重做。

附 录 E
(资料性附录)
人工冻土三轴剪切强度试验

E.1 试样应采用冻结原状土试样和冻结重塑土试样,制备方法按MT/T 593.1-2011 中 6.2.2 和 6.2.3 的规定进行。单试样分级加载时取 1 个试样,多试样加载时应取 3~4 个试样。

E.2 试验温度应符合冻结壁的温度,通常选取-10℃;也可进行多种试验温度的试验。

E.3 确定出三级围压值:(0.013H-1) MPa、(0.013H) MPa和 (0.013H+1) MPa,或 (0.013H) MPa、(0.013H+1) MPa和 (0.013H+2) MPa (当深度小于 120m时)。其中H为试验土层深度(单位m),0.013H为试样所处层位的静水压力。围压波动度应不大于±10kPa。

E.4 轴向应变速率取 1%/min,测读应力应变和体变,当轴向应力不再增加时,继续加载至轴向应变增加 3%~5%,若压力传感器读数无明显变化,轴向应变达到 20%停止试验。

E.5 多试样三轴剪切试验:

——固结后的试样高度及面积分别按照式 (E.1) 和式 (E.2) 计算:

$$h_c = h_0 - \Delta h_c \dots\dots\dots (E.1)$$

$$A_c = (V_0 - \Delta V_c) / h_c \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

h_c ——固结后试样高度,单位为毫米(mm);

h_0 ——固结前试样高度,单位为毫米(mm);

Δh_c ——固结后试样高度的变化量,单位为毫米(mm);

A_c ——固结后试样截面积,单位为平方毫米(mm²);

V_0 ——固结前试样体积,单位为立方毫米(mm³);

ΔV_c ——固结后试样体积变化量,单位为立方毫米(mm³)。

——多试样三轴剪切试验剪切时的试样应变及面积分别按照式 (E.3)、式 (E.4) 和式 (E.5) 计算。其中应变包括轴向应变和试样平均径向应变。

$$\varepsilon_1 = \Delta h / h_c \dots\dots\dots (E.3)$$

$$\varepsilon_3 = \Delta D / D_0 \dots\dots\dots (E.4)$$

$$A_a = A_c / (1 - \varepsilon_1) \dots\dots\dots (E.5)$$

式中:

ε_1 ——轴向应变;

Δh ——剪切过程中试样轴向变形,单位为mm;

ε_3 ——试样平均径向应变;

ΔD ——试样径向平均变化量,单位为mm;

D_0 ——试验前试样平均直径,单位为mm;

A_a ——剪切过程中试样截面积,单位为mm²。

E.6 单试样分级加载三轴剪切试验:

DB ××/T ××××—××××

- 施加第一级围压后试样高度和面积按式 (E. 1)、(E. 2) 计算, 试验中的试样轴向应变和面积按式 (E. 3)、(E. 5) 计算;
- 施加第一级围压固结后, 试样的高度和面积作为第二级围压下的起始高度和面积, 按式 (E. 1)、(E. 2) 计算;
- 施加第二级围压固结后, 试样的高度和面积作为第三级围压下的起始高度和面积, 按式 (E. 1)、(E. 2) 计算;
- 试样体积变化量计算:

$$\Delta V = \Delta L \cdot A_v - (\Delta h_c + \Delta h) \cdot A_p \dots\dots\dots (E. 6)$$

式中:

- ΔV ——试样体积变化量, 单位为立方毫米 (mm³);
- ΔL ——体变测量仪活塞杆位移量, 单位为毫米 (mm);
- A_v ——体变测量仪缸体截面积, 单位为平方毫米 (mm²);
- A_p ——进入压力室轴向加压活塞杆的截面积, 单位为 mm²。

E. 7 弹性模量的计算应按下列公式确定:

$$E_t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \dots\dots\dots (E. 7)$$

式中:

- E_t ——弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);
- $(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}$ ——50%的破坏应力, 单位为兆帕 (MPa);
- $\varepsilon_{0.5}$ —— $(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.5}$ 所对应的应变值, 10⁻⁶。

E. 8 泊松比的计算应按下列公式确定:

$$\mu = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \dots\dots\dots (E. 8)$$

式中:

- ε_1 ——对应主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与应变关系曲线直线段的轴向应变;
- ε_3 ——计算轴向应变所对应的试样总平均径向应变。

E. 9 内摩擦角和粘聚力应按下列方法确定

- 在直角坐标上, 以法向应力 σ 为横坐标, 剪应力 τ 为纵坐标, 在坐标轴上以 $\frac{s_{1f} + s_{3f}}{2}$ 为圆心, $\frac{s_{1f} - s_{3f}}{2}$ 为半径 (f 注脚表示破坏应力), 在 τ - σ 应力平面图绘制莫尔破损应力圆;
- 各个不同围压 S_3 下破损应力圆的公切线, 即为莫尔破损圆包络线;
- 莫尔破损应力圆包线与纵坐标的截距即为粘聚力 c ; 此破损应力圆包线与水平线的夹角即为内摩擦角 φ 。

附 录 F
(资料性附录)
人工冻土单轴蠕变试验

F.1 试样应采用冻结原状土试样或冻结重塑土试样,制备方法按MT/T 593.1-2011 中 6.2.2 和 6.2.3 的规定进行。多试样单轴蠕变试验一种土层应取 5 个试样,单试样分级加载单轴蠕变试验一种土层应取 2 个试样,其中一个试样用于进行瞬时单轴抗压强度试验。

F.2 试验温度应符合冻结壁的温度,通常选取-10℃;也可进行多种试验温度的试验。

F.3 多试样单轴蠕变试验试样加载时应迅速加载至所需荷载或应力值,试样所受应力宜保持恒定(其波动度不超过±10kPa)。试样变形已达稳定($d\varepsilon/dt \leq 0.0005h^{-1}$, I类蠕变) 24 h 以上或趋于破坏(I类蠕变)时,停止试验。

F.4 单试样分级加载单轴蠕变试验,测试进行到变形已达稳定($d\varepsilon/dt \leq 0.0005h^{-1}$, I类蠕变),或变形速率趋于常数($|d^2\varepsilon/dt^2| \leq 0.0005h^{-2}$, II类蠕变)超过 24 h (但不超过 48 h)时,一级蠕变结束。当某一级的测试进入第三阶段,不能再进行下一步加载时,可将此级蠕变进行到试验破坏为止。

F.5 应变计算:

——轴向应变应按下列公式确定:

$$\varepsilon_h = \Delta h / h_0 \dots\dots\dots (F.1)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_h - \varepsilon_e \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

- ε_h ——轴向总应变;
- Δh ——试样轴向变形,单位为毫米(mm);
- h_0 ——试验前试样高度,单位为毫米(mm);
- ε_c ——蠕变应变;
- ε_e ——弹性应变(加载过程瞬时应变)。

——径向应变应按下列公式确定:

$$\varepsilon_d = \Delta D / D_0 \dots\dots\dots (F.3)$$

式中:

- ε_d ——径向应变;
- ΔD ——试样直径平均变化量,单位为毫米(mm);
- D_0 ——试验前试样平均直径,单位为毫米(mm)。

F.6 应力、荷载计算:

——应力应按下列公式确定:

$$\sigma_i = k_i \sigma_b \dots\dots\dots (F.4)$$

式中:

- σ_i ——第*i*级加载时试样所受应力,单位为兆帕(MPa);

DB ××/T ××××—××××

K_i ——第*i*级蠕变加载系数；

σ_b ——瞬时单轴抗压强度，单位为兆帕（MPa）。

——荷载应按下列公式确定：

$$P_i = \sigma_i A_i \dots\dots\dots (F. 5)$$

$$A_i = \frac{A_{i-1}}{1 - \varepsilon_{i-1}} \dots\dots\dots (F. 6)$$

式中：

P_i ——第*i*级所加荷载值，单位为牛顿（N）；

A_i ——试样在加*i*级荷载时的横截面积，单位为平方毫米（mm²）。

F. 7 单轴蠕变数学模型及蠕变参数：

——根据试验数据建立相应的蠕变数学模型：

$$\varepsilon_c = f(T, \sigma_i, t) \dots\dots\dots (F. 7)$$

——宜采用下列函数描述蠕变数学模型：

$$\varepsilon_c = \frac{A_0}{(|T| + 1)^D} \cdot \sigma^B \cdot t^c \dots\dots\dots (F. 8)$$

式中：

T ——试验温度，单位为摄氏度（℃）；

σ ——轴向恒应力，单位为兆帕（MPa）；

t ——蠕变时间，单位为小时（h）；

A_0 、 B 、 D 、 c ——与试验温度、轴向恒应力、蠕变时间相关参数。

附 录 G
(资料性附录)
人工冻土三轴蠕变试验

G.1 试样应采用冻结原状土试样或冻结重塑土试样，制备方法按MT/T 593.1-2011 中 6.2.2 和 6.2.3 的规定进行。多试样三轴蠕变应取 5 个试样，单试样分级加载三轴蠕变应取 2 个试样，其中一个试样用于进行三轴剪切强度试验。

G.2 试验温度应符合冻结壁的温度，通常选取 -10°C ；也可进行多种试验温度的试验。

G.3 多试样分别加载，应在恒定围压下将试样迅速加载至所需荷载或应力值，试验过程中试样所受应力应保持稳定，波动度不应超过 $\pm 10\text{ kPa}$ 。当试样变形已稳定（ $d\varepsilon/dt \leq 0.0005\text{h}^{-1}$ ，I类蠕变）24 h 以上或已破坏（II类蠕变）时，试验结束。

G.4 单试样分级加载，测定进行到变形已稳定（ $d\varepsilon/dt \leq 0.0005\text{h}^{-1}$ ，I类蠕变）或变形速率趋于常数（ $|d^2\varepsilon/dt^2| \leq 0.0005\text{h}^{-2}$ ，II类蠕变）24 h 以上（不超过 48 h），一级蠕变结束。当某一级的测试进入第三阶段，不能再进行下一级加载时，可将此级蠕变进行到试样破坏为止。

G.5 应变计算：

——轴向应变应按下列公式确定：

$$\varepsilon_1 = \Delta h / h_0 \dots\dots\dots (G.1)$$

$$\varepsilon_{1c} = \varepsilon_1 - \varepsilon_e \dots\dots\dots (G.2)$$

式中：

ε_1 ——试样轴向总应变，从对应于蠕变开始时计算；

Δh ——试样轴向变形量，单位为毫米（mm）；

h_0 ——试验前试样轴向长度，单位为毫米（mm）；

ε_{1c} ——试样轴向蠕变应变；

ε_e ——弹性应变（加载过程中瞬时应变）。

——径向应变应按下列公式确定：

$$\varepsilon_3 = \Delta D / D_0 \dots\dots\dots (G.3)$$

$$\varepsilon_{3c} = \varepsilon_3 - \varepsilon_{3e} \dots\dots\dots (G.4)$$

式中：

ε_3 ——试样总平均径向应变；

ΔD ——试样径向总平均变化量，单位为毫米（mm）；

D_0 ——试验前试样平均直径，单位为毫米（mm）；

ε_{3c} ——试样平均径向蠕变应变（从对应的轴向蠕变应变开始时刻计）；

ε_{3e} ——试样加恒定蠕变应力后平均瞬时径向应变（与对应的瞬时轴向应变时间段一致）。

——应变强度应按下列公式确定：

$$\gamma_c = \frac{2}{3}(\varepsilon_{1c} - \varepsilon_{3c}) \dots\dots\dots (G.5)$$

DB ××/T ××××—××××

式中:

γ_c ——应变强度。

——当忽略试样径向蠕变应变:

$$\gamma_c = \frac{2}{3} \varepsilon_{1c} \dots\dots\dots (G.6)$$

G.6 应力计算:

——应力强度应按下列公式确定:

$$\tau = \sigma_1 - \sigma_3 \dots\dots\dots (G.7)$$

式中:

τ ——应力强度, 单位为兆帕 (MPa);

σ_1 ——轴向主应力, 单位为兆帕 (MPa);

σ_3 ——径向主应力, 单位为兆帕 (MPa)。

——应力强度取值应按下列公式确定:

$$\tau_i = k_i \tau_b \dots\dots\dots (G.8)$$

式中:

τ_i ——第*i*级蠕变应力强度取值, 单位为兆帕 (MPa);

K_i ——加载系数;

τ_b ——试样瞬时应力强度, 单位为兆帕 (MPa)。

G.7 蠕变数学模型按下列公式确定:

$$\gamma_c = f(T, \tau, t) \dots\dots\dots (G.9)$$

式中:

T ——试验温度, 单位为摄氏度 (°C);

t ——蠕变时间, 单位为小时 (h)。

G.8 采用幂函数描述人工冻土蠕变数学模型如下:

$$\gamma_c = \frac{A_0}{(|T|+1)^D} \tau^B t^C \dots\dots\dots (G.10)$$

式中:

A_0 ——试验确定的常数;

B ——试验确定的应力影响无量纲常数;

C ——试验确定的时间影响无量纲常数;

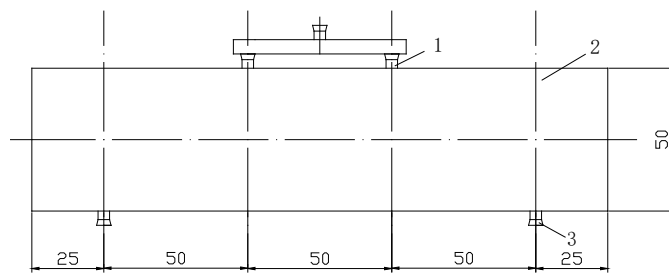
D ——试验确定的温度影响无量纲常数。

附录 H
(资料性附录)
人工冻土抗折强度试验

H.1 采用冻结原状土样，其取样和制备方法按MT/T 593.1-2011 中 6.2.2 的规定进行，采用冻结重塑土试样，其制备方法按MT/T 593.1-2011 中 6.2.3 的规定进行。试样规格采用 200 mm×50 mm×50 mm。每层土每个试验温度应取 4 个试样。

H.2 试验温度应符合冻结壁的温度，通常选取-10 ℃；也可进行多种试验温度的试验。

H.3 试样放置按图H.1 所示，在试验机的支座上应放稳对中，承压面应选择试样成型时的侧面，支座和加压头的间距尺寸偏差应不大于±1 mm。



说明：

1——加压头；

2——试样；

3——支座头。

图H.1 试样受力情况

H.4 试样应进行两次预弯，预弯荷载均相当于破坏荷载的 5 %~10 %。

H.5 加载时，应以 60 N/s 的速度连续均匀加载，不得冲击。每加载 100 N 或 200 N 测读并记录应变值，当试样接近破坏时应停止调整试验机油门直至试样破坏；若试样未破坏，支座位置发生错动，则停止试验，破坏荷载按发生错动时荷载计算。

H.6 人工冻土抗折强度计算：

$$f_f = \frac{Pl}{bh^2} \dots\dots\dots (H.1)$$

式中：

f_f ——抗折强度，单位为MPa；

P ——破坏荷载，单位为N；

l ——支座间距(即跨度) $l=3h$ ，单位为mm；

b ——试样截面宽度，单位为mm；

h ——试样截面高度，单位为mm。

H.7 抗折强度应以三个试样测值的平均值作为试验结果。当三个试样抗折强度中的最大值和最小值，与中间值之差均超过中间值的 15 % 时，该组试验应重做。