南京地铁试验段联络通道及排水泵房冻结加固施工技术及分析

陈裕康[1], 何立军[2]

(1. 上海隧道工程股份有限公司,上海 200030; 2. 上海申元岩土工程有限公司,上海 200011)

摘 要:结合南京地铁试验段联络通道及排水泵房冻结法施工,分析总结了冻结法在冻结管施工、冻结、开挖构筑等阶段的施工技术难点及对策,同时,对施工监测进行分析,探讨了冻结过程中温度、地面变形、冻胀压力等的变化规律,可以为今后南京地铁旁通道冻结法施工及监测提供一定的参考。

关键词:南京地铁;隧道;冻结法;温度;冻胀;旁通道

中图分类号:U455.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-7428(2008)09-0070-06

Technology and Analysis on Freezing Consolidation Construction in Side Channels and Pumping Station of the Test Section of Nanjing Subway/*CHEN Yu-kang*[1], *HE Li-jun*[2] (1. Shanghai Tunnel Engineering Co. Ltd, Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering, Shanghai 210011, China)

Abstract: Combining the freezing method construction of side channels of the test section of Nanjing subway, the paper gave the analysis and summary for some technical problems and countermeasures of the freezing method in different construction stages such as construction of freezing pipes, freezing, excavation and so forth, discussion was made on the variation rules of the temperature in the freezing, deformation of the ground surface and stress of frost upheaval, the conclusion can be reference for future freezing method construction and monitoring of side channels in Nanjing subway.

Key words: Nanjing subway; tunnel; freezing method; temperature; frost upheaval; side channel

1 工程概况

双线地铁隧道长度 >1 km 时,一般需要在上、下行隧道之间设置联络通道和泵站,用于意外事故时人员疏散和渗漏水排放。地铁联络通道、泵站施工是软土隧道设计、施工的难点,也是影响工程工期的关键节点之一。

南京地铁试验段在里程 K5+438.661 处两条隧道间设置联络通道及排水泵房即在原南京搪瓷厂厂房(已空置待拆迁)以南的人行道、机动车道以及某汽车修理厂空场地进出道底下(见图 1)。隧道中心埋深 13.133 m。联络通道及排水泵房工程结构由 2 个与隧道相交的喇叭口、通道及集水井等组成。

由于处于人行道、机动车道下,为了减少对交通的影响,结合工程地质条件及其它施工条件,确定采用"隧道内钻孔冻结加固,矿山法暗挖构筑"的施工方案,即:在隧道内利用水平孔和部分倾斜孔冻结加固地层,使联络通道及集水井外围土体冻结,形成强度高,封闭性好的冻土帷幕,然后根据"新奥法"的基本原理,在冻土中采用矿山法进行联络通道及泵站的开挖构筑施工,地层冻结和开挖构筑施工均在区间隧道内进行。

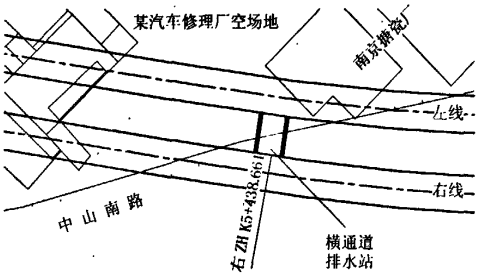

图 1 试验段联络通道及泵房位置示意图

2 工程地质概况

南京地铁试验段地貌隶属于岗前洪积扇~古秦淮河冲积漫滩平原,经人类长期堆填,除秦淮河岸边场地外,现地势较为平坦。

根据地质勘察报告,联络通道及泵房所处位置的土层为粉土②$_{1-1c3}$层、粉质粘土②$_{1-2h2}$层、游泥质

收稿日期:2008-03-18

作者简介:陈裕康(1975-),男(汉族),浙江缙云人,上海隧道工程股份有限公司第一项目管理部副总工程师、上海轨道交通 7 号线常熟路站项目常务副经理兼项目总工程师,工程师,地质工程专业,工学硕士,从事地下工程施工方面的技术工作,上海市卢湾区龙华东路 660 号 8 号楼四层,ghostchyk@163.com。

万方数据

粉质粘土②$_{2-1b3-4}$层、粉砂②$_{2-2d3}$层、粉土②$_{2-3c2-3}$层。土层透水性差,是旁通道冻结施工较为有利的土层。各土层的物理力学性质如表 1 所示。

表 1　联络通道及泵房土层物理力学性质指标

土层性质	c_k /kPa	φ_k /(°)	f_k /kPa	渗透系数 /($\times10^{-6}$cm·s^{-1})	渗透性
淤泥质粉质粘土	10.92	9.6	80	0.139~9.18	不透水
粉土②	15.76	21.0	100	3.38~90.8	微透水
粉质粘土	50.63	9.4	200	0.304~0.572	不透水

3　联络通道及泵房结构介绍

联络通道结构由通道及泵房组成,通道与隧道钢管片接口处为喇叭口形状。结构组成为 20 cm 的喷锚混凝土保护层、EVA 防水层、40 cm 的钢筋混凝土结构。见图 2。

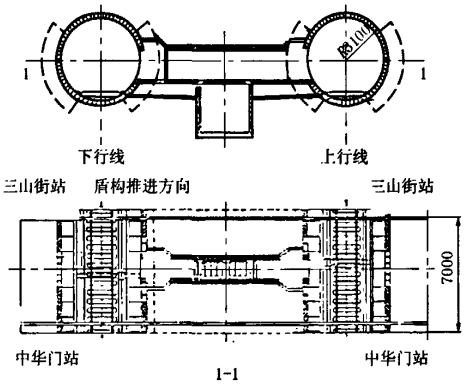

图 2　联络通道及泵房结构示意图

4　冻结法加固施工

4.1　冻结帷幕设计

4.1.1　联络通道冻结帷幕

4.1.1.1　断面、荷载及冻土厚度

根据地质资料,地面标高为 +10.5 m,隧道中心埋深 13.133 m,按公式 $P=13H$(kPa)计算的旁通道上部荷载和侧向荷载,则旁通道冻结帷幕结构荷载如图 3 所示。计算模型采用矩形刚架(冻结孔布置按矩形布置),设冻土帷幕厚度为 1.6 m,通道开挖轮廓高为 4.24 m,宽 3.20 m,计算该结构内部的弯矩和轴力,进而求得截面内的压应力、拉应力的剪应力。

4.1.1.2　各截面的弯矩及轴力

联络通道中部冻土结构的弯矩及轴力见图 4。

4.1.1.3　喇叭口冻结帷幕

联络通道两端的喇叭口冻结帷幕断面形状与联络通道类似,经同样设计步骤,得到冻土结构的断面应力状况,在图 4 所示中截面 4 和 5 处要求冻土厚度为 2.0 m。由于截面 4 和 5 为喇叭口底部的角点的中点,所以该处冻土厚度可由倾斜孔得到加强。

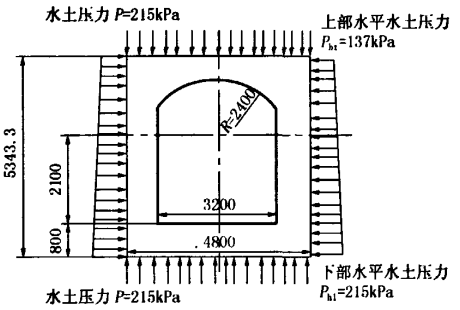

图 3　冻土帷幕受力简图

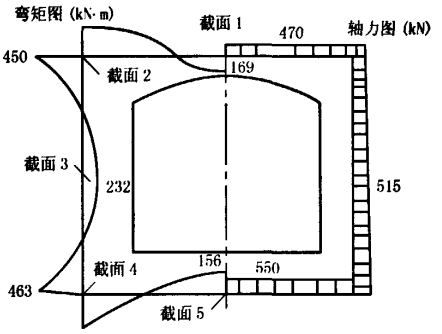

图 4　冻土结构各截面承受的弯矩及轴力

4.1.1.4　泵房冻结帷幕

泵站集水井为矩形断面深约 3.4 m。经计算需要的冻结帷幕为 1.8 m。其角点应力集中,在布孔时可采取加强措施。

4.2　冻结孔布置

根据冻结帷幕设计及联络通道的结构,冻结孔按上仰、近水平、下俯 3 种角度布置。开孔间距为 0.6~0.7 m,冻结孔数 58 个。冻结孔的布置及钻进参数详见图 5、表 2 和图 6。

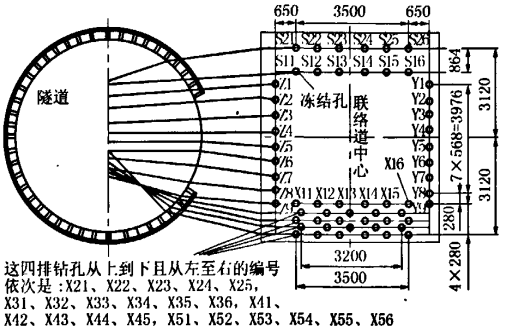

图 5　冻结孔布置图

万方数据

表 2 冻结孔钻进参数表

冻结孔	孔深/mm	仰角/(°)	冻结孔	孔深/mm	仰角/(°)
S21 ~ S26	2545	19.0	Z7,Y7	7793	-6
S11 ~ S16	9301	4	Z8,Y8	8333	-4
Z1,Y1	9301	4	Z9,Y9	9565	-6
Z2,Y2	8340	3	X11 ~ X16	9565	-6
Z3,Y3	7821	1	X21 ~ X26	8541	-15
Z4,Y4	7411	0	X31 ~ X36	8849	-24
Z5,Y5	7361	-1	X41 ~ X45	7513	-36
Z6,Y6	7493	-2	X51 ~ X56	5507	-51

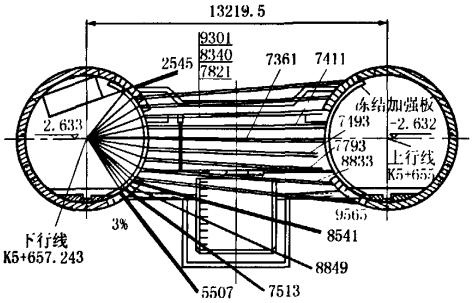

图 6 冻结孔剖面布置图

(1)钻孔开孔直径 110 mm,下冻结管直径 95 mm,开孔劈开钢管片肋板;

(2)终孔间距≥1000 mm;

(3)图 5 中钻孔深度从隧道内表面算起至管端止,Z2 ~ Z8 和 Y2 ~ Y8 钻孔深度以钻头碰到对面隧道为准,其中 Z5 和 Z6 为透孔,每个钻孔还应向北偏斜 1.7°;

(4)严格控制钻孔漏泥漏水,对地层影响符合市政要求。

4.3 制冷设计

4.3.1 冻结参数确定

(1)设计盐水温度为 -28 ~ -30 ℃。

(2)冻结孔单孔流量≤4 m^3/h。

(3)冻结孔终孔间距 $L_{max} \leq 1000$ mm,冻结帷幕交圈时间为 20 天,达到设计厚度时间为 30 天。

(4)积极冻结时间为 30 天,维护冻结时间 35 天。

(5)测温孔 10 个(3 个兼作卸压孔),具体位置视现场情况而定。

4.3.2 需冷量和冷冻机选型

冻结需冷量:

$$Q = 1.3\pi dHK = 47722 \text{ kcal/h}$$

式中:d——冻结管直径;H——冻结总长度;K——冻结管散热系数。

选用 YSLGF300Ⅱ型螺杆机组一台套,设计工况制冷量为 87500 kcal/h,电机功率 110 kW。

4.3.3 冻结系统辅助设备

(1)盐水循环泵选用 IS125 - 100 ~ 200 型 2 台,流量 200 m^3/h,电机功率 45 kW,其中一台备用。

(2)冷却水循环选用 IS125 - 100 ~ 200C 型 2 台,流量 120 m^3/h,电机功率 30 kW,其中一台备用。冷却塔选用 NBL - 100 型一台,补充新鲜水 15 m^3/h。

4.3.4 管路选择

(1)冻结管选用 Ø95 mm × 6 mm,20 低碳无缝钢管。

(2)测温孔管选用 Ø95 mm × 6 mm,20 低碳无缝钢管。

(3)供液管选用 2 in(1 in = 25.4 mm)钢管,采用焊接连接。

(4)盐水干管和集配液圈选用 Ø159 mm × 6 mm 无缝钢管。

(5)冷却水管选用 Ø133 mm × 4.5 mm 无缝钢管。

4.3.5 用电负荷

用电负荷约 200 kW/h。

4.3.6 其它

(1)冷冻机油选用 N40 冷冻机油。

(2)制冷剂选用氟立昂 R - 22。

(3)冷媒剂选用氯化钙溶液。

4.4 冻结施工技术要点

在该地层冻结工程中,由于其特殊施工条件与要求,需采取特别工艺与技术措施,以控制冻结孔钻进、地层冻胀和融沉等对隧道的影响。根据国内外最新研究成果和施工经验,提出以下冻结施工技术措施。

(1)在已贯通的隧道钻冻结孔,根据联络通道的结构,采用上仰、近水平和下俯 3 种成孔角度。

(2)由于冻土抗拉强度低,因此除设计中尽量降低冻土帷幕所承受的拉应力外,主要做好冻结和开挖的配合工作,要求及时封闭薄弱的冻结壁,并根据开挖后冻结帷幕变形情况及时调整开挖构筑工艺。

(3)为减小土层冻胀,隧道上下对称布置冻结孔,在适当部位设卸压孔,并采用小开孔距,较低盐水温度,较大盐水流量以加快冻结速度。

(4)为了加强上行线(图 6 中的右侧隧道)一侧冻结帷幕的交圈效果,两个冻结孔水平穿透两条隧道并在上行线一侧围绕联络通道口设置冻结管路使

万方数据

之冷冻时形成一个冻结饼,从而加强上行线一侧冻结效果。

(5)在冻土帷幕关键部位,多布置测温孔,监测冻土帷幕的形成过程和形成状况。

(6)进行冻结地层温度、地层沉降的量测,以指导联络通道的施工。

4.6 冻结效果分析

(1)盐水温度开机 2 天降到 -20 ℃,降温比较快,到 39 天盐水温度 -33 ℃,盐水的降温正常,盐水的去、回路温度差已经从开始的平均 2 ℃降到 0.5 ℃,说明地层的热负荷减少,冻土帷幕形成良好。

(2)在隧道的两侧共布置 10 个测温孔,根据实测资料,测 5 孔距冻结主面 750 mm,冻土平均发展速度 27.8 mm/d;测 3 孔距冻结主面 400 mm,冻土平均发展速度 26.7 mm/d;测 2 孔距冻结主面 500 mm,冻土平均发展速度 25.0 mm/d。以上 3 孔的冻土平均发展速度为 26.5 mm/d,按此推算冻结时间 39 天,冻土发展厚度 2.06 m,超过设计厚度 0.46 m。

(3)在隧道一侧(下行)共布置 4 个冻胀压力测孔,根据实测数据,冻胀压力测孔 1 冻结时间 19 天时的冻胀压力达到最大值 0.73 MPa;测孔 4,冻结时间 20 天的冻胀压力达到最大值 1.81 MPa。说明冻结 20 天左右时冻土柱已经交圈,冻结帷幕已基本形成。此后冻胀压力趋于稳定并逐步减少,冻土帷幕厚度增加,符合冻土冻结规律。

(4)在隧道一侧(下行)旁通道开挖断面内布置一个泄压孔,到 26 天,压力不再升高,说明冻结帷幕内的自由水由于水分迁移的作用已经基本补给到冻土中,到 35 天打开该泄压孔,有少量水和泥浆流出,几分钟后停止,该孔敞开状态,没有水流出。

(5)根据地面变形的监测资料,到 31 天,旁通道上方地面的最大变形 15 mm,地面变形趋于稳定,说明冻土结构的扩展速度变缓慢。

(6)观察隧道内部管片上的结霜情况正常,结霜的范围和轮廓比较均匀,反映出冻结过程正常。

5 结构施工

联络通道开挖构筑施工占用一侧隧道,在联络通道开口处搭设工作平台,利用隧道作为排渣及材料运输通道。经探挖试挖确认可以进行正式开挖后,打开钢管片,然后根据"新奥法"的基本原理,进行暗挖法施工。

根据工程结构特点,联络通道开挖掘进采取分区分层方式进行,顺序为通道→喇叭口→泵房。开挖掘进采用短段短砌技术,开挖步距控制在 0.3 ~ 0.5 m,两端喇叭口处断面较大,为减轻开挖对隧道变形的影响,开挖步距控制为 0.3 m,由于冻土强度高,韧性好,普通手镐无法施工,需采用风镐进行掘进。

结构施工顺序为:支护混凝土喷锚(保护层)→防水层 EVA 板施工→永久结构混凝土浇筑。

6 冻结施工环境监测情况分析

6.1 温度监测分析

6.1.1 测温孔及测压孔布置

为了全面了解冻土的发展过程,在左线隧道中布置了 4 个测温孔,其中 3 个兼作测压孔(如图 7)。

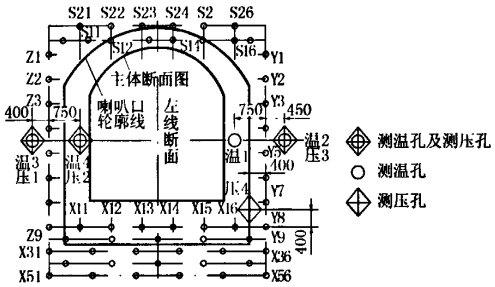

图 7　左线隧道内测温孔及测压孔布置示意图

冻结管是在左线隧道中钻进施工的,考虑到在冻结过程中在右线隧道处可能形成冻结死角,因此,在右线隧道中布置了 6 个测温孔(见图 8),以便能够更好地监测冻土的发展情况,用以指导施工。每个测温孔中布置 3 个测点,从隧道管片往里依次为测点 1、2、3,各测点间距为 1 m,测点 1 离管片外壁为 1 m。

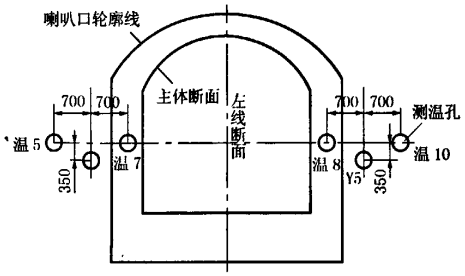

图 8　右线隧道内测温孔布置示意图

6.1.2 温度监测结果分析

从冷冻机启动开始冻结至旁通道结构施工完工,对各测温孔测点温度进行了检测,土体在冻结过

万方数据

程中温度变化可以非常明显地区分为 2 个阶段(见图 9、10)。

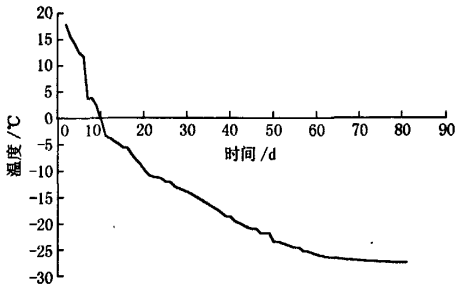

图 9 测温孔 6 测点 1 温度变化曲线

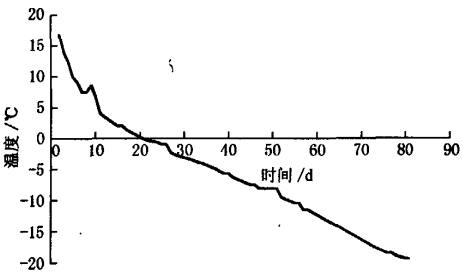

图 10 测温孔 2 测点 1 温度变化曲线

(1)温度剧烈变化期。在土体温度下降至 0 ℃前,土体的温度下降较快,最大下降幅度达到 2 ℃/天。

(2)温度下降缓和期。随着土体温度继续下降到0℃左右,土体开始冻结,直至交圈形成冻土墙,在此阶段冻土的温度下降逐渐趋缓,平均下降幅度约为0.5 ℃/天,进入维护冻结期后,为了保证开挖构筑施工安全,冷冻机一直维持运行,冻土温度持续下降,最低处土体温度下降至约 -30 ℃。

6.2 地面隆沉监测分析

6.2.1 地面隆沉测点布置

为了了解冻结孔施工、积极冻结及开挖构筑各个阶段地面隆沉情况,在旁通道上部布置了 8 个变形测点(见图 11)。

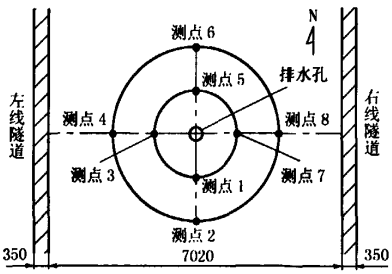

图 11 地面隆沉测点布置图

6.2.2 地面隆沉检测结果分析

从图 12、图 13 中可以看出,地面变形可根据施工过程明显地分为 4 个阶段。

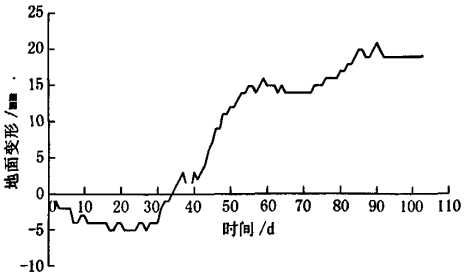

图 12 测点 1 地面变形曲线

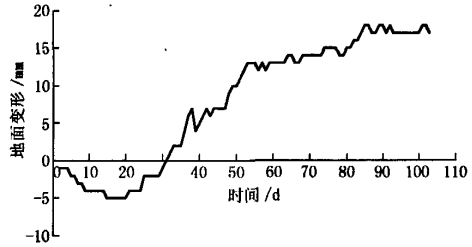

图 13 测点 2 地面变形曲线

(1)每一阶段:是冻结孔施工阶段(共 21 天),特征主要表现为地面发生沉降,沉降量不大,最大值为 5 mm。主要是因为在冻结孔施工过程中,有部分水土流出冻结孔,地层产生了一定的损失。后期为了减少地面变形,在每个冻结孔施工完成后进行了注浆,平均每孔注浆用水泥约为 0.5 t,注浆压力控制在 0.2 ~0.3 MPa 之间,这样有效地控制了地面沉降。

(2)第二阶段:主要是冻结管施工完成后的积极冻结阶段(共 41 天)。这一阶段的主要特征表现为开始一段时间(约为 10 天)地层变形平缓,主要是因为土体温度处于下降阶段,但还未冻结。随着土体温度的进一步下降至 0 ℃以下,土体发生冻结,伴随着土中水分及迁移过来的水的冻结,土体的体积发生膨胀,引起了地面的迅速隆起。

(3)第三阶段:主要是积极冻结完成后的开挖阶段(共 8 天),这一阶段的主要特征是地面隆起速率变小,几乎为 0。主要是因为在开挖过程中采取了及时支护。

(4)第四阶段:主要是开挖完成后的结构构筑阶段(共 32 天),这个阶段冻结继续进行,土体温度持续下降,但由于开挖完成后进行了及时支护,土体发生融变变形不大,地面变形继续表现为缓慢的隆起,直至结构施工完成。结构施工完成后,进入了解冻阶段,为了防止解冻造成地面的较大沉降,利用预

万方数据

埋注浆管进行了注浆处理,由于采取了这一措施,解冻阶段地面未发生大的沉降。

6.3 冻胀压力检测结果分析

6.3.1 测压孔布置(见图7)

6.3.2 冻胀压力检测结果分析

根据图 14 及图 15 可知,冻胀力在冻结初期几乎未发生变化,随着土体温度的下降,土体进入冻结,冻胀力迅速增大。冻胀力的发展大部分发生在积极冻结期间。在开挖、构筑阶段冻胀力有一定的发展,但发展趋势趋缓。在构筑完成后,冻胀力发展到最大值。

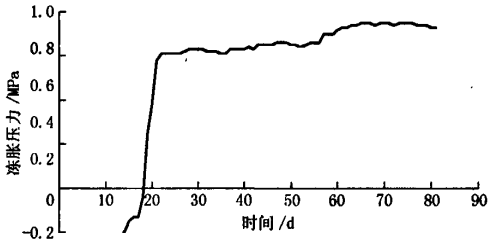

图 14　测压孔 1 测点 2 冻胀压力曲线

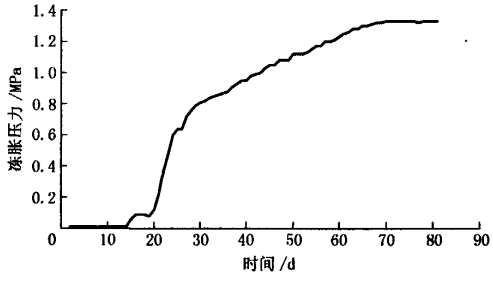

图 15　测压孔 3 测点 1 冻胀压力曲线

6.3.3 温度与冻胀压力的关系

测压孔 1 与测温孔 3 是共用一孔的,测压孔 3 与测温孔 2 也是共用一孔的。根据图 16 及图 17 可知,冻胀力在温度 >0 ℃时几乎为0。随着温度的下降,至0 ℃以下,冻结管周围土体发生冻结,冻胀压力开始迅速增大,随着温度的进一步下降,增长率减小,冻胀压力的发生主要是在土体温度下降至 -10 ℃之前完成。

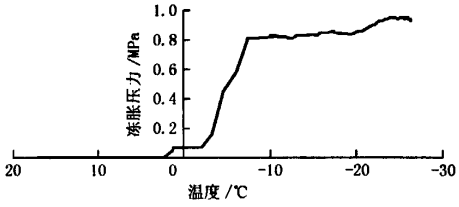

图 16　测温孔 3 与测压孔 1 温度 - 冻胀压力曲线

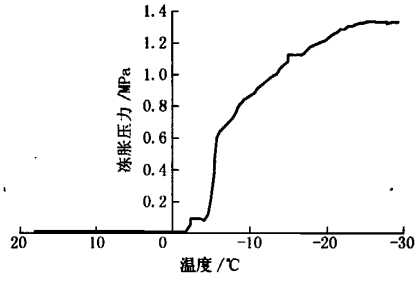

图 17　测温孔 2 与测压孔 3 温度 - 冻胀压力曲线

7 结语

旁通道的施工包括冻结孔施工、冻结施工、开挖构筑等许多阶段。只有针对各个阶段的特点及可能出现的问题采取相应的措施,同时,要对温度、地面变形、冻胀压力等进行监测,用以指导施工,才能保证旁通道冻结法施工的安全。

参考文献:

[1] H. 崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京:科学出版社,1985.
[2] 周希圣. 城市软土冻结加固技术[M]. 中州煤炭[J]. 1997,2(S1):26 - 28.

(上接第 69 页)

能取得较高的技术经济指标。此外,岩体结构面与钻孔的相对空间关系对爆破破碎效果也会产生重要影响,不同的空间关系对加载的响应是不同的,如果在考虑岩体结构的前提下,以孔内微差为基础并结合聚能装药的使用,在孔内取得较好的岩矿石综合爆破破碎效果是完全可能的。

参考文献:

[1] 王清明. 欧美国家水溶采矿发展的历史概况[J]. 盐业史研究,2001,(4):45 - 47.
[2] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984.
[3] 陈仕海,林从谋. 水压爆破岩石的破坏特征[J]. 煤炭学报,1996,21(1):24 - 29.
[4] 张明. 湿喷稠流混凝土技术研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2003.
[5] 周家汉. 第七届国际岩石爆破破碎学术会议概述[J]. 工程爆破,2003,9(1):53 - 60.
[6] 李夕兵,等. 常规炸药与不同岩体匹配的可能途径[J]. 矿冶工程,1994,14(1):17 - 20.
[7] 宗琦,孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(4):641 - 645.

万方数据