文章编号：1000－7598－(2008) 08－2283－04

地铁联络通道冻结加固融沉注浆研究

岳丰田[1]，张水宾[1]，李文勇[2]，黄海滨[2]

（1. 中国矿业大学 建筑工程学院/深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 江苏 徐州 221008；2. 上海申通地铁股份有限公司，上海 200010）

摘 要：介绍了国内首个地铁联络通道强制解冻融沉注浆工艺的设计与施工。整个施工过程中对土体温度和地表变形进行了监测，得到了温度和地表变形的变化规律。由于冻结法施工中存在冻胀和融沉问题，过量的冻胀、融沉会对地表建筑和地下管线产生危害。结合工程实例，对强制解冻融沉注浆进行了研究，该工程对冻结加固体分区强制解冻、及时进行融沉注浆、二次加固土体，消除了后期压密沉降发生的可能，地表变形的监测表明强制解冻融沉注浆技术在该类工程中应用效果良好。

关 键 词：地铁；联络通道；冻结加固；强制解冻；融沉注浆

中图分类号：U 45 **文献标识码**：A

Study on thaw settlement grouting applied to connected aisle construction with artificial ground freezing method in metro tunnel

YUE Feng-tian[1], ZHANG Shui-bin[1], LI Wen-yong[2], HUANG Hai-bin[2]

(1. School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;
2. Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., Shanghai 200010, China)

Abstract: The design and construction of thaw settlement grouting during forced thaw in the metro connected aisle project are described. Temperatures in soil as well as ground settlement are monitored during the construction. Frost-heave and thaw-settlement may exist in freezing project. Superfluous frost-heave and thaw-settlement can cause disaster. Based on the actual engineering, the paper studies thaw settlement grouting during forced thaw in the metro. The method of thaw settlement grouting during divisional forced thaw eliminates the possibility of consolidation settlement. Good effects has been achieved in this project from the ground settlement measured in situ.

Key words: metro; connected aisle; artificial ground freezing reinforcement; forced thaw; thaw settlement grouting

1 引 言

在城市地铁规划设计中，上下行隧道间通常要设置联络通道，而联络通道的施工，不仅要考虑自身结构和地面建筑物的安全，又要确保主隧道的稳定，其安全防护系统远不如主隧道完备[1]。尤其在周围地层为透水性强、承载力低的软土时，必须对施工区域土体进行加固，才能保证施工安全及减小对周围环境的影响。

水平冻结加固土体是一种行之有效的方法，在北京、上海、广州等城市地铁中都应用成功[2, 3]。采用冻结法施工时存在着冻胀和融沉问题，过量的冻胀或融沉会对地表建筑、地下结构和管线产生破坏作用，所以冻胀和融沉问题备受工程界的关注。国内外的工程实践表明，利用压力释放孔、注浆充填、工作面释放水和强制解冻融沉注浆等措施可有效地解决冻胀融沉问题。

目前上海地铁区间隧道联络通道冻结法施工融沉主要采用注浆进行控制，但是根据冻土自然解冻进行，由于自然解冻时间较长，后期的注浆得不到保证，冻土融化后排水固结引起较大的压密沉降，势必造成地表沉陷过大，对周围环境造成较大影响，甚至带来重大安全问题。鉴于此，上海轨道交通杨浦线（M8线）曲一虹区间隧道联络通道冻结法施工中，采用强制解冻冻结土体，及时对融土进行融沉注浆加固，有效地控制了地表的沉降。作为国内首例采用强制解冻融沉注浆技术的联络通道，其设计与施工给同类工程提供了宝贵的经验。

收稿日期：2006-11-21
作者简介：岳丰田，男，1963 年生，教授，博士，主要从事岩土力学、冻土力学、地下工程结构计算理论等方面的研究。E-mail: yueft@163.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 工程概况

上海轨道交通杨浦线（M8线）曲阳路站—虹口足球场站区间隧道联络通道及泵站位于两站区间隧道之间，联络通道所在位置处隧道中心标高–18.366 m，地面标高+3.86 m，中心埋深为22.226 m。整个联络通道由两个与隧道相交的喇叭口、旁通道和泵站组成，其结构见图1。联络通道施工范围内主要为灰色淤泥质黏土、灰色黏土和灰色粉质黏土层。灰色淤泥质黏土层土质均匀，夹极少量粉土，呈流塑状态；灰色粉质黏土层含水量高，孔隙率大，冻结孔穿越该层时受水头差的作用，极易产生涌砂、涌水现象。

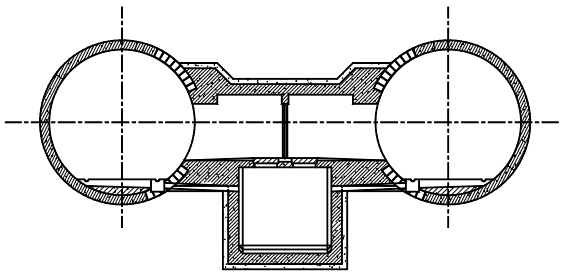


图 1 联络通道结构示意图
Fig.1 Sketch of connected aisle structure

根据本工程特点，选用冻结法加固土体，该法具有强度高、封水性好、安全可靠的优点，适于本工程的土体加固。两隧道间的联络通道通过的主要土层为黏土和粉质黏土层，是联络通道冻结施工较为有利的土层。待联络通道结构施工完成，结构注浆基本完成后，开始对冻结土体进行强制解冻融沉注浆加固，以控制融沉。

3 融沉注浆设计与施工

联络通道结构完成并养护至设计强度后，实施结构注浆和融沉注浆。融沉注浆在结构注浆完成之后进行。注浆前，保持一半冻结孔维持冻结，将冻结管间隔解冻后拔出，在拔出的冻结管空间放入专用注浆花管。注浆花管做好孔口密封后，利用剩余的一半冻结孔进行分区强制解冻，同时实施融沉注浆。

3.1 拔管与花管下放

结构注浆完成后，即准备拔管，下放注浆花管等材料设备，安装盐水箱及电加热器，布置热盐水干管。拔管前事先连接好准备拔除的冻结管，每次连接 1 或 2 个冻结管，用 70 ℃热盐水进行循环，一般循环 1 h 到 1.5 h 后用手拉葫芦拉拔出冻结管。拔管时要常转动冻结管，如拔不动须继续循环热盐水解冻，直至拔出。随后顶入准备好的注浆花管，并在管口周围用棉纱和膨胀性快硬水泥封堵，头部安装阀门，花管下放见图 2。由于冻结管施工时注浆的影响以及现场盐水干管的遮挡，拔管的位置应根据现场条件作相应的调整，但要尽量保证被加固融土在平面上和深度范围内形成一个整体。

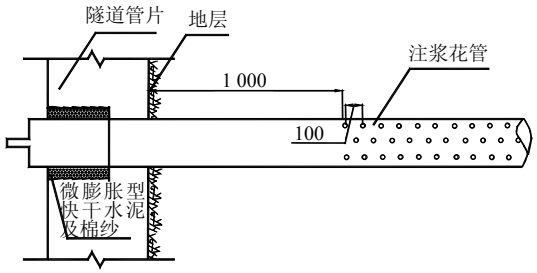


图 2 注浆花管下放示意图（单位：mm）
Fig.2 Sketch of grout holey pipe in the thawed soil (unit: mm)

3.2 强制解冻工艺

强制解冻与自然解冻相对，是用高温盐水通过盐水泵循环使冻土加速融化的方法。作为土体冻结的一个逆向过程，强制解冻可用下式计算冻土强制化冻时所需的解冻功率：

$$Q_0 = K\pi dnHq \qquad (1)$$

式中：Q_0 为实际解冻功率（kW）；K 为管路热量损失系数；d 为解冻管直径（m）；H 为解冻深度（m）；n 为解冻管数目；q 为解冻管的放热率（kW/m^2）。现场联络通道强制解冻施工采用电加热器对盐水加热，共计采用 18 个 9 kW 的电加热器，盐水温度控制在 70±5 ℃，去回路温差为 1 ℃左右，盐水循环压力为 0.15 MPa，流量为 80 m^3/h。

为了减小大规模的地表融沉给地表建筑和地下管线带来的不利影响，以及降低控制融沉的难度，应对冻结加固体分区进行解冻，同时可根据现场温度和地表沉降的监测情况，在不影响质量和安全的条件下适时调整解冻分区数目，加快解冻速度，联络通道强制解冻设计中将冻结区域分为如下 5 个分区，2005 年 7 月 30 日对第一分区通热盐水强制解冻。9 月 11 日停止全部热盐水循环，拆除管路。至 9 月 12 日，所有测点温度均达到 0 ℃以上，最低温度为 1.1 ℃，即所有冻结土体解冻完成。根据监控情况，对实际工程调整为 3 个分区，加快了解冻进度。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3　融沉注浆工艺

注浆工艺根据所采用注浆方法的不同而不同，每种注浆方法决定着它所采用的注浆工艺。融沉注浆时浆液充填冻土融化孔隙，压密并劈裂融土，是加固土体效应和扰动土体效应同时存在和发展的过程。注浆过程中，注浆参数是影响注浆效果的重要因素。

对于饱和融土的融沉注浆，注浆压力引起孔隙水压力的变化，发生再固结过程[4]。假设浆液扩散半径范围内，冰全部融化，体积减小 9 %，注入浆液的体积可按下式计算：

$$V=\int_0^a 2\pi r[i_0\times 0.09+(p_0-u)m_v]H\mathrm{d}r \qquad (2)$$

式中：V 为注浆量（m^3）；a 为浆液扩散半径（m）；i_0 为体积含冰量；p_0 为注浆压力（MPa）；u 为融土孔隙水压力（MPa）；m_v 为融土的压缩系数（MPa^{-1}）；H 为浆液段长（m）。

注浆压力是浆液在地层中扩散的动力，它直接影响融沉注浆的加固效果，但受地层条件、注浆方法和注浆材料等因素的影响和制约。许多地层表面浅部注浆压力为 0.2～0.3 MPa，融沉注浆时，注浆压力在不影响地下结构稳定的前提下维持在 0.3～0.6 MPa 左右；当注浆压力增大时，地面会出现抬升趋势，因此需要适当控制注浆压力。

3.4　融沉注浆施工

融沉注浆自 2005 年 8 月 1 日正式开始，注浆材料为水泥浆，水灰比为 1:0.8，注浆压力控制在 0.4～0.6 MPa。考虑到冻结时间过长会对管片造成不良影响及在有保障的注浆情况下，8 月 10 日关闭冷冻机组，全部停止冻结。同时，为防止因关机冻土体融化可能造成的地面过大沉降，在通道上部冻土墙外两侧距离冻结孔 2.5 m 处布置补充注浆孔，上、下行线两侧各布置 2 个，共计 4 个，保证在地面变形较大时能及时补充足够的注浆量，达到控制地面变形的目的。

结构施工时预留有 6 个注浆孔，包括内外层两组。外层孔深度到达初衬（临时支护）和冻土墙之间，深度为 1 m；内层孔深度达到永久结构和初衬之间，深度为 0.5 m。在此基础上又增加了沿通道轴线方向注浆孔 11 个，分布在通道的两侧和顶板；在集水井内沿四周和底板每面布置两根注浆管，共计 10 个，预留注浆孔的位置见图 3。

融沉注浆在对冻土强制解冻的过程中进行，伴随着冻土融化而采取少量多次的原则，每天一次，注浆量按水泥量计控制在 1～2 t。注浆过程中地表出现上抬时，减小注浆压力，采取间歇注浆的方法。9 月 11 日，所有融沉注浆施工完成，总计注浆水泥用量共计 104 t，其中结构注浆 22 t，融沉注浆 82 t。

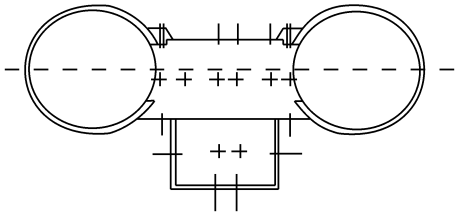


图 3　注浆孔布置剖面图

Fig.3　Grouting holes layout in section plane

4　施工监测

在解冻过程中土层物理性质发生了剧烈的变化，富冰冻土融化时常转变为不能承受荷载的稀释体，过量的融沉会对周围环境产生危害。因此，在整个融沉注浆施工过程中，需对温度场和位移场作全面监测，为适时掌握和控制施工过程提供指导和依据。

4.1　温度监测

为了指导融沉注浆施工和掌握解冻过程中温度场的发展情况，在原有测温孔中布置测点，测量解冻过程的温度场。每一孔内布置 3～8 个测点，其中下行线共 6 个测温孔，c1、c3 为深孔，其余为浅孔。深孔深度到对面管片，浅孔深度为 3.5 m，下行线测温孔具体布置见图 4。上行线共 4 个测温孔，均为浅孔，深度为 3.5 m。

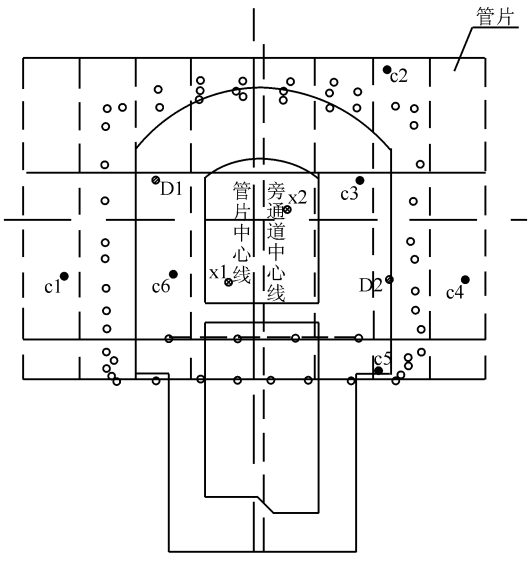


图 4　测点布置图

Fig.4　Layout of monitoring holes

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

强制解冻期间温度的监测结果如图 5 所示。负温阶段时，当土体的温度升到–3～0 ℃之间时，曲线明显变缓，甚至变平，即近似平行于时间轴，这也是解冻连通期温度变化的最显著的特点，其原因与冻结交圈类似。从图中可以看出，在解冻 15 d 左右冻结壁解冻连通，进入正温区后土体温度回升幅度较大，开始呈线性升温，随着温度的升高，升温速度减缓，温度曲线变的较为平缓。

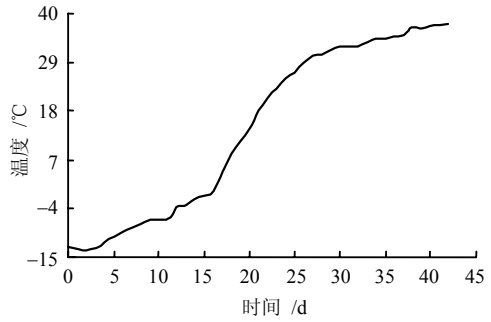


图 5 强制解冻期间 C5 孔温度变化曲线
Fig.5 Curve of temperature in C5 monitoring hole during forced thaw period

4.2 地表变形监测

施工过程中，对联络通道及泵站施工影响范围内的地表沉降进行了监测。联络通道中部地面变形的监测结果如图 6 所示。从图中可以看出，融沉注浆起初沉降较大，后期随着注浆量的增加，融化沉降得到控制，地表逐渐上抬。随着解冻进行，浆体周围的未解冻土融化产生新的孔隙，地表下沉，但随后的补浆又使地表上抬。现场融沉注浆施工采取多次补浆，地表变形曲线呈现波浪状。整个融沉注浆施工，注浆量为 82 t，地表变形沉降量小于 3 mm，最大抬升量小于 1 mm，完全控制在设计的范围内。

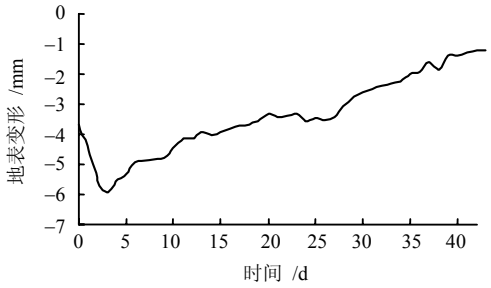


图 6 融沉注浆期间通道中部地表变形曲线
Fig.6 Ground settlement above the middle of connected aisle during thaw settlement grouting construction

5 结 语

冻结法作为一项阶段性的措施，不能达到永久改良土体的目的。冻土融化引起的后期沉降较大，持续时间长，因此必须采取相应的措施予以弥补。对冻结加固体进行强制解冻，加快了冻土的融化；及时的融沉注浆，浆液对土体产生的压密和劈裂作用，加速了融土排水固结，这使短时间内有效控制融沉成为可能。融沉注浆过程中对冻结加固体进行分区强制解冻，及时对已解冻土体进行注浆加固，合理设计注浆压力和注浆量更可以将融沉变形控制在较小的范围内。

上海轨道交通杨浦线（M8线）曲阳路站－虹口足球场站区间隧道联络通道成功的采用了冻结法。在工程结构注浆完成之后，首次采用融沉注浆技术将地表变形控制在4 mm之内，进一步证明融沉注浆是一项可靠的技术。首例联络通道强制解冻融沉注浆施工的成功实践为同类工程积累了经验。工程中采用的先进的融沉控制技术也使得冻结法施工在市政工程中具有更广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 张庆贺. 地铁区间隧道旁通道施工及监测技术[J]. 施工技术，2001，30（1）：32－33.
ZHANG Qing-he. Construction and monitor technology for the cross passages of subway tunnels[J]. **Construction Technology**, 2001, 30(1): 32－33.

[2] 周晓敏，苏立凡，贺长俊，等. 北京地铁隧道冻结法施工[J]. 岩土工程学报，1999，21（3）：319－322.
ZHOU Xiao-min, SU Li-fan, HE Chang-jun, et al. Horizontal ground freezing method applied to tunneling of Beijing Underground Railway System[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(3): 319－322.

[3] 徐晶. 冻结法在上海地铁联络通道施工中的应用[J]. 中国市政工程，2004，（5）：63－65.
XU Jing. Application of freezing method in construction of Shanghai Subway interconnecting roads[J]. **China Municipal Engineering**, 2004, (5): 63－65.

[4] 岩土注浆理论与工程实例协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京：科学出版社，2001.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net