

文章编号: 1674—8247(2018)05—0027—06

越江隧道联络通道冻结施工三维数值分析

肖飞知 高柏松

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:文章采用三维有限元分析方法,对运用冻结法修筑某越江隧道联络通道的全过程进行了模拟。研究表明:(1)冻胀力对冻土帷幕和主盾构隧道影响显著,应考虑实施低温快速冻结以减小冻胀量;(2)联络通道和泵房开挖后,冻土帷幕稳定性大幅削弱,拱顶位置及泵房底部与侧壁连接处是薄弱点;(3)联络通道底板和泵房侧壁初期支护拉应力较大,可考虑在原设计方案上加强;(4)补偿注浆可有效降低因融沉产生的结构差异变形;(5)当冻胀率控制在 3% 左右时,施工安全可得到保证,实际施工中可根据变形监测结果推出实际冻胀率。

关键词:联络通道;冻结法;冻胀;开挖;融沉;三维数值分析

中图分类号:U231

文献标志码:A

3-D Numerical Analysis of Connected Aisle Construction in Cross-river Tunnel with Artificial Ground Freezing Method

XIAO Feizhi GAO Baisong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The entire process of connected aisle construction in a cross-river tunnel with artificial ground freezing method is simulated by using 3-d finite element method. The results show that: (1) Frost heaving force has significant effect on the frozen soil and the shield tunnel, rapid freezing may reduce the amount of frost heaving; (2) After the excavation of the connected aisle and the pumping station, the stability of the frozen soil is deeply declined, arch top position and the junction of pumping station bottom with the wall are weak points; (3) The tensile stress of initial support in the bottom of the connected aisle and the pumping station wall is high, original design should be strengthened; (4) Compensation grouting can effectively reduce the differential deformation produced by thawing; (5) When frost heave rate is below 3%, the construction safety is assured, the actual rate in construction can be figured by deformation monitoring results.

Key words: connected aisle; artificial ground freezing method; frost heaving; excavation; thaw settlement; 3-D numerical analysis

人工冻结法基本不受支护范围和支护深度的限制,能有效地防止涌水涌砂、控制围岩变形,其适应性强、工程性能优、隔水可靠、对环境的影响小,是目前地下工程常见工法之一。在软弱富水地层和闹市、江底等特殊环境条件下隧道联络通道的施工实践中,冻结加固+暗挖构筑的方案已逐渐成为首选。在上海、南京、广州等地的轨道交通建设和穿越黄浦江、长江的多条

盾构隧道中有过很多成功的应用^[1-2],也有一定经验教训。

冻土帷幕的形成与消失是一个水分、温度、应力多场耦合的复杂过程,且涉及到相变和迁移边界的问题,许多学者采取数值模拟和模型试验的手段对此进行了一些针对性研究^[3-5]。就联络通道的施工力学行为而言,一般均脱离冻结形成过程的分析,在给定冻土体强

收稿日期:2018-01-10

作者简介:肖飞知(1985-),男,工程师。

引文格式:肖飞知,高柏松. 越江隧道联络通道冻结施工三维数值分析[J]. 高速铁路技术,2018,9(5):27-32.

XIAO Feizhi, Gao Baisong. 3-D Numerical Analysis of Connected Aisle Construction in Cross-river Tunnel with Artificial Ground Freezing Method [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 27-32.

度条件的情况下运用数值分析的手段对隧道、联络通道结构及冻土帷幕的力学响应展开研究^[6-7]。目前也有不少实例给出了冻结法修建联络通道过程中结构体和冻土帷幕各项力学指标的实测数据^[8]。

本文以某越江隧道联络通道建设为背景,综合考虑冻土帷幕的形成,暗挖构筑的分步实施以及后期融沉与补偿注浆的全过程,进行详尽的分析,并据此对施工提出建议。

1 工程背景

该区间隧道 1 号联络通道位于钱塘江底,中心标高 -23.52 m,左右线隧道中心距离 12 m 如图 1 所示。联络通道由左、右线隧道管片相连接的喇叭口、水平通道和通道下方的泵房三部分组成,结构从外到内分别为支护层、缓冲层、防水板、保护层、结构层。

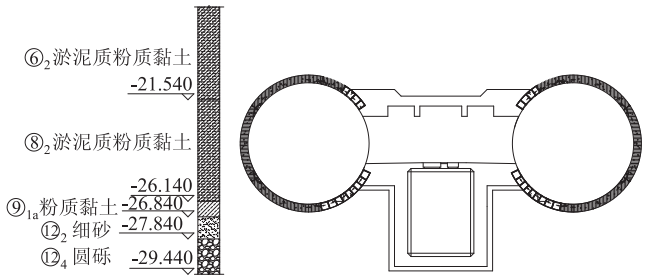


图 1 联络通道结构示意图

水平通道高 4.255 m,宽 4.1 m;喇叭口处高 4.755 m,宽 4.7 m;泵房长 4.6 m(沿联络通道方向),宽 4.1 m,深 4.6 m。初期支护层厚度均为 200 mm;水平通道为直墙圆拱,结构层拱顶厚度为 450 mm,侧墙厚度为 600 mm,底板厚度为 1 000 mm;喇叭口结构层沿周边外扩 300 mm;泵房结构层厚度为 600 mm。

联络通道上覆土层厚度约 20 m,依次为①₃ 砂质粉土、③₂ 砂质粉土、③₃ 砂质粉土夹粉砂、③₅ 粉砂夹砂质粉土、③₇ 砂质粉土、④₃ 淤泥质粉质黏土、⑥₂ 淤泥质粉质黏土。联络通道结构位于⑧₂ 淤泥质粉质黏土,结构底板位于⑨₁ₐ 粉质黏土。泵房结构位于⑨₁ₐ 粉质黏土、⑫₂ 细砂、⑫₄ 圆砾层,结构底板位于⑫₄ 圆砾层。本区⑫₂ 细砂、⑫₄ 圆砾层为承压含水层,实测承压水头高度约 23 m。

本工程水平通道处冻土帷幕厚度为 2.4 m,喇叭口处为 2.1 m,冻土工作温度为 -10℃。

2 数值分析模型的建立

2.1 概况说明

据对称性,建立 1/4 模型,在对称界面约束其法向位移。模型范围内主盾构隧道、联络通道及泵房的初

支和二衬结构、连接段的喇叭口均按设计图纸具体细部尺寸考虑。河床以上静水压力以附加面荷载施加,承压水头也以附加面荷载作用在承压含水层顶板和底板界面处。为弱化边界效应,模型横向自主盾构隧道向外延展 2.5 倍隧道直径,纵向自冻结壁向外延展 3 倍冻土帷幕半宽,竖向自承压含水层底板向下延展 5 m,总的模型尺寸为 25 m×20 m×50 m。采用空间 8 节点六面体单元进行离散,共划分 104 151 个单元。模型如图 2 和图 3 所示。

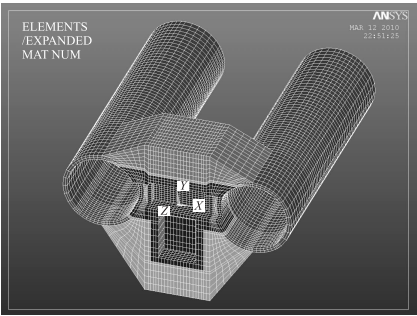


图 2 模型示意图(已对称扩展,周边土体未显示)

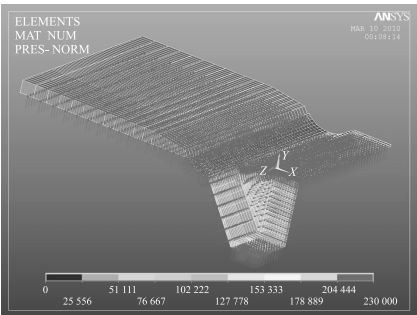


图 3 冻土帷幕形成后承压水作用边界示意图

2.2 计算参数

据本工程地质勘查报告,材料参数取值如表 1 所示。

表 1 材料计算参数

| 层号 | 名称 | 重度 /(kN/m) | 弹性模量 /MPa | 泊松比 |
|-----|---------|---------------|--------------|------|
| ①₃ | 砂质粉土 | 18.7 | 31 | 0.30 |
| ③₂ | 砂质粉土 | 18.8 | 26 | 0.32 |
| ③₃ | 砂质粉土夹粉砂 | 18.1 | 32 | 0.30 |
| ③₅ | 粉砂夹砂质粉土 | 19.0 | 25 | 0.32 |
| ③₇ | 砂质粉土 | 18.7 | 20 | 0.35 |
| ④₃ | 淤泥质粉质黏土 | 17.6 | 9 | 0.40 |
| ⑥₂ | 淤泥质粉质黏土 | 17.7 | 9 | 0.40 |
| ⑧₂ | 淤泥质粉质黏土 | 17.5 | 9 | 0.40 |
| ⑨₁ₐ | 粉质黏土 | 19.9 | 20 | 0.35 |
| ⑫₂ | 细砂 | 19.6 | 33 | 0.30 |
| | 初期支护 | 25.0 | 25 000 | 0.20 |
| | 管片和衬砌 | 25.0 | 35 500 | 0.15 |

据室内热物理力学性质试验结果,并参考类似地层冻结工程实测反馈数据,冻土参数选取如下:⑥₂、⑧₂ 淤泥质粉质黏土弹性模量 90 MPa,泊松比 0.25;⑨_{1a} 粉质黏土弹性模量 120 MPa,泊松比 0.22;⑫₂ 细砂层、⑫₄ 圆砾层弹性模量 150 MPa,泊松比 0.20。

考虑到冻土体积膨胀率与土层类别、天然含水量、水分补给条件、初始应力、周边结构约束和冻结参数等众多因素相关,分别选取 1%、2%、4%、6% 进行比较计算。施工过程中可通过监测数据(主要是变形),对比数值分析结果,反馈实际的冻胀率,以此为条件获得其他方面的信息。为表达方便,后续分析如无说明,一般为 4% 冻胀率条件的计算结果。

2.3 计算流程及模拟手段

- 根据实际施工过程,按以下流程进行分阶段模拟:
- (1) 计算初始地应力场;
 - (2) 对预定冻结范围实施冻结,改变承压水作用边界;
 - (3) 打开管片,开挖联络通道,刷大喇叭口,同步施作初期支护;
 - (4) 施作联络通道范围内衬砌,继续向下开挖泵房,同步施作初期支护;
 - (5) 施作泵房范围内衬砌;对冻结体升温,并考虑融沉补偿注浆。

初始地应力场生成按重力加载完成,并通过回代同步生成的初应力文件消除初始位移。

冻结施工以热应力间接耦合方法模拟。计算分两步实施:首先进行稳态热分析,即指定模型边界和冻结管周边的温度边界条件及模型中各部分的导热系数,获得维护冻结工况下的地层温度分布;随后转入结构分析,按照预先定义的不同温度条件下各材料参数,进行热应力分析,得到由于冻结而产生的附加位移场和应力场。

多步开挖与结构施作过程的实施利用有限元中单元生死技术。

融沉的计算同样依靠热应力间接耦合方法。实际施工中,随着解冻的过程会同步辅以注浆以补偿由于冻土融化而产生的体积收缩,为考虑不同的注浆实施效果,以不同的最终体积收缩率来模拟,即通过控制最终的升温幅度,等效地实现这一过程。

3 数值分析结果

3.1 冻结施工分析

本工程设计冻土强度指标为:抗压强度 3.56 MPa,抗折强度为 2.30 MPa,抗剪强度为 1.50

MPa。根据 DG/TJ 08 - 902 - 2006《旁通道冻结法技术规程》中的要求,冻土帷幕强度检验安全系数须满足:抗压不小于 2.0,抗折不小于 3.0,抗剪不小于 2.0。

在考虑了 23 m 承压水头的情况下,以 4% 的冻胀率计算得到积极冻结完成后冻土帷幕压应力分布如图 4 所示。可见除帷幕与主隧道接触处局部很小范围压应力达到 2.05 ~ 2.27 MPa 外(此值的出现还须考虑隧道管片与周边土体的刚度差异对节点结果的影响,可忽略不用),大部分区域压应力在 0.31 ~ 1.83 MPa 之间。

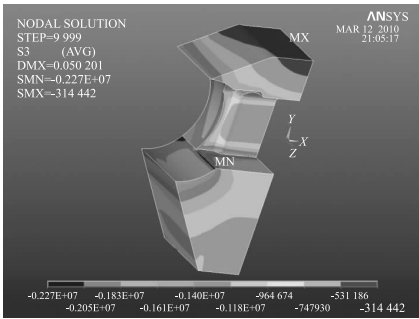


图 4 积极冻结后冻土帷幕压应力分布图

拉应力与剪应力的分布也有类似的规律,如表 2 所示。

表 2 积极冻结后冻土帷幕应力分析

| 应力 | 设计值/MPa | 最大值/MPa | 安全系数 |
|-----|---------|---------|------|
| 压应力 | 3.56 | 1.83 | 1.94 |
| 拉应力 | 2.30 | 0.15 | 15.3 |
| 剪应力 | 1.50 | 0.82 | 1.83 |

由于冻胀力的作用,冻结完成后主盾构隧道呈斜椭圆状,如图 5 所示。隧道中心水平外移 26.5 mm,垂直上抬 16.3 mm,长轴较初始直径伸长了约 6.2 mm,最大绝对变形发生在靠近冻土帷幕的右下弧段(如图 5 所示),约为 39.7 mm。

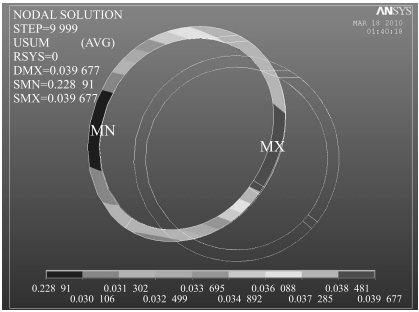


图 5 积极冻结后主盾构隧道变形图

由于两侧隧道的约束作用,冻土帷幕总体呈反弯状变形,如图 6 所示。冻土帷幕横向挤压主盾构隧道,量值为 4.5 mm,上边界竖向变形为 8.2 mm,下边界变

形为 5.1 mm。

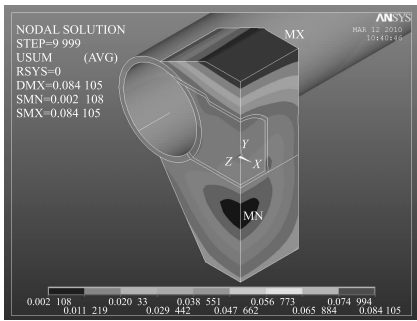


图 6 积极冻结后冻土帷幕变形图

由上述结果可知,冻胀力对帷幕自身和主盾构隧道的影响是比较显著的。施工中应考虑在积极冻结阶段实施低温快速冻结,以加快推进冻结锋面,减少土体中水分迁移量,同时合理布设卸压孔数量和位置,弱化土体冻胀程度。主盾构隧道内预应力支架应确保及时发挥作用,保持隧道真圆度。另外可考虑对联络通道位置前后至少 3 环管片及其防水装置进行特别加强设计,增强其对冻胀变形的抵抗能力。

3.2 暗挖施工分析

联络通道和泵房相继开挖后,土体内部应力得到释放和重新调整,冻土帷幕安全系数有所降低,如表 3 所示。

表 3 开挖后冻土帷幕应力分析

| 应力 | 联络通道开挖后 | | 泵房开挖后 | |
|-----|---------|------|---------|------|
| | 最大值/MPa | 安全系数 | 最大值/MPa | 安全系数 |
| 压应力 | 1.90 | 1.87 | 1.96 | 1.82 |
| 拉应力 | 0.39 | 2.90 | 0.78 | 2.95 |
| 剪应力 | 1.06 | 1.52 | 1.49 | 1.01 |

通过观察应力云图(因篇幅原因,各项应力云图不再贴出)可以发现,开挖后压应力分布总体变动不大,仍是在冻土帷幕与主盾构隧道连接处局部小范围集中;但是联络通道拱顶和泵房底部角点位置拉应力有较大增长,同时泵房底板与侧壁连接处剪应力局部达到 1.90 MPa,说明这些位置为体系的薄弱点,施工时应加以特别考虑,或予以加强或在保证支护跟进的前提下加快施工进度,控制围岩应力的释放程度。

需要注意的是,本次计算没有考虑及由于初支和围岩不可能完全密贴产生的松弛以及冻土体自身的流变效应,各项应力的变化有可能高于表 3 中所述,这就要求施工方密切关注监测结果,预先采取有针对性的措施。

联络通道及泵房相继开挖后,初期支护的变形量值在 30 mm 内,分布较为均匀。由于开挖卸荷,主盾构隧道向联络通道位置恢复了大部分的冻胀变形,并有一定程度的纵向弯曲和扭转,如图 7 所示。主盾构

隧道开口处变形比较剧烈,可考虑开挖前将钢管片内侧接缝焊接并用混凝土填充格仓以协同受力。

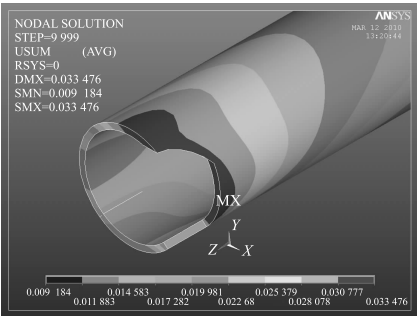


图 7 泵房开挖后主盾构隧道总体变形图

图 8 和图 9 分别为联络通道开挖后和泵房开挖后初期支护的拉应力分布。可见开挖之后,喇叭口与中间段衔接的扩大部分初期支护出现较大程度的应力集中,但范围很小;拉应力在底板处均值较高,约为 11.5 ~ 19.4 MPa,且中间部位略高于两侧。泵房初期支护拉应力最大位置不在底板处,而是在侧壁中间部位,量值在 5.1 ~ 19.2 MPa 之间,这应当是侧壁处冻土帷幕较薄所致。若以 18 号槽钢步距 0.5 m 的初期支护条件来校核,其最大拉应力 $\sigma = 362 \text{ MPa} > [\sigma] = 235 \text{ MPa}$,不满足强度要求,应考虑加强。

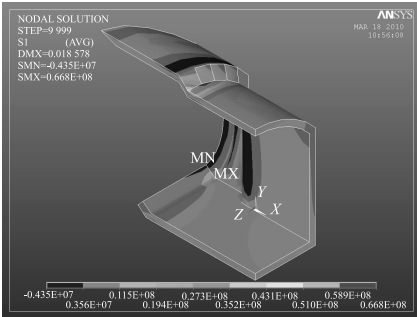


图 8 联络通道开挖后初期支护拉应力分布图

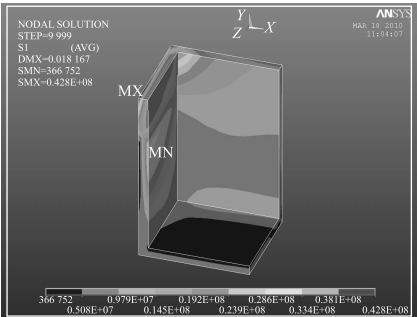


图 9 泵房开挖后初期支护拉应力分布图

3.3 工后融沉分析

自然融化是一个缓慢的过程,而且融沉量较大,处理难度大,因此在实际施工中往往采取高温强制解冻

的方式,并在解冻期间及解冻后沉降尚未稳定期间进行注浆控制,对融沉量进行补偿。

若完全不考虑注浆填充的作用,由于融沉而引起的结构附加竖向变形如图 10 所示。主盾构隧道隧底变形最大,为 23.5 mm;联络通道整体下沉约 12.0 mm;泵房部分变形量较小;在联络通道与主盾构隧道相交处有较大的变形梯度。结构在其他两个方向上的变形比较均匀,不再赘述。

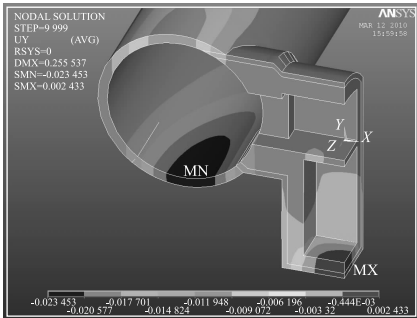


图 10 融沉引起的结构附加竖向变形(未注浆)图

若分别考虑 60% 和 80% 的注浆填充效果,主盾构隧道最大竖向变形分别为 10.9 mm 和 5.6 mm,分别较不注浆降低了 53% 和 76%;联络通道最大竖向变形分别为 4.6 mm 和 2.3 mm,分别较不注浆降低了 61% 和 81%;可见通过补偿注浆措施,可有效地减小结构的最大变形量和差异变形。

从控制工后融沉的措施来看,首先应在冻结阶段采取低温快速冻结的方法,从源头上减少可融沉量;其次可考虑增设注浆孔、预估融化速度随时补充注入。为增加可注性,初期可采用粘土水泥浆,补注时再采用水泥浆或水玻璃浆。每一注浆段应先下部后上部,使浆液逐步扩散,提高充填效果。

3.4 不同冻胀率对比

如前所述,冻胀率的大小对冻土帷幕的稳定性、主盾构隧道的变形、初期支护的内力与变形均起着主控因素的作用,同时该值的大小影响因素众多,数值分析中难以取得合乎实际的大小,因此这里分别按 1%、2%、6% 的冻胀率补充计算,以冻土帷幕的稳定性和主盾构隧道的变形为分析对象,如表 4 和表 5 所示。

表 4 不同冻胀率下冻土帷幕应力分析

| 工况 | 冻胀率 /% | 压应力 | | 拉应力 | | 剪应力 | |
|---------|-----------|---------|------|---------|-------|---------|------|
| | | 最大值/MPa | 安全系数 | 最大值/MPa | 安全系数 | 最大值/MPa | 安全系数 |
| 积极冻结后 | 1 | 0.47 | 7.57 | 0.04 | 57.50 | 0.21 | 7.14 |
| | 2 | 0.90 | 4.00 | 0.08 | 28.75 | 0.44 | 3.41 |
| | 4 | 1.83 | 1.94 | 0.15 | 15.30 | 0.82 | 1.83 |
| | 6 | 2.77 | 1.29 | 0.22 | 10.45 | 1.22 | 1.23 |
| 联络通道开挖后 | 1 | 0.39 | 9.13 | 0.08 | 28.75 | 0.22 | 6.82 |
| | 2 | 0.91 | 3.91 | 0.18 | 12.78 | 0.52 | 2.88 |
| | 4 | 1.90 | 1.87 | 0.39 | 5.90 | 1.06 | 1.52 |
| | 6 | 2.91 | 1.22 | 0.61 | 3.77 | 1.97 | 0.76 |
| 泵房开挖后 | 1 | 0.40 | 8.90 | 0.14 | 16.43 | 0.33 | 4.55 |
| | 2 | 0.92 | 3.87 | 0.26 | 8.85 | 0.71 | 2.11 |
| | 4 | 1.96 | 1.82 | 0.78 | 2.95 | 1.49 | 1.01 |
| | 6 | 2.97 | 1.20 | 1.21 | 1.90 | 2.11 | 0.71 |

表 5 不同冻胀率下主盾构隧道变形

| 工况 | 冻胀率 /% | 沿联络通道 方向最大变 形/mm | 竖向最大 变形 /mm | 沿主盾构隧 道方向最大 变形/mm | 总最大 变形 /mm |
|------------------------|-----------|------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|
| 积极 冻结后 | 1 | -8.4 | 5.5 | 0.4 | 9.2 |
| | 2 | -16.2 | 10.9 | 0.8 | 19.6 |
| | 4 | -33.4 | 22.1 | 1.8 | 39.7 |
| | 6 | -50.6 | 33.7 | 2.9 | 60.3 |
| 联络通道 开挖后 (相对冻结后) | 1 | 6.9 | -3.0 | -0.4 | 8.1 |
| | 2 | 15.1 | -6.3 | -1.5 | 15.9 |
| | 4 | 31.0 | -13.1 | -3.5 | 31.0 |
| | 6 | 46.9 | -20.1 | -5.7 | 47.3 |
| 泵房开挖后 (相对冻结后) | 1 | 7.7 | -3.2 | -0.4 | 8.3 |
| | 2 | 15.2 | -7.6 | -1.1 | 16.8 |
| | 4 | 31.4 | -15.6 | -2.4 | 33.5 |
| | 6 | 47.7 | -24.0 | -3.8 | 51.1 |

据上述结果可合理推断,当冻胀率控制在 3% 左右时,冻土帷幕各项应力可满足《旁通道冻结法技术规程》的要求,初支的内力也可验算通过。在实际施工中,可以根据变形监测反馈的信息,比较表 5 的结果,推定实际的冻胀率,继而预先了解关于冻土帷幕和初期支护其他方面的信息,采取有针对性的准备措施,确保工程安全。

4 结论

(1)冻胀力对冻土帷幕自身和主盾构隧道影响显著,施工时应考虑实施低温快速冻结以减轻冻胀程度,联络通道位置前后约 3 环管片及其防水装置应加强

设计。

(2)联络通道和泵房相继开挖后,冻土帷幕抗拉、抗剪安全系数大幅降低。联络通道拱顶位置和泵房底部与侧壁连接处是薄弱点,施工时应予以特别注意。

(3)开挖之后,喇叭口与水平通道衔接段初期支护应力集中;底板处拉应力均值较高,且中间部位略高于两侧;受冻土帷幕厚度影响,泵房初期支护拉应力最大位置不在底板处而是在侧壁中间部位。

(4)通过补偿注浆措施,可有效地减小结构的最大变形量和差异变形,操作时应采取综合措施保证有效填充度。

(5)当冻胀率控制在3%左右时,冻土帷幕稳定性和支护结构安全可以得到保证。实际施工时,可根据变形监测来反馈推定实际冻胀率,做到预先有所掌握。

参考文献:

- [1] 岳丰田,仇培云,杨国祥,等.复杂条件下隧道联络通道冻结施工设计与实践[J].岩土工程学报,2006,28(5):660-663.
YUE Fengtian, QIU Peiyun, YANG Guoxiang, et al. Design and Practice of Freezing Method Applied to Connected Aisle in Tunnel under Complex Conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5):660-663.
- [2] 罗俊成,史海鸥,徐兵壮,等.长距离水平冻结法在广州地铁中的应用与实践[J].现代隧道技术,2002,39(4):22-26.
LUO Juncheng, SHI Hai'ou, XU Bingzhuang, et al. Application of Horizontal Ground Freezing Method to Guangzhou Metro [J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(4):22-26.
- [3] 肖朝昀.人工地层冻结冻土帷幕形成与解冻规律研究[D].上海:同济大学,2007.
XIAO Chaojun. Research on the Forming and Thawing of Frozen Soil Walls by Artificial Ground Freezing Method [D]. Shanghai: Tongji

University, 2007.

- [4] 蔡海兵,程桦,彭立敏,等.地铁双线隧道水平冻结位移场的模型试验[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):2088-2095.
CAI Haibin, CHEN Hua, PENG Limin, et al. Model Test on Displacement Field of Double-route Metro Constructed with Horizontal Freezing Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10):2088-2095.
- [5] 李磊,郭红波,丁季华,等.地铁隧道联络通道冻结法施工三维温度场及性状分析[J].上海大学学报(自然科学版),2006,12(6):641-646.
LI Lei, GUO Hongbo, DING Jihua, et al. Three-dimensional Temperature Field and Behavior Analysis of Freezing Method Applied to Connecting Passage of Metro Tunnel [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2006, 12(6):641-646.
- [6] 张志强,何川.用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3211-3217.
ZHANG Zhiqiang, HE Chuan. Study on Construction of Cross Connection of Shield Tunnel and Connecting Aisle by Freezing Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18):3211-3217.
- [7] 武亚军,杨敏,李大勇.大连路隧道联络通道冻土帷幕数值分析[J].岩土力学,2006,27(3):487-490.
WU Yajun, YANG Min, LI Dayong. Numerical Analysis of Freezing Soil Curtain of Tunnel Connected Aisle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3):487-490.
- [8] 李大勇,吕爱钟,张庆贺,等.南京地铁旁通道冻结实测分析研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(2):334-338.
LI Dayong, LV Aizhong, Zhang Qinghe, et al. Analysis of Freezing Method for Construction of Connected Aisle in NanJing Metro Tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2):334-338.

(编辑:赵立红 白雪)