文章编号:1005-0523(2011)06-0017-07

复杂地层内地铁联络通道冻结施工冻胀控制研究

季 昌,许 恺,贾 煜

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:针对地铁联络通道冻结施工时常面临的冻胀过大且冻胀率较难测定的施工难题,依托杭州某复杂地层内越江隧道联络通道冻结施工实例,采用数值分析不同假定冻胀率对冻土体内力和主隧道变形的影响,通过冻土体内力变化制定出冻土体的临界冻胀率,同时对主隧道竖向变形进行监测,并结合主隧道计算竖向变形反馈出实际冻胀率,最后根据实际冻胀率和临界冻胀率的比较,采取相应施工措施。研究结果表明:此类地层联络通道冻结施工时,冻土体临界冻胀率为2%,可采用可观测的主隧道竖向变形监测来反馈冻土体的实际冻胀状态,当冻结和暗挖阶段主隧道竖向变形量分别小于7.5 mm和4.88 mm时,实际冻胀率为1%~2%,冻胀对冻结效果的影响尚在可控范围内,故除常规泄压孔减胀措施,无需再采用加强减胀措施。

关键词:冻结法;联络通道;冻胀率;三维数值模拟;监测

中图分类号:U456;TU472.9 **文献标志码**:A

自人工冻结法于1883年成功应用于阿尔巴里德煤矿深103 m的9号井凿井工程后,在此后1个多世纪里,其被国内外不同国家广泛应用于煤矿、隧道、建筑基础和地铁等领域,而在地铁联络通道施工中,对于强度低、自稳性差、含水量高的软土地层,采用冻结加固是行之有效的方法,据不完全统计,上海地铁98%的联络通道和全部越江隧道联络通道及泵站均采用冻结法施工[1]。

人工冻结土体过程是包括冰水相变、潜热释放和水分迁移的时变和相变的物理力学问题,而联络通道冻结法施工时,常面临成孔偏斜超限、冻结冻胀过大[2]、开挖蠕变、融沉过大等问题,其中以由水分迁移引发的土体冻胀对冻结效果的影响最为突出,如上海复兴东路隧道某联络通道因冻胀应力过大,通道开挖后冻土体变形过大,冻结管断裂,影响冻结效果[2]。

众多学者对联络通道的人工冻结冻胀问题进行了研究,岳丰田等[3]依托大连路隧道联络通道工程进行室内原状土冻结的模型试验,土层为强度较低、稳定性较差的淤泥质粘土和粉质粘土,试验得到有荷条件下冻土体达到设计厚度时冻胀率为0.76%;仇培云等[4]对大连路隧道联络通道附近主隧道竖向变形进行跟踪监测并得出隧道变形在冻结初期缓慢发展且有波动,交圈过程迅速上升并达最大,且后续下降的结论;陈沙,杨文武等[5]依托崇明长江隧道联络通道工程采用FLAC3D对冻结过程进行三维力学分析,联络通道所在土层为灰色砂质粉土,得出随着冻土体的冻胀率增大,冻土体应力相应增加,假定冻胀率不超过6%时,冻土体计算强度值均小于设计值。

国内对联络通道冻结体冻胀问题的现有研究多集中于室内试验、数值模拟和现场监测的手段,此3种研究手段各有优势和不足,室内模型实验可定性反映冻胀变化,但由于和实际状态的差异性,较难得出冻土体实际冻胀状态;现场监测虽能得到冻胀压力和主隧道的变形规律,但无法直接对冻土体的实际冻胀状态进行定量判断;而数值模拟的准确性受制于参数的取值和模拟方法的选取。同时现有研究尚未给出联络通道实际冻结施工时能定量判断冻土体冻胀状态的有效方法,而由于联络通道冻结加固施工自身存在较大的风险,尤其当联络通道周边地层为复杂地层时,施工风险更大,若能定量判断冻土体冻胀状态,则能更好地控制冻结效果。

收稿日期:2011-08-10

作者简介:季昌(1987—),男,硕士研究生,研究方向为铁道工程。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以国内某越江隧道复杂地层条件下联络通道冻结加固的工程实例为背景，发挥室内试验、数值模拟和现场监测3种研究手段各自优势，首先对联络通道所在土层分别进行室内冻土试验测定其特性和强度，为数值模拟所用参数提供依据；并通过ansys建立三维有限元模型，根据规范规定的联络通道周边冻土体冻胀率范围[6]，分析不同假定冻胀率对冻土体内力和主隧道变形的影响，通过冻土体内力设计值与实际值的差值（即实际安全系数）与规范规定的安全系数[7]对比结果制定出冻土体临界冻胀率；同时对冻结法施工各阶段主隧道变形进行监测，结合主隧道计算变形量反馈出冻土体的实际冻胀率，最后将临界冻胀率与实际冻胀率进行比较，实际冻胀率超出临界冻胀率时，加强减胀措施来减小冻胀，控制冻结效果。

1 工程背景介绍

杭州某越江隧道主隧道外径6.2 m、内径为5.5 m，左右线通道中心标高均为−23.522 m，左右两侧主隧道中心距离为12 m，联络通道由喇叭口、水平通道和通道下方的泵房3部分组成，联络通道结构从外到内主要由支护层和结构层组成，联络通道的开挖轮廓高（外放约100 mm）4.455 m，宽4.3 m，局部喇叭口处高5.895 m，宽4.9 m，；泵房开挖轮廓约长4.6 m（沿联络通道方向），宽4.1 m，深4.6 m，如图1所示。

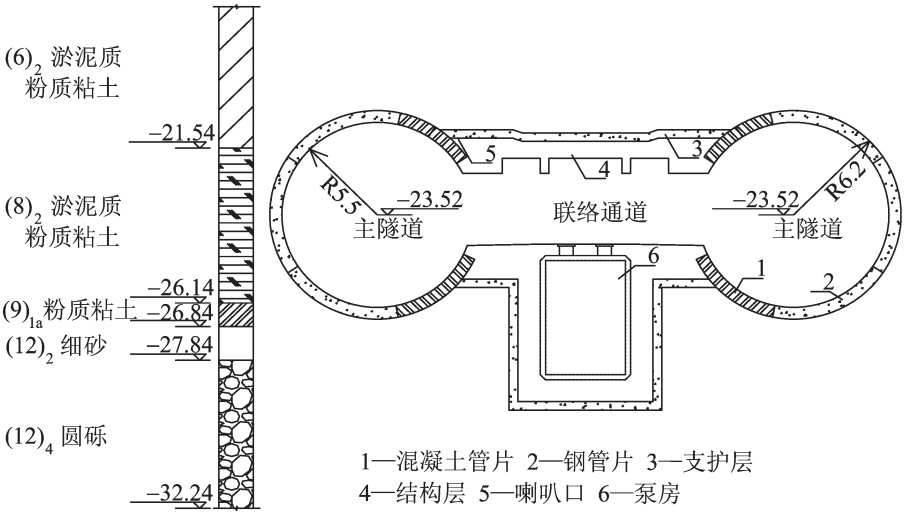


图1 联络通道纵剖面示意图（单位：m）

Fig.1 Longitudinal section of connected aisle (Unit: m)

联络通道所在土层主要为$(1)_2$淤泥质粉质粘土、$(9)_{1a}$粉质粘土、$(12)_2$细砂和$(12)_4$圆砾层，粉砂层和圆砾层均为承压水层，水头为0.23 MPa，而圆砾层所含圆砾直径为0.2～2 cm，含量占30%～40%，所含卵石粒径2～6 cm为主，含量20%～30%，圆砾层渗透系数大、强度较高、压缩性低；联络通道上部的淤泥质粉质粘土渗透系数小、强度较低、压缩性高，如表1所示。

表1 联络通道周边土层物理力学性质

Tab.1 Physical and mechanical properties of soil around connected aisle

联络通道所在土层	含水率/%	密度/g·cm^{-3}	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	渗透系数/cm·s^{-1}
$(8)_2$ 淤泥质粉质粘土	40.6	1.75	16.7	12.8	2.89	10^{-8}
$(9)_{1a}$ 粉质粘土	25.7	1.99	34.7	19.1	6.79	10^{-7}
$(12)_2$ 细砂	23.2	1.96	3.3	32.8	10.82	10^{-3}
$(12)_4$ 圆砾	饱和、中密~密实、天然极限抗压强度取130 MPa、渗透系数较大					

由图1和表1可知，联络通道区域上部土层为$(8)_2$淤泥质粉质粘土、下部土层为$(12)_2$细砂和$(12)_4$圆砾，属于典型的上软下硬复杂地层，下部的$(12)_2$细砂和$(12)_4$圆砾层渗透系数较大，承压水头较高。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　联络通道所处地层室内冻土试验

由于联络通道周边土层冻结加固后所形成的冻土体为复杂的四相体系,与未冻土的性质差异较大,为较准确地给定数值模拟所需的地层参数,对联络通道所处地层进行室内冻土试验,测定冻土特性和强度。

冻土体试验温度对结果影响较大,因为随温度降低,冰晶含量相对增多,冰土混合物强度提高,使冻土强度呈非线性规律提高[8],而本工程冻土墙设计平均温度≤–10 ℃,由于试验温度低于–10 ℃条件下冻土的强度要高于试验温度等于–10 ℃条件下相同冻土土样的强度,基于安全考虑,不同地层制成的冻土试样均制备为–10 ℃的冻土土样,如表2所示。

表2　–10 ℃冻土体特性和强度测试结果

Tab.2　Properties of frozen soil under –10 ℃ and strength test result

联络通道周边土层	含水率/%	密度/g·cm^{-3}	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
⑧$_2$淤泥质粉质土	40.60	1.74	3.56	2.30	89.5	0.22
⑨$_{1a}$粉质粘土	26.98	2.03	4.09	2.75	147.9	0.22
⑫$_2$粉砂	24.51	2.10	6.30	3.41	211.7	0.20
⑫$_4$圆砾	18.37	2.44	4.09	3.23	225.5	0.20

由表2可知,在相同外部条件下,⑧$_2$淤泥质粉质粘土的抗压强度与抗拉强度均小于其他土层,分别为3.56 MPa和2.3 MPa,基于安全考虑,将3.56 MPa和2.3 MPa分别作为冻土体抗压强度和抗拉强度设计值,而冻土体抗剪强度设计值按照经验取1.5 MPa,并参考《旁通道冻结法技术规程》[6]III类冻结壁强度检验安全系数规定:抗压不小于2.0 MPa,抗拉不小于3.0 MPa,抗剪不小于2.0 MPa,当冻土体设计强度值与实际强度值比值大于检验安全系数时,冻土体处于安全状态,而其比值小于检验安全系数时,冻土体存在风险。

3　冻胀对冻结效果影响的数值分析

3.1　三维计算模型及参数选取

建立三维有限元模型(如图2~图3所示),在对称界面约束其法向位移,模型总尺寸为25 m×20 m×50 m,采用空间8节点六面体单元进行离散,共计划分104 151个单元。冻土体温度设定为–10 ℃,不同土层的弹性模量和泊松比等计算参数采用冻土特性和强度测试结果,对于主隧道管片结构,选取C50钢筋混凝土参数,而对于联络通道结构,按联络通道设计取值,如表3所示。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。

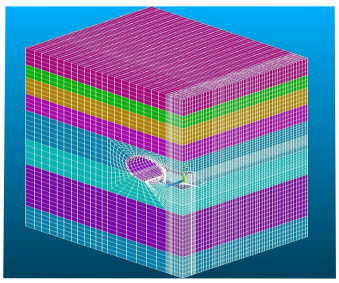


图2　有限元模型总体图

Fig.2　Overall view of FE Model

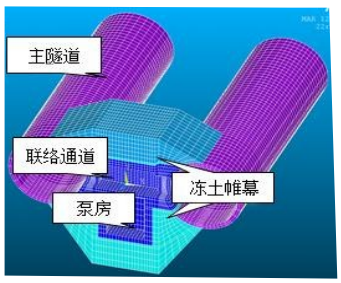


图3　联络通道、冻土帷幕和主隧道细部

Fig.3　Details of connected aisle, curtain of frozen soil and main tunnel

为分析冻胀对冻结效果的影响,采用反应冻胀状态的冻胀率指标,借鉴《建筑地基基础设计规范》[4]关于圆砾、砂土及粘土冻土冻胀率范围的规定,数值计算冻胀率上限考虑为6%,且由于冻胀率小于1%为不冻胀范围,该范围对冻结效果无影响,故冻胀率下限考虑为1%。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

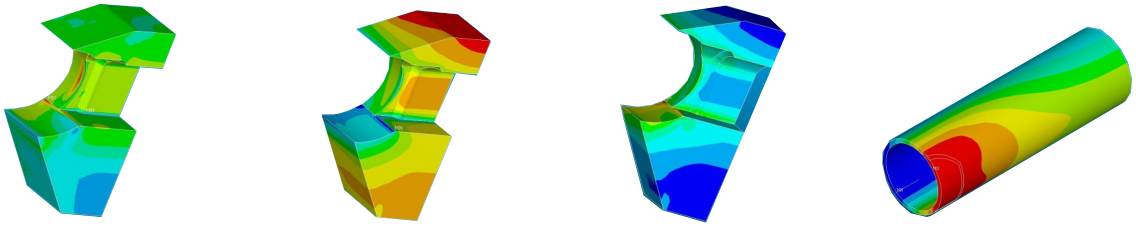
表3 隧道周边地层、主隧道及联络通道的计算参数

Tab.3 Computing parameters of soil around tunnel, main tunnel and connected aisle

联络通道周边土层	重度/kN·m^{-3}	弹性模量/MPa	泊松比
⑧$_2$淤泥质粉质土	1.74	89.5	0.22
⑨$_{1a}$粉质粘土	2.03	147.9	0.22
⑫$_2$粉砂	2.10	211.7	0.20
⑫$_4$圆砾	2.44	225.5	0.20
主隧道	25	34 500	0.18
联络通道	25	25 500	0.22

3.2 计算结果及分析

由于数值计算冻胀率范围为1%~6%,故分别对1%,2%,3%,4%,6%五种不同的冻胀率对主隧道竖向变形和冻土体内力的影响分别进行计算,冻结阶段4%冻胀率对主隧道和冻土体的影响如图4所示。



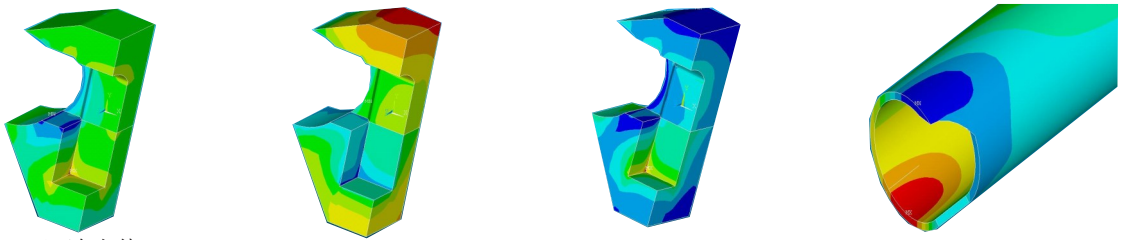
(a) 冻土体 第1主应力(单位:N·m^{-2})　(b) 冻土体 第3主应力(单位:N·m^{-2})　(c) 冻土体 主剪应力(单位:N·m^{-2})　(d) 主隧道 竖向变形量(单位:m)

图4 冻结阶段4%冻胀率对主隧道及冻土体的影响

Fig.4 Effect of 4% frozen-heave rate on main tunnel and frozen soil during freezing stage

在联络通道冻结施工阶段,由图4(a)~4(c)知,冻土体待开挖的水平通道侧墙与主隧道交界位置出现拉应力最大值,达到0.264 MPa,呈明显应力集中,分布范围不大,冻土体大部分区域拉应力小于0.42 MPa;而冻土体待开挖的水平通道拱底和主隧道交界位置出现压应力最大值,达到2.27 MPa,呈明显应力集中,分布范围较小,冻土体大部分区域压应力小于2.05 MPa;冻土体待开挖的水平通道拱底和主隧道交界位置出现剪应力最大值,达到1.12 MPa,呈明显应力集中,分布范围较小,冻土体大部分区域剪应力小于1.08 MPa。而由图4(d)可知,4%冻胀率下主隧道竖向变形最大位置为靠近联络通道位置且与冻土帷幕交界的主隧道侧壁,将竖直向上假定为正方向,隧道竖向变形最大正值为+22.1 mm,主隧道拱底竖向变形量为+12.8 mm,隧道整体有上浮趋势。

分别对1%,2%,3%,4%,6%5种不同的冻胀率对主隧道竖向变形和冻土体内力的影响进行计算,暗挖阶段4%冻胀率对主隧道和冻土体的影响如图5所示。



(a) 冻土体 第1主应力(单位:N·m^{-2})　(b) 冻土体 第3主应力(单位:N·m^{-2})　(c) 冻土体 主剪应力(单位:N·m^{-2})　(d) 主隧道 竖向变形量(单位:m)

图5 暗挖阶段4%冻胀率对主隧道及冻土体的影响

Fig.5 Effect of 4% frozen-heave rate on main tunnel and frozen soil during excavating stage

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在联络通道暗挖施工阶段,由图5(a)~(c)知,泵房外底部角点区域的冻土体出现拉应力最大值,达到1.53 MPa,呈明显应力集中,分布范围不大,冻土体大部分区域拉应力小于1.16 MPa;而泵房外底部底边区域的冻土体出现压应力最大值,达到2.4 MPa,呈明显应力集中,分布范围较小,冻土体大部分区域压应力小于2.18 MPa;泵房外底部角点区域的冻土体也出现剪应力最大值,达到1.9 MPa,呈明显应力集中,分布范围不大,冻土体大部分区域剪应力小于1.53 MPa,剪应力最大值已经超出冻土体设计抗剪强度。而由图5(d)可知,暗挖施工后4%冻胀率下主隧道竖向变形最大位置发生转移,主隧道竖向变形有正有负,竖向变形最大正值在靠近联络通道的主隧道拱底处,最大正值为+7.7 mm。冻结和暗挖不同阶段不同假定冻胀率对主隧道变形和冻土体应力的影响如表4所示。冻结及暗挖阶段不同冻胀率下强度安全系数变化如图6所示。

表4　不同冻胀率对主隧道和冻土体的影响

Tab.4　Effect of different frozen-heave rate on main tunnel and frozen soil

冻胀率/%	联络通道附近隧道拱底竖向变形/mm		冻土体压应力/MPa		冻土体拉应力/MPa		冻土体剪应力/MPa	
	冻结阶段	暗挖阶段	冻结阶段	暗挖阶段	冻结阶段	暗挖阶段	冻结阶段	暗挖阶段
1	4.5	2.7	0.47	0.4	0.04	0.14	0.21	0.33
2	8.3	5.2	0.9	0.92	0.08	0.26	0.44	0.71
3	10.4	6.3	1.37	1.4	0.12	0.5	0.61	0.97
4	12.8	7.7	1.83	1.96	0.15	0.78	0.82	1.49
6	17.1	11	2.77	2.97	1.29	1.21	1.22	2.11

由表4、图6可知,随着假定冻胀率增加,冻土体的应力值均相应增加,且联络通道附近主隧道拱底竖向变形量也随之增大,在3%冻胀率下,冻结和暗挖不同阶段冻土体抗拉和抗压安全系数均小于规范规定的安全检验安全系数,但冻土体暗挖阶段最大剪应力为0.97 MPa,暗挖阶段抗剪安全系数为1.55,小于相应的强度检验安全系数,而在2%冻胀率下,不同阶段的冻土体强度安全系数均大于相应的强度检验安全系数,此时暗挖阶段抗剪安全系数为2.11,略大于抗剪安全系数2,故2%冻胀率为冻土体临界冻胀率。

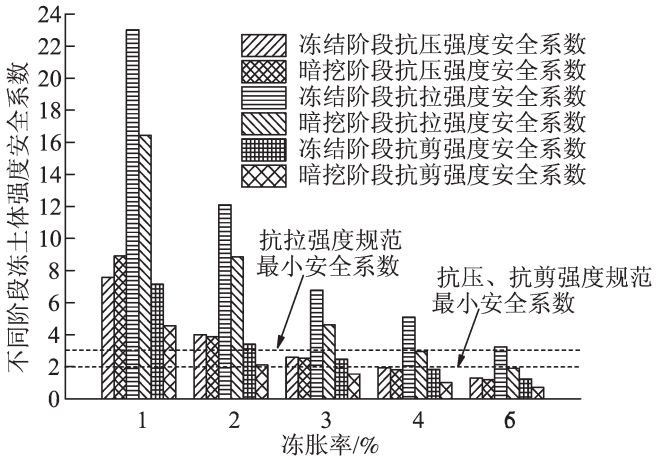


图6　冻结及暗挖阶段不同冻胀率下强度安全系数变化

Fig.6　Variations of strength safety factor under different frozen-heave rates during freezing and excavating stages

4　主隧道竖向变形监测

对联络通道实际施工过程中冻结管成孔、冻结及暗挖不同阶段主隧道竖向变形进行监测,主隧道竖向

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

变形监测点沿着联络通道中心线近似对称分布，相邻监测点相隔2.4~4.8 m，且随着离中心线的距离增加，相邻监测点间距增大，并以联络通道中心线为原点，以此原点沿着掘进方向为正，背离掘进方向为负值，监测点具体布置如图7所示。冻结和暗挖阶段隧道拱底不同测点竖向变形增量如图8所示。

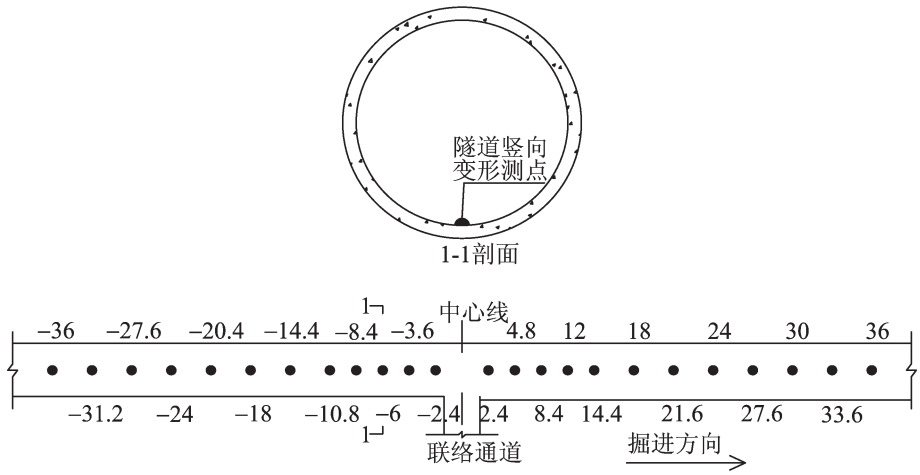


图7 主隧道拱底竖向位移监测布点（单位：m）

Fig.7 Monitoring sites of vertical displcement in arch bottom of main tunnel

为分析冻土体冻胀对主隧道的影响，需剔除成孔施工阶段主隧道的已有主隧道竖向变形量，故两阶段主隧道拱底测点的变形增量分别为冻结阶段、暗挖阶段主隧道竖向变形量与成孔阶段主隧道竖向变形量的差值。由图8可知，冻结阶段和暗挖阶段主隧道拱底测点的竖向变形增量均呈现“距联络通道越近，量值越大”的规律。冻结阶段联络通道附近主隧道测点拱底竖向变形最大增量为+7.5 mm，暗挖阶段联络通道附近主隧道测点拱底竖向变形最大增量为+4.88 mm，且两阶段竖向变形最大值均出现在同一测点，受暗挖阶段联络通道及泵房的开挖卸载作用，联络通道附近测点竖向位移量要小于冻结阶段的变形量，最大差值为2.62 mm。

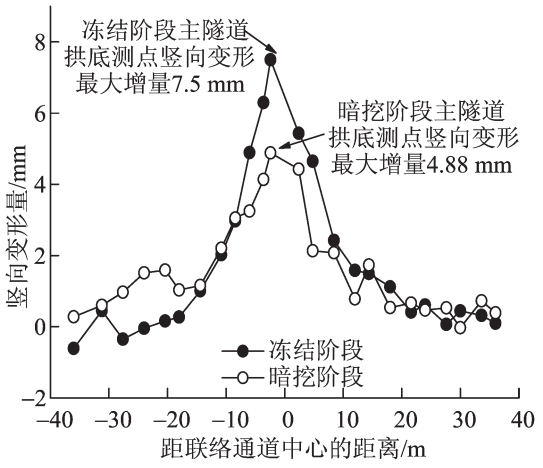


图8 冻结和暗挖阶段隧道拱底测点竖向变形增量

Fig.8 Increment of vertical deformation in arch bottom during freezing and excavating stages

通过冻结和暗挖阶段联络通道附近主隧道拱底竖向变形量+7.5 mm、+4.88 mm与表3计算得出的不同假定冻胀率下主隧道的变形量的对比，可得竖向变形实测值小于2%假定冻胀率下主隧道的变形量，且大于1%假定冻胀率下主隧道的变形量值，故冻土体的实际冻胀率范围为1%~2%，小于临界冻胀率2%。

5 结语

本研究以冻土强度及特性室内试验、数值模拟和现场实测为研究手段，将室内试验所得冻土参数应用于数值计算分析，得出冻土体的临界冻胀率，并根据现场实测主隧道拱底竖向变形量与数值计算结论进行对比，得出冻土体的实际冻胀率，最后通过临界冻胀率与实测冻胀率的对比分析，确定是否在常规减胀措施的基础上，进一步采用加强减胀措施，研究表明：

1）在此类地层进行联络通道冻结施工时，冻土体的临界冻胀率为2%。

2）冻结阶段和暗挖阶段主隧道拱底测点的实测竖向变形增量均呈现“距联络通道越近，主隧道拱底竖向变形越大”的规律，冻土体的实际冻胀率在1%~2%之间，小于临界冻胀率，故除常规泄压孔减胀措施，无

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

需再采用加强减胀措施。

3）在类似地层进行联络通道冻结施工时，采用可观测的主隧道竖向变形监测，反馈冻土体的冻胀状态，若冻结阶段主隧道竖向变形量小于+7.5 mm，且暗挖阶段主隧道竖向变形量小于+4.88 mm，则冻胀对冻结效果的影响尚在可控范围内。

参考文献：

[1] 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. 2007：2.
[2] 王灵敏，王先锋. 冻结法施工越江隧道联络通道工程事故分析[J]. 建筑施工，2005，27(8)：51-53.
[3] 岳丰田，张勇，杨国祥，等. 隧道联络通道冻结位移场模型试验研究[J]. 中国矿业大学学报，2005，34(2)：209-212.
[4] 仇培云，岳丰田，杨国祥，等. 复杂地质条件下隧道联络通道冻结工程实录[J]. 地下空间与工程学报，2005，1(6)：979-982.
[5] 陈沙，杨文武. 联络通道冻结法施工三维力学分析[J]. 隧道建设，2008，28(3)：271-276.
[6] 中华人民共和国建设部. 0007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002：95.
[7] 上海申通轨道交通研究咨询有限公司. DG/TJ08-902-2006 旁通道冻结法技术规程[S]. 上海：上海申通轨道交通研究咨询公司，2006：12.
[8] 崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆，朱元林，译. 北京：科学出版社，1985：160-170.

A Research on Frozen-heave Control of Freezing Method Applied to the Subway Connected Aisle in Complex Strata

Ji Chang，Xu Kai，Jia Yu

（Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education，Tongji University，Shanghai 201804，China）

Abstract：Aiming at the problems that frost heave is excessive and the frozen-heave factor is difficult to measure，which is always encountered in the freezing construction of subway connected aisle，this paper，based on a project case in Hangzhou which applies freezing method to the connected aisle of a cross-river tunnel in complex strata，analyzes the influence of different frozen-heave factors on the internal force of frozen soil and the deformation of main tunnel by numerical analysis. And then，the critical frozen-heave factor is determined according to the internal force change of frozen soil. Simultaneously，combining with calculated value，the monitoring concerning the vertical deformation of tunnel is conducted to give feedback whether the actual frozen-heave factor exceeds the critical one，so the corresponding measures can be taken timely. The findings indicate that the critical frozen-heave factor of frozen soil is 2% in the freezing construction of connected aisle in this type of strata，and the actual frozen-heave state of soil can be reflected by the monitoring of vertical deformation in the main tunnel，which is less than 7.5mm and 4.88mm respectively in the stage of freezing and subsurface excavation when the actual frozen-heave factor keeps between 1% and 2%. Meanwhile，the influence of frost heave on freezing effect can be controlled，so no more strengthening measures for frozen-heave reduction are needed but the conventional measures of relief holes.

Key words：freezing method；connected aisle；frozen-heave factor；three-dimensional numerical simulation；monitoring

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net