

# 上海某隧道人工地层冻结工程现场实测研究

程知言<sup>1</sup>, 邓玲<sup>2</sup>, 周建华<sup>1</sup>

(1. 江苏华东建设基础工程总公司, 江苏 南京 210007; 2. 江苏华都建设有限公司, 江苏 南京 210007)

**摘要:**针对理论研究和冻结工程的实际需要,结合上海某隧道人工地层冻结工程实践,对土体冻结过程中温度、应力、地表变形及土体分层位移进行了现场测试,并分别对测试结果进行了归纳整理和规律性研究;最后综合分析得出了几点结论和看法。

**关键词:**隧道多冷源;人工地层冻结;温度场;应力场

**中图分类号:**U455.49 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2007)08-0067-03

**Site Survey of Artificial Ground Freezing in Tunneling Engineering in Shanghai/CHENG Zhi-yan<sup>1</sup>, DENG Ling<sup>2</sup>, ZHOU Jian-hua<sup>1</sup>** (1. Jiangsu East China Construction Infrastructure Engineering General Company, Nanjing Jiangsu 210007, China; 2. Jiangsu Huadu Construction Co. Ltd, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** According to the requirement of theoretical study and engineering practice, the data of temperature, stress, surface deformation and soil layers displacement are surveyed in situ during the artificial ground freezing of a tunneling engineering in Shanghai, and the data are analyzed and the regularity is studied. At last, several opinions and conclusion are given.

**Key words:** multi-freezing pipes; artificial ground freezing; temperature field; stress field

人工地层冻结涉及传热学、力学等领域的有关知识,冻结过程会对土体产生热、力学及物质转移交换效应<sup>[1,2]</sup>,表征这些效应的参量主要有温度、应力及变形。为了更好的研究和探索软土地层浅覆土盾构隧道冻结加固各参量的耦合变化规律,以更好的指导盾构隧道冻结工程方案设计优化和信息化组织施工<sup>[3]</sup>,同时为冻结技术在今后我国沿海软土地区的应用提供规律及参数,本次现场测试系统主要包括:温度场测试、应力场测试、地表变形及土体分层位移测试。

## 1 工程概况

本工程为某隧道最后一施工段,其两端与原隧道入口相接,里程约为 41.6 m,1 号井处采用 800 mm 厚地下连续墙支护挡土,内衬井壁为 800 mm,进洞口外南北二侧连续墙长度为 6、8 m,覆土厚度由 8.2 m 渐变为 4.2 m,远小于盾构穿过所需的覆土厚度。

施工段地表面填土层厚约 2 m,往下分别为灰黄色粉质粘土、灰色砂质粉土、灰色淤泥质粘土、灰色粘土,盾构基本位于灰色淤泥质粘土层中,工程位于闹市区,地面为主要交通干线,工区范围管网密

布。

结合工程实际,按设计布置了一定数目、不同深度的冻结孔,在进行冻结运转后,形成具有一定厚度、一定强度的临时支护冻土结构以抵抗水、土压力及外部荷载,从而防止土体塌方及沉降变形,同时冻结使得加固区地下水以冰晶体形式存在,不能流动,进而有效解决了地下水排放问题。

## 2 温度场实测研究

### 2.1 测温系统布设

本次测温系统共有测温孔 15 个,其中东区 5 个,中区 5 个,西区 5 个,现以东区为例进行分析,具体见图 1、图 2。

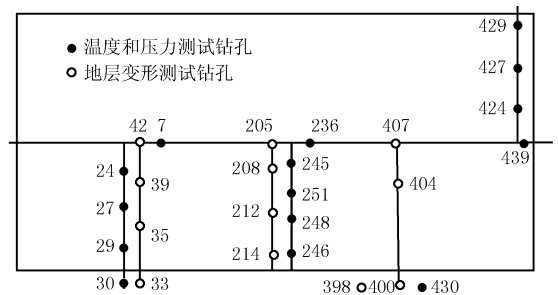


图 1 监测钻孔布设平面示意图

收稿日期:2007-02-27; 改回日期:2007-06-27

作者简介:程知言(1973-),男(汉族),河南商城人,江苏华东建设基础工程总公司副总经理兼总工程师、高级工程师、注册岩土工程师,地质工程专业,博士,从事地基处理、边坡支护、地质灾害治理及低温土体特性研究工作,江苏省南京市大光路 26 号华东大厦,13913925049。

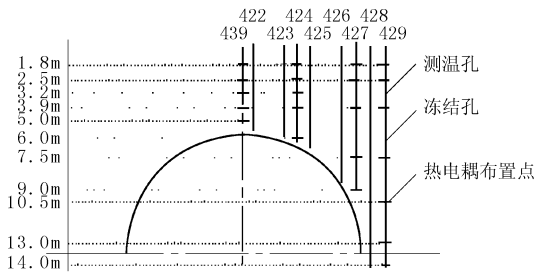


图2 东区温度传感器布置示意图

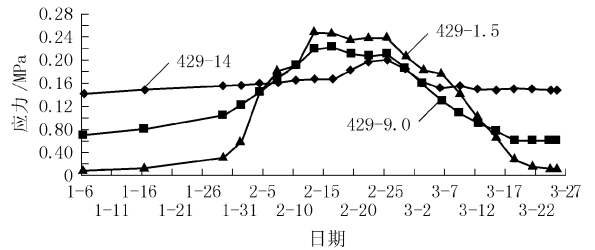


图4 429号监测孔不同深度处应力随时间的变化曲线

### 2.2 实测结果分析

表1为土层不同深度所对应的初始温度,图3揭示了处理区的温度随深度的变化情况。

表1 不同深度土层原始地温

深度/m	平均温度/°C	深度/m	平均温度/°C
-1.8	13.7	-7.5	17.3
-2.5	14.5	-9.0	17.9
-3.2	16.3	-13.0	20.5
-3.8	16.4	-14.0	21.4

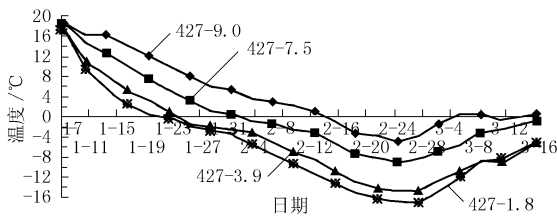


图3 427号监测孔不同深度处温度随时间的变化(东区测点)曲线

### 3 应力场实测研究

#### 3.1 测压系统及布设

压力计布设于测温管上,故平面布设与温度测试一致(见图2)。压力计本身通过连接件固定于测温管上,并随测温管一起下放入土层中。

#### 3.2 实测结果分析

表2为不同深度处初始土体应力,图4揭示了不同深度处土体应力随时间的变化。

表2 初始土体应力沿深度分布

测点深度	应力值/MPa	测点深度	应力值/MPa
1.5	0.0152	6.0	0.06
2.5	0.025	7.5	0.077
3.5	0.0351	9.0	0.093
5.0	0.049	14.0	0.144

由以上图表可得出,冻结应力的变化按时间可分为4个阶段:缓慢发展阶段、迅速发展阶段、维持阶段、减小恢复阶段。按空间分布具有:沿深度方向呈顶部变化小、中部变化大、深部变化小的特点。

### 4 地表变形、地层分层位移和环境地表变形实测研究

地层沉降是隧道工程施工过程的一个重要指标,其直接关系到工程的成败和造价的高低。为全面研究地层变形规律及原理,从而采取有效的手段对其进行预测和控制,本课题将地层变形列为重要研究对象之一,力求通过对地表变形和土体分层位移及环境地表变形的实测对其进行系统的研究。

#### 4.1 地表变形实测研究

##### 4.1.1 变形检测系统及布设

冻结开始前,在地面特征点预设标桩,并测得初始值。为全面了解施工区及周边环境的地表隆起和沉降,本次研究共设立50个测点,具体见图5。

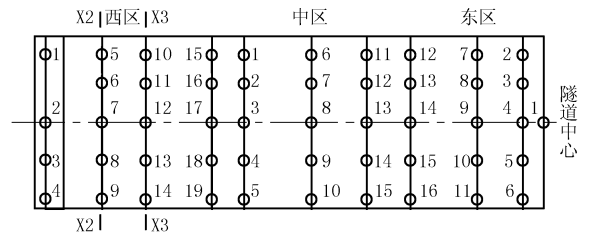


图5 冻结地表变形测点布置图

##### 4.1.2 实测结果及分析<sup>[3]</sup>

图6、7分别反应了沿盾构推进轴线和边线上地表的变形状况。可以看出,在浅覆软土地段应用多冻结管冻结工法进行地层加固条件下的地表变形与通常情况下的盾构施工中由于地层损失产生的变形规律完全不同,该条件下的地表变形完全服从于冻胀融沉规律,本工程地层解冻后未出现地表的大量沉降,主要是由于盾构穿越期间同步注浆和强制解

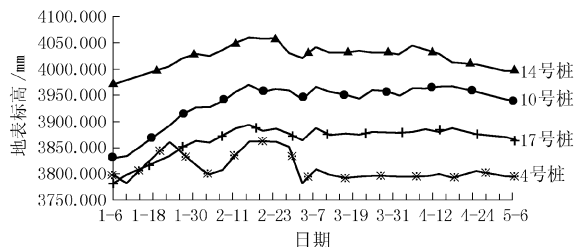


图6 沿隧道轴线上地表变形曲线

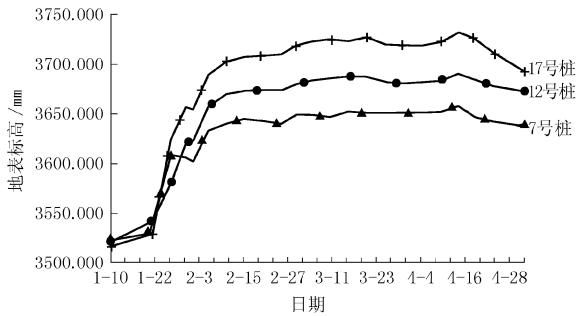


图7 沿隧道边线上方地表变形曲线

冻时的压力注浆对扰动土体起到了有效加固作用。

### 4.2 土体分层位移实测研究

#### 4.2.1 土体分层变形监测系统及布设

监测系统主要由沉降仪探头、导管和一系列感应环组成。安装时,感应环用胶纸缚在导管上,导管下入测孔内后,由于水的浸泡,胶纸自动脱落,感应环与导管分离。此后,感应环在土体的围抱作用下,沿导管随土体一起变形。

#### 4.2.2 实测结果及分析<sup>[3]</sup>

由测试数据可知:在盾构隧道其他辅助工法施工时,地层以沉降为主,而冻结加固时则以冻胀为主,图7中数据均显示,随着土体温度的降低,测孔内各测点感应环均随冻土体体积膨胀有向上位移的趋势,这与地表隆起的规律一致,上升量也相当。如东区7号监测孔2月7号实测一号测点感应环上升114 mm,这与同日与其临近的东区12号地表变形测点测得的地表上升量为135 mm接近;2月29日该测孔1号测点测得的感应环上升153 mm,而同日该点附近地表上升量为154 mm。同一测孔不同深度,会出现上部感应环上升,下部则下降,说明局部地段出现地层压缩。

### 4.3 环境地表变形实测研究

由实测结果可整理得出图8的曲线,曲线反映规律如下:

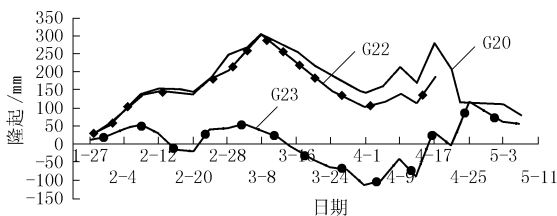


图8 人行道路面地表变形曲线

(1)随着冻土体积的扩大,测桩隆起增大,其中G20与G22点最大隆起量达30 cm左右。

(2)G23(东区影响范围)最大隆起量约为14

cm,东区停机后自然解冻沉降逐渐加大,累积最大沉降量达11 cm。

(3)强制解冻后,紧接着进行注浆,每孔注浆重复3次直至冒浆为止。在注浆充填、压密的作用下,原正在沉降的地面再度隆起。如东区于4月2日至4月5日的注浆引起G20变形曲线陡升;另外,中区4月1日至3日的注浆也造成G21至G23变形的曲线回升,并接近峰值。

图8为人行道路面地表变形,由于人行道上的地表变形测点布设较晚,3月下旬才开始监测,故曲线只能反映一种相对的变形趋势。当东区自然解冻,3月23日又开始进行强制解冻时,L1至L4各测点均在沉降,而在强制解冻后,4月初的地层注浆,又使得地表逐渐隆起,4月15日相对变形达20 cm, L5设于西区影响区内,其相对变形较中区和东区附近的测点变形为小。

## 5 结论

通过对该人工地层冻结加固工程现场温度、应力、地表变形、地层分层位移及环境地表变形的实测研究,综合分析得出如下结论。

(1)从冻结加固体的温度场、应力场变化及地表变形、地层分层位移和环境影响范围来看,冻结工法对上海软土地层浅覆土盾构隧道加固在技术上是可行的,且效果明显。

(2)和常规的压力注浆、地下连续墙及深层搅拌水泥土桩等辅助工法相比,冻结法不仅具有结构均匀、整体性强、强度高和止水效果好等一般优点,而且还有对地层的适应性强,冻结方式灵活、易调节等独有的优点。

(3)上海软土地层冻结过程中温度、应力场与冻结管供冷状况相互干涉、耦合。

温度场的变化规律是:时间上,冻结开始阶段,土体呈现普遍降温,孔隙水结冰量少,温度变化呈线性下降,此后,由于水分迁移及分凝冰的形成,大量冷量用于中和相变潜热,温度曲线下降缓慢,几乎平行于时间轴;空间上,沿冻结管纵向,上部温度降低低、下部高,沿水平面,则加固区内温度低、外缘高。

应力场变化规律是:时间上,冻结开始阶段土体应力变化缓慢,局部甚至出现下降,随后应力发生突变,70%以上的应力变化发生在该阶段,随后应力变化趋于稳定,不同区域、不同深度水平各阶段持续时间不同,但均与温度变化趋势一致;空间上,也存在

(下转第72页)

由表3可以看出:超挖点数量相同的情况下,随着超挖点高度的增加拱顶竖向位移及侧墙水平内敛位移增加明显,塑性区位移随超挖高度的增加递增明显,尤其是超挖部位最大最小主应力差值变化明显,超挖产生的洞周应力集中使围岩发生破坏的趋势变大,但超挖高度较小时(20~30 cm)对围岩的位移和塑性区同无超挖时对比产生影响较小,文中算例中的中硬岩20 cm的单元超挖高度可作为Ⅲ类围岩的容许超挖高度。从表3可以看出:计算工况为超挖高度60 cm时围岩塑性区范围分布,在洞周超挖部位的单元产生了明显的塑性变形,最易造成洞室围岩的局部破坏。大尺寸的点超挖通常发生在节理发育的围岩中,为避免超挖单元高度对围岩稳定性的影响,常采用弱爆破的方法尽可能减少对围岩的扰动造成大尺寸超挖。

#### 4.3 超挖数量不同条件下的计算结果

表4是随机分布在洞室拱顶超挖点数量(超挖百分比)不同条件下的计算结果。

表4 不同超挖数量条件下的位移及应力

拱顶超挖/%	拱顶最大位移/m	侧墙最大位移/m	塑性区最大位移/m	第一主应力/Pa	第三主应力/Pa
0	0.018729	0.001272	0.001122	0.119E+7	570356
10	0.018728	0.001269	0.006930	0.732E+7	579440
20	0.018737	0.001285	0.007190	0.907E+7	269548
40	0.018746	0.001299	0.004849	1.161E+7	574207
50	0.018753	0.001321	0.007824	2.410E+7	677171

由表4可以看出:随着超挖个数的增加应力集中程度加大,应力影响范围和塑性区随超挖数量增加明显加大,超挖单元数占拱顶单元数量的10%时,拱顶下沉和侧墙的内敛位移变化不大,只在超挖部位的第一主应力变化明显,塑性位移增加。超挖单元数量增加到40%~50%时,主应力差值变大,塑性分布区域变大,最大塑性位移发生在超挖部位,但侧墙内敛位移变化较小,说明计算中只考虑在拱

顶分布超挖单元时,对洞室拱顶的影响最大。

## 5 结论

(1)不同超挖部位对洞室的影响只考虑了超挖高度40 cm的工况,计算结果表明,超挖的塑性区影响范围只在洞径的1.5倍范围内,拱角、侧墙超挖最为不利,超挖时使水平位移变化较大,拱底角超挖对竖向和水平位移影响较小,只造成超挖部位的竖向底角拱起,如地质条件为弱质围岩时宜尽早设置仰拱,以确保洞室安全。

(2)随超挖高度的增加,超挖产生的洞周应力集中明显,尤其是超挖部位最大最小主应力差值变大,容易造成洞室围岩的局部破坏,超挖高度较小时(20~30 cm)对围岩的位移和塑性区影响很小,对中硬岩属可允许超挖高度。

(3)超挖数量不同条件下计算了超挖单元高度40 cm拱顶多组超挖的情况,结果表明,随着超挖个数的增加应力集中程度加大,应力影响范围和塑性区随超挖数量增加明显加大,对隧道的围岩的稳定极为不利,宜尽早施设初期支护。

## 参考文献:

- [1] 王明年,万姜林,等.隧道超欠挖的力学效果分析[J].西南交通大学学报,1996,31(6):577-582.
- [2] 周维垣.岩石力学数值计算方法[M].北京:中国电力出版社,2005.84-85.
- [3] 唐晓松,大型地下洞室工程整体稳定性的有限元模拟分析[J].采矿技术,2003,(2):70-72.
- [4] 高谦,乔兰,等.地下工程系统分析与设计[M].北京:中国建材工业出版社,2005.
- [5] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [6] 徐干成,白洪才,郑颖人,等.地下洞库支护结构[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [7] 关宝树.隧道工程设计要点集[M].北京:人民交通出版社,2003.

(上接第69页)

与温度曲线一致的规律,深部应力小,往上应力逐渐增大,到顶部后由于地表变形,应力出现降低,水平方向由于塑性区的应力松弛,使得隧道轴线位置附近应力小,1/2半圆拱位置应力大,冻土体边缘位置应力小。

由实测数据,灰色淤泥质粘土层的温度变化相对较慢,应力及地层变形较大。

(4)该区域软土浅表隧道冻结地表变形发展规律为:冻结开始阶段地表变形较小,此后发生突变,

最后趋于稳定;冻土体分层位移,沿时间变化规律与地表位移相同;沿空间上,土层越深,位移越小;受影响的未冻区土体其分层位移出现压缩沉降现象。

## 参考文献:

- [1] 李述讯.冻、融土中的水热输运问题[M].兰州:兰州大学出版社,1993.
- [2] 徐学祖,等.饱水正冻土中水分迁移特征研究[A].第五届国际冻土学术会议论文集[C].北京:科学出版社,1988.
- [3] 程知言.浅表隧道工程多冷源冻结温度、应力、水分场耦合研究[D].长沙:中南大学,2003.