

地铁盾构始发端垂直分段冻结加固多场演化规律

陈军浩^{1,2}, 李彧翰¹, 张见¹, 黄靖涵¹

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 以福州地铁6号线某区间盾构始发端垂直分段冻结加固为背景, 分析了分段与全段冻结对温度场的影响, 通过地表位移探究了分段冻结过程中冻胀作用对周边环境的影响。采用有限元软件建立分段与全段冻结数值模型, 动态模拟冻结帷幕的演化过程, 并将分段冻结与全段冻结数值模拟计算结果与现场实测数据进行对比验证, 结果表明: 积极冻结期间, 在相同温度发展路径上, 越靠近冻结中心区域, 冻结效果越好; 冻结管端头处的冻结效果比中心区域略差, 冻结管底部冻结效果最差, 为冻结薄弱区域; 积极冻结期结束后, 隧道顶部的冻结帷幕厚度达到4 m, 隧道底部的帷幕厚度达到3.5 m, 均满足设计值。分段冻结帷幕形成时间比全段冻结短, 分段冻结的地表隆起量为24.4 mm, 低于全段冻结的27.6 mm, 因此分段冻结的冻结效果略优于全段冻结。研究结果可为垂直冻结法加固盾构端头的冻结方案设计与冻结法施工提供参考。

关键词: 分段冻结; 盾构端头加固; 冻结温度场; 位移场

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)01-0040-08

Multi-field evolution of vertical segmental freezing reinforcement at starting end of subway shield

CHEN Junhao^{1,2}, LI Yuhan¹, ZHANG Jian¹, HUANG Jinghan¹

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering of Colleges and Universities of Fujian Province, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Based on the vertical segmental freezing reinforcement of the shield's starting end of a section of Fuzhou Metro Line 6, the influence of segmental and full-section freezing on the temperature field was analyzed, and the influence of frost heaving on the surrounding environment during the segmental freezing process was explored through the surface displacement. The finite element software was used to establish the numerical model of segmented and full-section freezing, and the evolution process of frozen curtain was dynamically simulated. The numerical simulation results of segmented freezing and full-section freezing were compared with the field measured data. Findings indicate that during the active freezing phase, the freezing effectiveness improves with proximity to the freezing center along the same temperature development path. The freezing efficiency is least effective at the end of the freezing tube, with the bottom of the tube exhibiting the poorest performance, identifying it as a weak freezing zone. Following the active freezing period, the thickness of the freezing curtain at the tunnel crown reaches 4 m, while at the invert, it attains 3.5 m, fulfilling the design specifications. The time required for the freeze curtain to form is shorter in segmental freezing than that in whole-section freezing. Additionally, the surface uplift in segmental freezing is measured as 24.4 mm, which is less than that observed in whole-section freezing, i.e., 27.6 mm, suggesting that segmental freezing is marginally more effective. These research results serve as a valuable reference for the design and execution of freezing schemes for shield end reinforcement utilizing the vertical freezing method.

Keywords: segmental freezing; shield end reinforcement; freezing temperature field; displacement field

收稿日期: 2024-04-06

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2022J01925)

第一作者简介: 陈军浩(1986—), 男, 福建永泰人, 副教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下工程。

人工冻结法具有适应性强、隔水性能好、绿色环保等优点,成为滨海地区地铁联络通道、盾构始发加固的首选工法^[1]。胡向东等^[2]对“圆形主力冻结管”与“异型加强冻结管”优化,提出了更适合工程实际的单圈冻结管错位布置的冻结模型。李晓娜等^[3]模拟分析了垂直冻结法加固盾构端头工程的温度场,验证了冻结帷幕的安全性及稳定性。胡俊等^[4-5]建立了地铁盾构端头垂直冻结加固工程三维数值模型,并探明冻结管管径与冻结温度场发展间的关系。陈冠任等^[6]研究了福州地铁 2 号线某超长联络通道冻结工程,得出联络通道洞身上方存在冻胀集中区域,地层位移场的发展表现出以该区域为核心向外衰减的结论。张见^[7]研究了不同垂直冻结方式对盾构始发段加固的影响,得到了温度场与位移场的分布规律以及影响分段冻结加固地层的主要因素。王延延等^[8]研究了双线地铁车站地板在全段冻结和分段冻结两种模式下的冻胀抬升,得出了施工过程中上覆车站底板变形规律。

本文以福州地铁 6 号线某区间盾构始发端垂直分段冻结加固为工程背景,通过建立三维仿真模型对该区间盾构始发端的温度场和位移场进行数值仿真,分析垂直分段冻结过程中温度场与冻胀位移变形的规律,以期为滨海地区采用垂直冻结法加固盾构端头等相关研究提供参考。

1 工程概况

福州地铁 6 号线某区间采用盾构法施工,端头在该区间完成始发并接收。始发段隧道埋深为 18.76 m,盾构始发端头地质剖面图如图 1 所示。

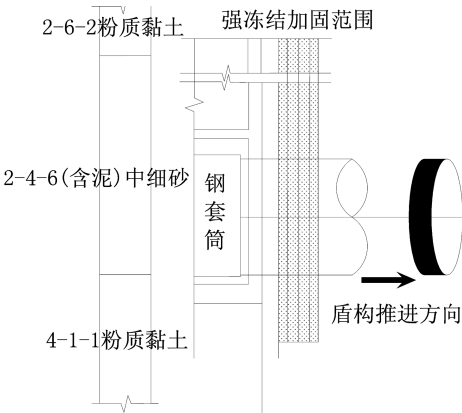


图 1 盾构端头地质剖面图

Fig.1 Geological profile of shield end

采用“地面垂直冻结加固+盾构推进”的方案,通过布置垂直冻结孔进行土体冻结加固,并于地连墙的外围形成高强度、强封闭性的冻土帷幕,而后拔除盾构推进区域的冻结管,在冻土帷幕的保护下进行盾构始发施工。

盾构始发端处土体采用垂直分段冻结工法加固。冻结区域按照梅花型布设 3 排共 40 个垂直冻结孔,深度均为 28.8 m。冻结管采用 $\Phi 127 \times 5$ mm 的低碳无缝钢管。分段冻结管的结构如图 2 所示,冻结管内设置不同长度供液管,冻结时开启冻结区域处冻结管冷量出口,关闭非冻结区域处冷量出口,从而实现分段冻结的目的。该盾构始发端冻结加固的积极冻结期为 58 d,最低盐水温度为 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,盐水去回路温差控制在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,盾构推进方向、隧道底部、两侧与上方的冻结壁厚度设计值分别为 2.3、4.0、3.0、3.0 m。冻结帷幕平均温度设计值低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻结帷幕与地连墙交界处易受到工程扰动,因此该位置冻结帷幕设计温度低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即可。

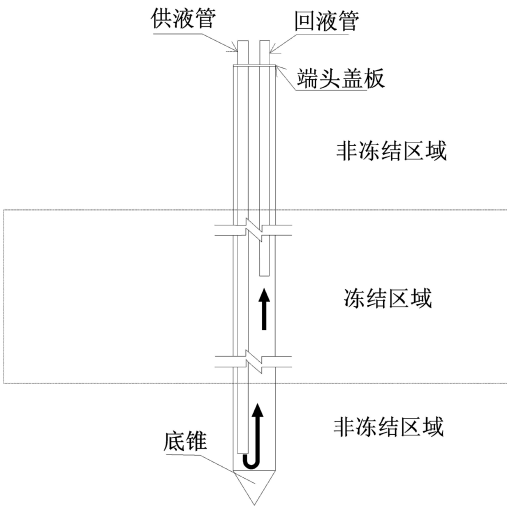


图 2 分段冻结器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of segmented freezer structure

2 监测方案

2.1 温度场监测方案

在冻结区域设置 5 个测温孔,孔内布置铜-康铜热电偶串进行测温,以掌握温度场变化规律,布孔方式如图 3 所示。测温孔 C1、C2 位于左侧冻结区,C3、C4、C5 位于右侧冻结区,测温孔 C1~C5 分别于地表下 16.2、19.2、22.2、25.2、28.3 m 处布置测温点,以监测地层不同位置处温度场发展。

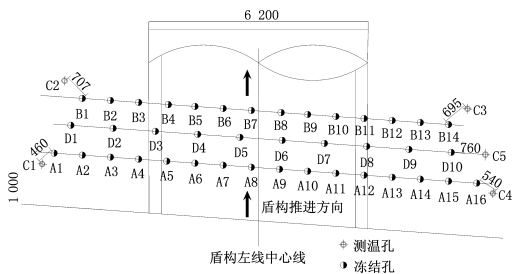


图 3 测温孔布孔方式示意图(单位:mm)
Fig.3 Schematic diagram of distribution mode of temperature measuring hole(unit:mm)

2.2 地表位移监测方案

在地表布置测点并使用 LEICA NA2 型水准仪观测位移情况。该盾构始发端头加固区附近建筑物较少,距离加固区南侧 8 m 为福泉快速路,冻结加固区南侧 6.8 m 地下有一条国防光缆未迁走,除此以外,施工影响范围内并无其他地下管线。沿盾构工程施工区间地表位移测点按对称布置,以左线测点布置区域为例,其最左侧为 8# 测点,从左往右对布置的测点进行编号,依次为 1#、2#、3#、4#、5#、6#和 7#。其中,左、右线盾构剖面中心线对应的测点编号均为 5#,并按 3 m 间隔沿盾构推进方向进行纵断面位移测点的布置,所布置的 6 个测点均用来监测地表纵断面竖向位移变化。测量监测从水准控制点出发,按三四等水准测量要求,对各监测点的高程进行测量,取前、后两次测量值之差为本次沉降变化量,测量值与初始值之差为累计沉降量。图 4 为左线地表位移测点的布置图。

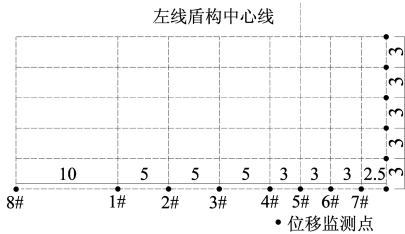


图 4 左线地表位移测点布置图(单位:m)
Fig.4 Layout of surface displacement measurement points on the left line(unit:m)

3 盾构始发冻结温度场分析

3.1 不同深度土体温度对比分析

以 C3 测温孔为例,分析不同深度土体温度。C3 测温孔位于右上方冻结区,远离盾构开挖工作面,受到的工程扰动较小,测温孔积极冻结期划分

为快速降温、稳定降温和稳定冻结 3 阶段。图 5 为 C3 测温孔不同深度土体温度实测值与时间的关系曲线。

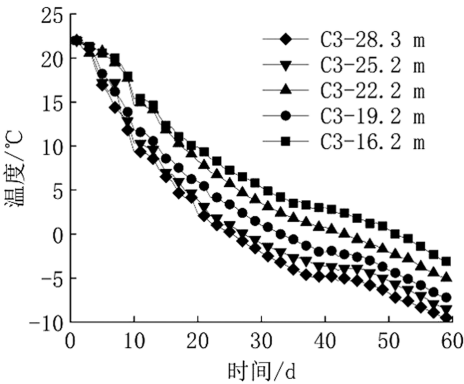


图 5 测温孔 C3 温度实测值与时间关系
Fig.5 Relationship between measured temperature and time of temperature measuring hole C3

由图 5 可知,处于不同深度的各测点温度变化趋势大体相近。C3 测温孔各测点从浅到深的降温速率分别为 0.48、0.50、0.53、0.55、0.46 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。除 28.3 m 处测点外,其余 4 处测点均按照入土深度越大土体降温速率越快的规律变化。深度为 28.3 m 的测点位于冻结管末端即冻结壁底部,低温盐水在循环过程中有部分冷量损失,因此到达底部的冷量较少;且该点位于冻结壁的底部,受到底部未冻土与地下水的影响,未冻土与冻结壁热交换导致此处的冷量损失较大,因此该测点的降温速率最慢。

3.2 相同深度土体温度分析

选取右侧同为 19.2 m 处测点 C3、C4、C5 进行分析,如图 6 所示。

由图 6 可知,测温孔 C3、C5 整体温度变化基本相同,在积极冻结期开始,初始地温在 22 $^{\circ}\text{C}$ 左右,土体与低温盐水存在巨大的温差,两者发生剧烈的热交换,土体温度迅速降至 0 $^{\circ}\text{C}$ 左右,C3 测温孔降至 0 $^{\circ}\text{C}$ 的降温速率约为 0.88 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$,C5 测温孔降至 0 $^{\circ}\text{C}$ 的降温速率约为 1.47 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$;随着冻结时间延长,热交换速率减慢,降温速率变小,积极冻结 40 d 时,C3 测温孔降温速率约为 0.37 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$,C5 测温孔降温速率约为 0.41 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$;积极冻结后期,冻结管及管内低温盐水与周围土体在较小的温差条件及温度梯度下进行热交换。由于 C5 测温孔位于三排垂直冻结孔的中心位置,受到冻结冷量的影响最大,因此该点的冻结效果最好,降温速率

最快;C3 测温孔位于左线的右前方,距离地连墙最远,受到工程扰动最弱,但该处测温点位于冻结区边缘,受到边缘处未冻土的影响,C3 测温孔的冻结效果略差于 C5 测温孔;C4 测温孔位于左线的右后方,位于冻结区的边缘,距离地连墙较近,极易受到外界环境的影响;C4 测温孔降至0℃的降温速率约为 0.55℃/d,随后该处土体以 0.33℃/d 的速率降温至积极冻结 58 d 结束。同一个测温孔中不同测点的温度变化规律基本一致。入孔深度较大的测点与地表距离更大,其冷却效果受外界影响程度较小,降温效果更好,而临近地表测点降温速率相对较小,但从结果看,其降温效果仍满足冻结设计参数要求。

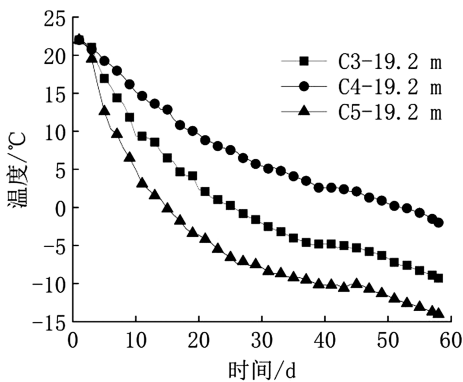


图 6 19.2 m 处地层温度变化图

Fig.6 Soil temperature change at 19.2 m

3.3 地表位移实测分析

左线横断面监测点竖向位移变化如图 7 所示。

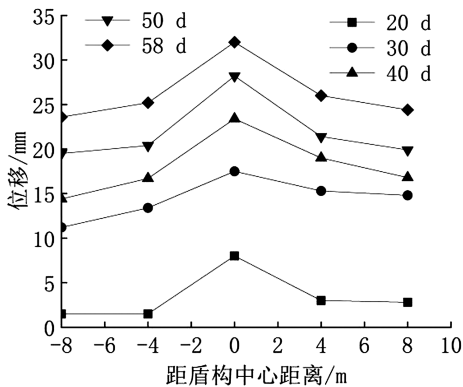


图 7 地表横断面竖向位移变化图

Fig.7 Vertical displacement change of surface cross-sectional monitoring points

由图 7 可看出,在冻结前 20 d 左右,因土体

的温度尚未降至 0℃以下,土中水未凝结成冰,地表垂直方向的位移基本为 0。当土体进入稳定降温阶段时,土体温度降至 0℃以下,土中水凝结成冰,冰分凝现象逐渐呈现,土体体积开始膨胀,地表竖向位移呈线性增长的规律。由于越靠近中心线,冻结管越集中,冷量散失越少,土体的冷冻效果越好,所受到的冻胀力越大;积极冻结 58 d 后,左线盾构中心地表冻胀位移为 32 mm,距离盾构中心 8 m 处地表冻胀位移为 23.6 mm,距离盾构中心-8 m 处地表冻胀位移为 24.4 mm。5 个位置土体整体位移变化规律相似,均按照距离盾构中心越近,地表冻胀位移越大的规律发展。

4 分段冻结温度场与位移场数值模拟与分析

4.1 模型建立

使用 ANSYS 软件建立盾构端头处地层分段冻结模型,对盾构端头分段冻结温度场进行计算。假定目标地层水平分布,使用均质且各向同性的弹性体材料;模型边界采用绝热属性,并将温度荷载均匀施加于冻结管表面;忽略地下水渗流的影响。模型整体尺寸为 15 m×8 m×45 m,冻结管布置位置与实际位置相同。地层自上而下依次为 2-6-2 粉质黏土、(含泥)中细砂、4-1-1 粉质黏土,各地层土体的主要热物理参数如表 1 所示。冻结温度场计算采用瞬态热分析,选用 Solid70 土体单元,网格单元的数量密度根据不同区域划分,其中冻结管及邻近地层区域网格数量较多,其余区域网格单元数量较少。温度场计算结束后,通过 ANSYS 自带的结构转化功能,将温度单元转化为结构单元,在模型左右边界、下边界、前后边界施加法向位移约束,对结构模型施加重力场,得到受重力场影响后的应力场,再将重力场所产生的位移清零,得到初始应力场,在初始应力场的条件下将计算所得温度场作为温度荷载施加到结构模型上,从而得出积极冻结期内温度场对地表冻胀位移的影响。

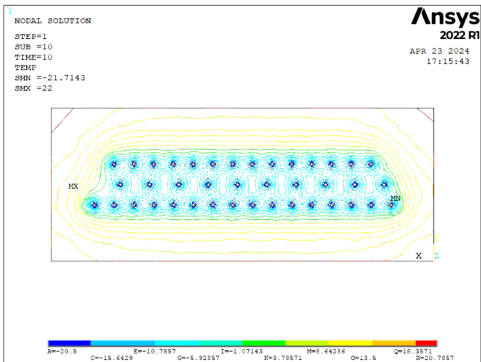
4.2 计算结果分析

如图 8 利用 ANSYS 软件分析计算结果,选取冻结深度-18 m (隧道顶部)、冻结时间 10、20、30、58 d 的冻结帷幕温度场发展云图进行分析。

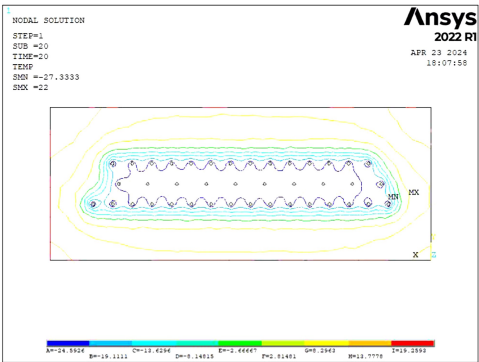
表 1 地层热物理参数

Tab.1 Thermophysical parameters of soil layers

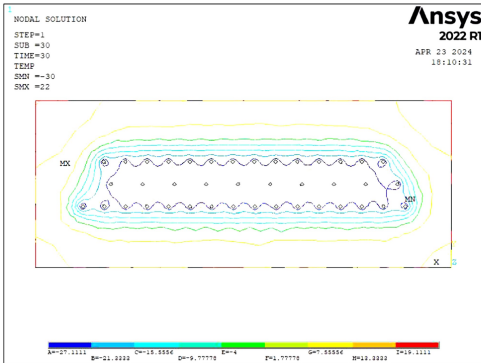
土层	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		比热容/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		焓值/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)			
	-30 ℃	40 ℃	-30~-2 ℃	0~40 ℃	-30 ℃	-2 ℃	0 ℃	40 ℃
2-6-2 粉质黏土	2.86	2.66	1.47	1.59	0	77.23	316.33	437.98
(含泥)中细砂	2.53	2.39	1.79	1.93	0	95.65	304.98	455.79
4-1-1 粉质黏土	2.71	2.62	1.44	1.59	0	75.71	318.69	438.11



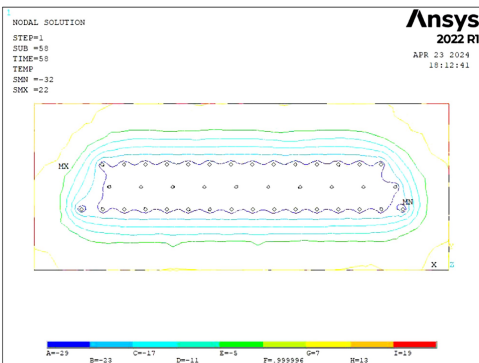
(a) 10 d等值线图



(b) 20 d等值线图



(c) 30 d等值线图



(d) 58 d等值线图

图 8 分段冻结温度场发展等值线图

Fig.8 Contour plot of segmental freezing temperature field development

当冻结 10 d 时,土层降温速率为 0.85 ℃/d,冻结管向外扩展形成的冻结锋面逐渐交互,形成最初的冻结帷幕;在冻结 20 d 时,土柱的冻结锋面已完全交互,冻结帷幕开始形成但厚度较小,其强度和稳定性差,未能起到止水、隔水作用;随着时间的发展,土层的降温速率也在减慢,在 30 d 时,降低至 0.3 ℃/d,此时隧道顶部的冻结帷幕厚度已经达到 3.1 m,稳定性和强度也在进一步加强;冻结管的冷量继续向外扩散,非冻结区土体温度持续降低,随着时间的发展,土层保持 0.2 ℃/d 的降温速率直至积极冻结期结束。在 58 d 时,隧道顶部的冻结帷幕厚度达到 4 m 左右,隧道底部

的厚度也达到 3.5 m,均满足 3.0 m 的设计值。图 9 为分段冻结隧道不同位置冻结帷幕平均厚度随时间发展变化图。

为掌握分段冻结的冻胀位移规律,分析盾构端头分段冻结模型计算结果,分段冻结地表垂直位移变化情况如图 10 所示。

由图 10 可知,地表冻胀位移随冻结持续时间增加而发展;冻结 25、35、45、58 d 的地表最大隆起位移分别为 10.5、17.5、20.5、24.4 mm。地表隆起位移以盾构中心线为对称轴且呈正态分布,隆起最大位移出现在盾构中心处;距离盾构中心越远,地表的位移量越小。盾构中心位于三排冻结

管的交界处,受到来自各方向的冷量输入,三排冻结管产生的冻胀作用在此处叠加,因此该位置的地表位移量最大。

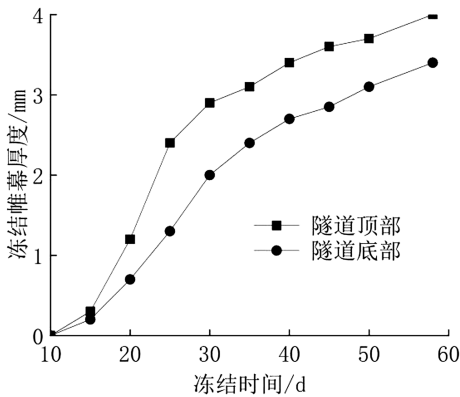


图 9 分段冻结冻结帷幕平均厚度发展图

Fig.9 Freeze curtain average thickness development diagram of segmental freezing

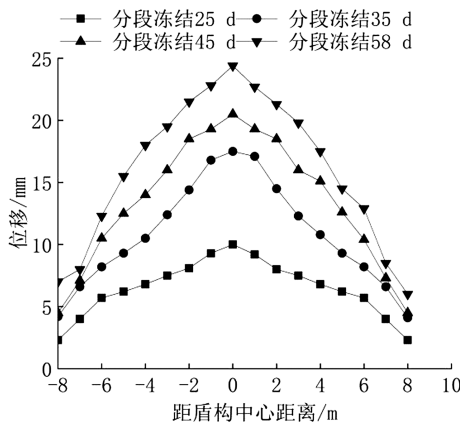


图 10 分段冻结地表垂直位移分布图

Fig.10 Surface vertical displacement distribution of segmental freezing

4.3 模拟与实测结果对比

选取位于深度 22.2 m (隧道底部) 的外侧 C1 与内侧 C5 测温孔温度数据,对比分析分段冻结模型上所对应测点的模拟结果与实测数据。图 11 为现场实测数据与数值模拟结果随时间变化曲线。

由图 11 可知,无论是位于内侧的 C1 测温孔,还是外侧的 C5 测温孔,其分段冻结的模拟结果均与现场实测结果相似。积极冻结期结束后,C1 测温孔冻结帷幕平均温度最低为 $-13.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,模拟结果为 $-16.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;C5 测温孔冻结帷幕平均温度最低为 $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$,模拟结果为 $-17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对土体而言,数值模拟假定土层是级配良好且各向同性的均值

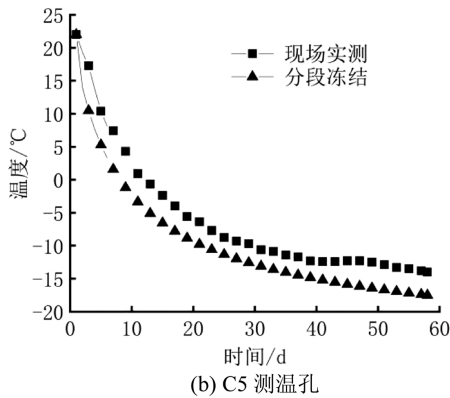
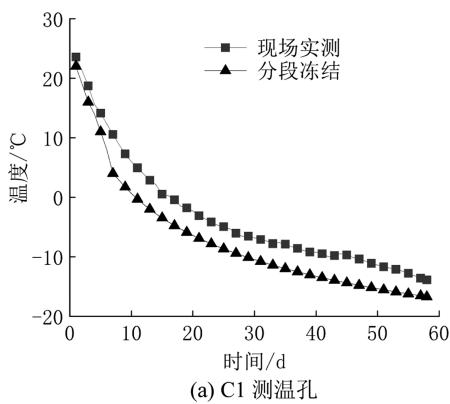


图 11 现场实测与数值模拟对比

Fig.11 Comparison of field measurements and numerical simulations

材料,在实际工程中,土体颗粒级配并不均匀,不同深度土体固结程度不同;另一方面,有限元计算建立的冻结管是理想无偏斜的,冻结壁平均温度较低,而实际工程中冻结管有一定的偏斜,形成的冻结壁不均质,平均温度相对较高,因此,数值模拟结果低于实测数据。

将盾构中心处的现场实测位移数据与分段冻结竖向位移进行对比,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,现场地表实测竖向位移与分段冻结数值模拟结果类似,总体差异性较小。冻结 25 d 时,地表的实测位移为 12 mm,分段冻结的模拟值为 10.5 mm,随着冻结进行,因地层的冻胀作用所产生的地表位移不断增大,在 35 d 时,地表的实测位移值增长至 20 mm,模拟位移值增至 17.5 mm,在这段时间里,土体与冻结管的热交换速率加快,冻结帷幕开始形成,引起的地层冻胀效果愈加显著,进一步导致地表位移增长迅速。当冻结至 45 d 时,地表实测位移增长至 26 mm,分段冻结的模拟值增至 20.5 mm,地表冻胀位移增长速率变慢,此时,冻结帷幕基本形成,抵抗冻胀

作用的能力增强,因此土体的位移增长速率降低。在冻结 58 d 时,现场实测位移为 32 mm,分段冻结模拟值为 24.4 mm。由于建立模型时并未考虑地下水渗流的影响,冻结壁附近的地下水在迁移时会为冻结壁补充一部分水分,这一部分水在受到冻结管散发的冷量时会凝结成冰晶,从而导致土体冻胀位移的增大。除了地下水的影响,模型在假设时,将土体设为级配良好的各向同性材料,没有考虑不同深度土体的性质,且土体的热膨胀系数是一个动态平衡的值,因此分段模拟的位移值比现场实测位移值小,两者的差值保持在合理的范围之内。因此该模型能较好地反映冻结施工中的位移情况,为施工安全提供依据。

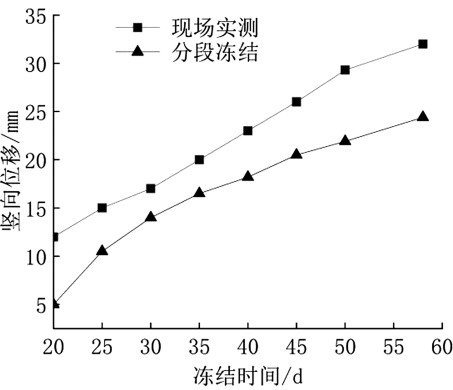


图 12 现场实测位移值与分段冻结模拟值对比图

Fig.12 Comparison of measured displacement values and simulated values of segmental freezing

5 全段冻结与分段冻结对比分析

5.1 温度场对比分析

建立土层、冻结参数均与分段冻结模型一致的全段冻结模型,取 C5 测温孔冻结深度为-25 m (隧道底部) 处分析全段冻结与分段冻结的模拟情况,并将隧道顶部与底部冻结帷幕厚度进行对比分析,图 13 为分段冻结与全段冻结温度场对比图。

由图 13(a) 可知,分段冻结模拟温度曲线和全段冻结模拟温度曲线发展趋势基本一致。积极冻结 58 d 后,C5 测温孔全段冻结模拟温度为 -14.4 ℃,平均降温速率为 0.98 ℃/d,分段冻结模拟温度为 -17.5 ℃,平均降温速率为 1.28 ℃/d。由图 14(b) 可知,积极冻结 58 d 后分段冻结隧道顶部冻结帷幕厚度为 3.4 m,隧道顶部冻结帷幕厚度为 4 m,全段冻结隧道顶部冻结帷

幕厚度为 3.4 m,隧道底部冻结帷幕厚度为 3.1 m。由于分段冻结器可以将冷量出口设置在需要冻结的土体处,因此冷量在非冻结区域处损失较少,在相同冻结时间内,分段比全段冻结降温速率快,土体在积极冻结期结束后温度更低,降温效果更好;分段冻结比全段冻结形成的冻结帷幕厚度大,冻结帷幕形成的时间更短,厚度满足 3.0 m 的设计要求。

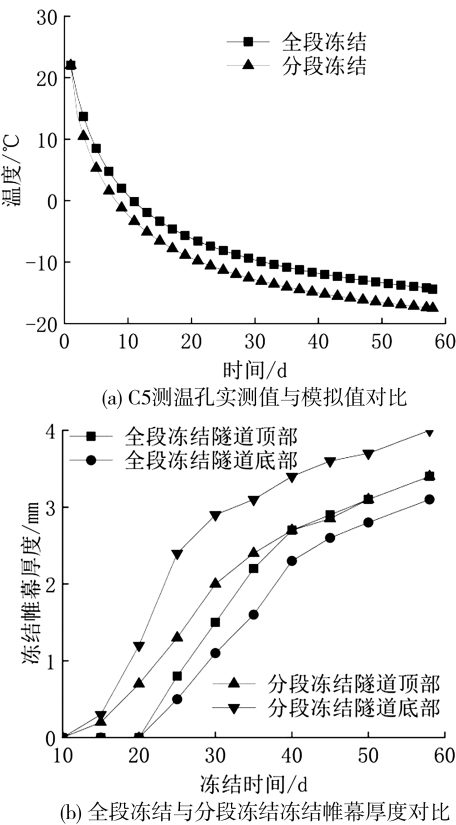


图 13 温度场对比图

Fig.13 Comparison of temperature fields

5.2 位移场对比分析

图 14 将分段冻结和全段冻结的模拟结果与地表位移实测值对比。分段冻结 58 d 时,盾构中心处地表位移模拟值为 24.4 mm,低于全段冻结 58 d 时的地表位移模拟值 27.6 mm,同时也低于现场实测的 32 mm。在冻结过程中,全段冻结释放的冷量多,使得非冻结区域土体冻结,导致地表位移增大,而分段冻结将冷量精准释放于冻结区域,非冻结区域土体冻结量较少,因此分段冻结竖向位移小于全段冻结竖向位移。两种模拟结果均与地表实测位移的变化规律相似,呈现出地表冻胀位移随时间的增加而增大

的趋势,且曲线拟合程度较高,表明对分段冻结数值模拟结果进行分析有利于进一步了解冻结

温度场的发展规律,对滨海地区垂直冻结加固土层有着指导意义。

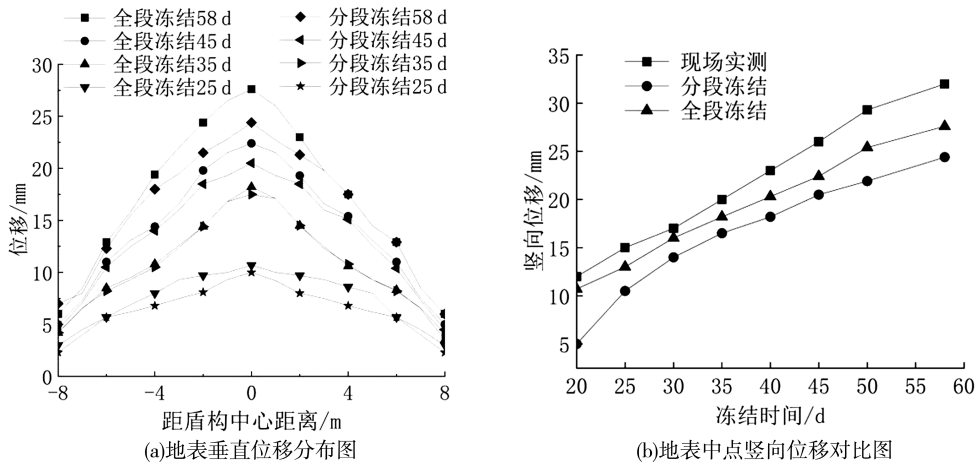


图 14 位移场对比图
Fig.14 Displacement field comparison chart

6 结论

1) 积极冻结期间,各测温孔监测的土体降温趋势大致相同。在同一温度发展轨迹上,越靠近冻结中心区域,土体温度越低,降温速度越快,冻结效果越好。除位于冻结管底部的测点外,其余测点均按照入土深度越大,土体降温速率越快的规律变化,而冻结管底部受到周围未冻土的影响最大,因此该处的降温效果最差,土体降温速率最慢。

2) 对盾构端头地层进行瞬态热分析,冻结至

58 d 时,隧道的顶部冻结帷幕厚度达到 4 m,底部厚度也达到 3.5 m,均满足 3.0 m 的厚度设计值。经计算,分段冻结最大隆起位移发生在盾构中心处,该处的地表隆起位移为 24.4 mm,距离盾构中心越远,地表位移越小。对比分段冻结与全段冻结模拟结果,显示分段冻结比全段冻结降温速率快,形成的冻结帷幕厚,冻结帷幕形成时间短;分段冻结位移值为 24.4 mm,低于全段冻结位移值 27.6 mm 与现场实测位移值 32 mm。因此分段冻结的冻结效果优于全段冻结。

参考文献:

[1] 胡向东,李忻轶,吴元昊,等. 拱北隧道管幕冻结法管间冻结封水效果实测研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(12): 2207-2214.

[2] 胡向东,洪泽群. 管幕冻结特殊布管形式稳态温度场解析解[J]. 中国公路学报,2018,31(8):113-121,154.

[3] 李晓娜,杨双锁,鲍飞翔,等. 盾构始发端垂直冻结温度场数值分析与现场实测[J]. 科学技术与工程,2020,20(1): 297-302.

[4] HU J,LIU Y,WEI H,et al. Finite-element analysis of heat transfer of horizontal ground-freezing method in shield-driven tunneling[J]. International Journal of Geomechanics,2017,17(10):04017080.

[5] HU J,LIU Y,LI Y P,et al. Artificial ground freezing in tunnelling through aquifer soil layers:a case study in Nanjing metro line 2[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2018,22(10):4136-4142.

[6] 陈冠任,李栋伟,陈军浩,等. 富水地层地铁超长联络通道冻结位移场演化规律研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023, 20(8):3000-3013.

[7] 张见. 不同垂直冻结方式对盾构始发端加固效果影响分析[D]. 福州:福建工程学院,2023.

[8] 王延廷,王磊,李方政,等. 双线冻结隧道下穿车站冻胀特性模型试验与工程实测[J]. 工程科学与技术,2022,54 (6):157-165.