

盾构隧道始发水平冻结法施工温度场参数研究

王 辉

中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年1月17日; 录用日期: 2023年2月7日; 发布日期: 2023年2月24日

摘 要

为研究盾构始发采用水平冻结法情况下不同因素对温度场变化的影响, 依托郑州地铁8号线一期工程采用Abaqus进行数值模拟分析, 研究水平冻结法施工中盐水温度、起始地温、相变潜热、土层导热系数、土层比热容、混凝土导热系数对温度场的影响。结果表明: 冻结盐水温度、土层比热容与导热对温度场影响较大; 起始地温、相变潜热对温度场影响较小; 混凝土导热系数对温度场几乎无影响。本文所研究的参数对温度场的变化情况可为类似工程水平冻结法施工提供参考。

关键词

盾构施工, 水平冻结法, 温度场, 数值模拟

Study on Temperature Field Parameters of Shield Tunnel Starting Horizontal Freezing Method

Hui Wang

Sinohydro Bureau 8 Co. Ltd., Changsha Hunan

Received: Jan. 17th, 2023; accepted: Feb. 7th, 2023; published: Feb. 24th, 2023

Abstract

In order to study the influence of different factors on the temperature field under the condition of horizontal freezing method at the beginning of shield construction, Abaqus was used to conduct numerical simulation analysis based on Zhengzhou Metro Line 8 phase I project, and the influence of brine temperature, initial ground temperature, latent heat of phase transformation, soil thermal conductivity, soil specific heat capacity and concrete thermal conductivity on the temperature field during horizontal freezing method construction was studied. The results show that the tem-

perature field is affected by the temperature of frozen brine, the specific heat capacity of soil layer and the heat conduction. Initial ground temperature and latent heat of phase transition have little effect on temperature field. The variation of the parameters studied in this paper on the temperature field can provide a reference for the horizontal freezing method construction of similar projects.

Keywords

Shield Construction, Horizontal Freezing, Temperature Field, Numerical Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市地下交通的迅速发展,盾构法在基础设施建设中应用得越来越广泛。在盾构始发作业过程中,由于土体一般不符合自稳要求,所以需要对土体进行改良,在盾构隧道作业中,盾构进出洞事故频发的阶段,作业风险较大。在盾构始发作业中,对隧道端头土体进行加固是非常重要的,因此,对端头土体加固方式的正确选择是顺利作业的保证,冷冻法经过大量的实践证明,其加固效果很好。由于冷冻法施工中温度场在土层中的变化决定了冻结的范围以及冻土的强度,所以研究影响温度场变化的参数具有实际意义。

现有学者针对类似工程已经开展了大量的研究。胡向东[1]等通过水-热异类相似原理,根据传热过程与地下水流动相似的特点,利用保角映射、汇源反映和势函数叠加原理,类比推导了环形单圈冻结管稳态温度场解析解;袁云辉[2]等 ADINA 有限元软件对该浅埋暗挖隧道涌水段建立冻结温度场数值模型,分析了冻结管间距、冻结盐水温度、冻结管直径对冻结壁发展速率、冻结壁厚度、平均温度的影响;盛天宝[3]等通过收集多个井筒的多圈孔冻结方案和施工资料,开展了多圈孔冻结壁温度场实测,得出了冻结壁厚度计算与外圈、中圈与内圈的关系;李攀[4]等通过 ANSYS 有限元软件研究和总结了冻土帷幕温度动态演化机理,包括冻土帷幕发展规律、交圈规律、平均温度发展规律及冻土帷幕有效厚度发展规律;石荣剑[5]等针对软土地层中盾构地中对接冻结加固施工边界条件复杂、形成冻结壁体积小且形状不规则的特点,按照相似理论设计进行了冻结加固模型试验,分析了冻结过程中地层温度场的分布规律,得出了冻结壁形状与外圈冻结管的布置形式相似等规律;焦华喆[6]等通过数值模拟软件 COMSOL Multiphysics 建立多物理场耦合对温度场发展进行研究,研究了冻结壁发展速度与冻结壁交圈时间等因素;向亮[7]等通过理论分析与数值模拟探讨了红砂岩地层单管冻结瞬态温度场计算公式和稳态温度场计算公式的适用性。

综上,冻结温度场研究多集中在单圈冻结管与多圈冻结管的温度场变化计算上,如何分析不同参数对温度场变化的影响以及进行精细化建模,是分析冻结法冻结土层范围的关键。因此,本研究以郑州市某区间盾构始发采用水平冻结法为依托,采用 ABAQUS 对冻结法温度场进行模拟,对影响温度场变化的不同因素进行分析,为相关冻结法隧道施工提供指导。

2. 工程概况

郑州地铁八号线一期工程同乐站~丰庆路站区间左线起点里程 ZDK29 + 573.517,终点里程 ZDK30 +

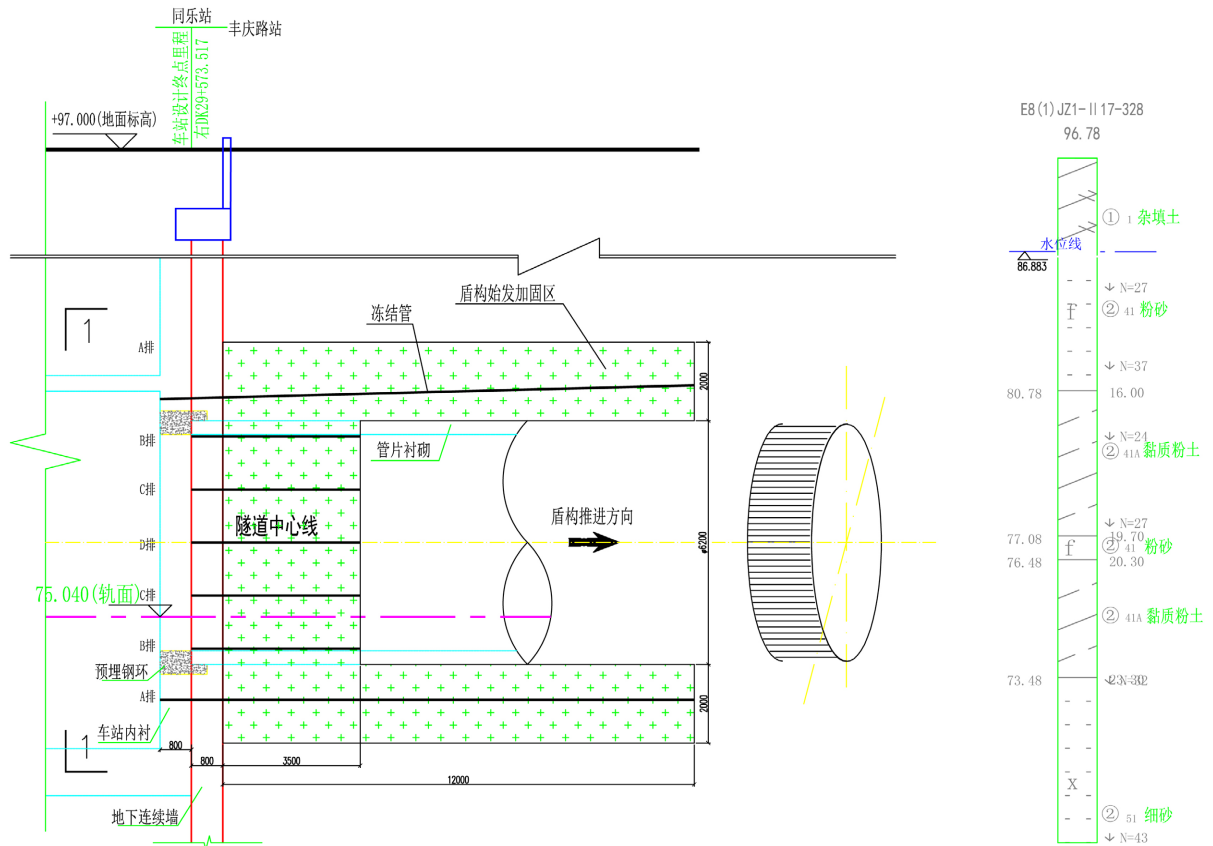


Figure 1. Frozen hole profile
图 1. 冻结孔剖面图

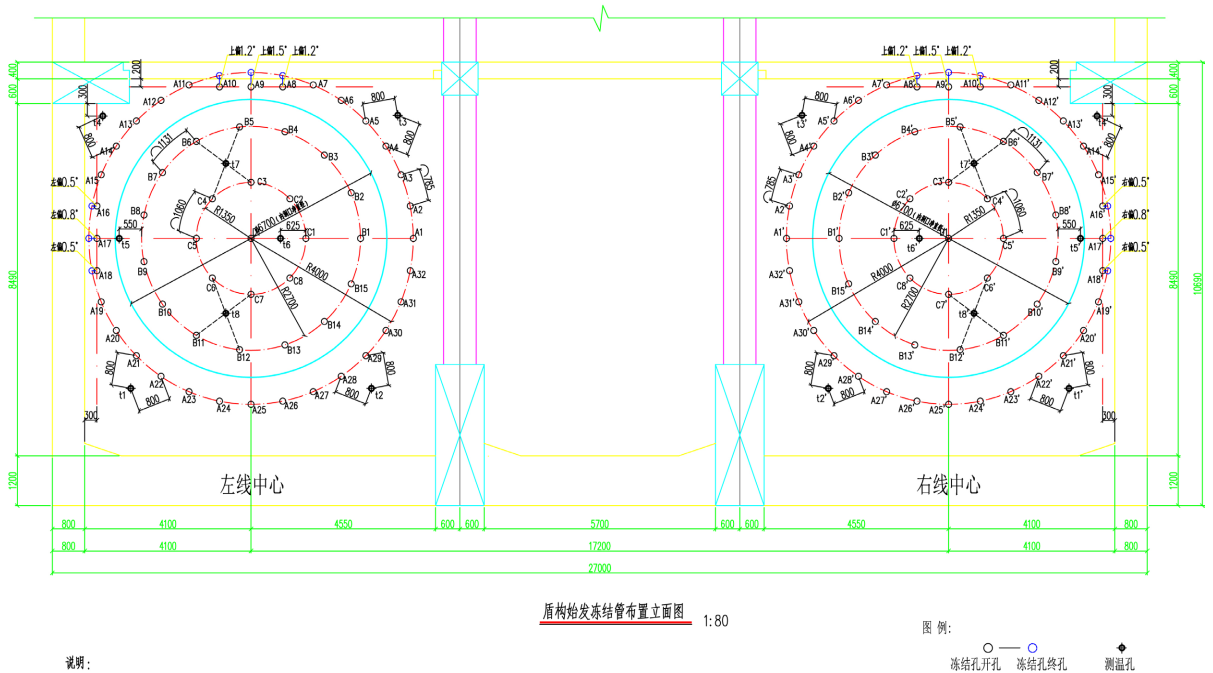


Figure 2. Elevation of freezing tube layout at the beginning of shield tunnel
图 2. 盾构隧道始发冻结管布置立面图

529.242, 左线区间长 962.752 m, 右线起点里程 YDK29 + 573.517, 终点里程 YDK30 + 529.241, 右线区间长 955.725 m, 里程 DK30 + 035.000 处设置一座联络通道。本区间线路出同乐站后, 沿东风路东行, 途径丰乐路、天旺广场、天明路、五洲大酒店、天明森林国际公寓, 到达丰庆路站。区间为 V 坡, 最大坡度为 21%, 最小平曲线半径 $R = 700$ m, 线间距 13~17.2 m, 隧道顶板埋深 10.29~20.74 m。区间穿越主要地层为黏质粉土、粉质黏土、粉砂、细砂。区间隧道稳定水位标高为 86.7 m。根据总体工程筹划, 本区间采用 2 台土压平衡盾构机掘进, 2 台盾构机从同乐站东端头井先后间隔一个月始发后向东掘进, 在丰庆路站西端头井接收。由于同乐站施工场地条件限制, 盾构始发采用水平冻结加固形式, 冻结区为杯形, 加固杯体的杯底厚度为 3.5 m, 杯壁厚度为 2.0 m, 杯体长度为 12.0 m, 见图 1、图 2。

3. 温度场参数优化模型

3.1. 模型建立

本文采用 ABAQUS 建立整体三维有限元模型进行数值分析。模型以盾构隧道掘进方向为 Y 轴, 垂直隧道掘进方向为 X 轴, 竖向为 Z 轴建立计算坐标系。考虑盾构隧道进洞始发处温度场参数优化情形, 结合考虑隧道端头埋深、冻结管的尺寸以及冻结壁的影响范围, 隧道中心埋深 17 m, 隧道直径 6.2 m, 模型的整体尺寸为长 \times 宽 \times 高 = 63.4 m \times 40.2 m \times 25.6 m。在进行网格划分时考虑远端的土体影响较

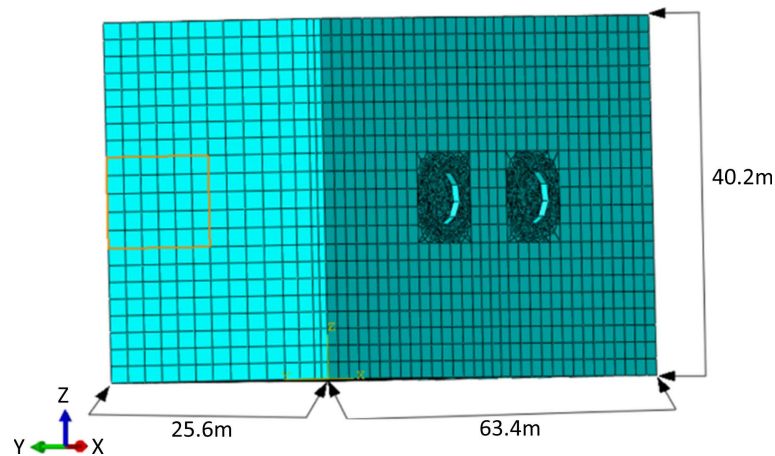


Figure 3. Meshing diagram

图 3. 网格划分图

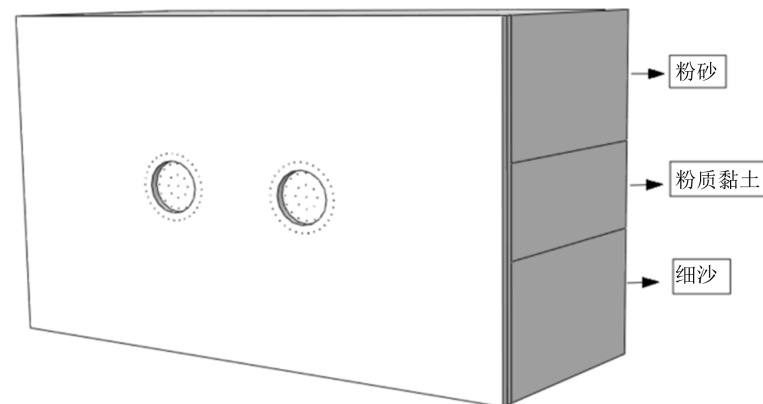


Figure 4. Soil layer map

图 4. 土层分层图

小，全局布种尺寸较大，对于隧道掌子面附近区域冻结管较多网格质量要求较高对其进行局部布种，局部尺寸较小。模型采用扫掠划分网格，以六面体单元为主，共划分 345,862 各单元，满足计算要求。冻结时长根据工程设计取左线冻结开始时刻到右线冻结 45 天时刻，总计 75 天，左线先冻结 30 天后右线开始冻结。分析步最小增量步 1 h，最大为 24 h。采用 ABAQUS 中热传导模块进行温度场分析。如图 2~5。

为了得到不同参数对温度场的影响变化，对不同参数分别进行不同水平的数值模拟，不同工况模拟参数如表 1。

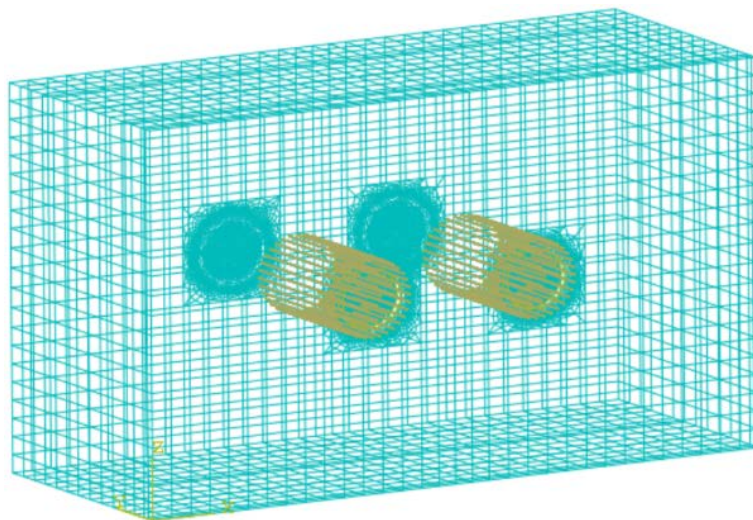


Figure 5. Model perspective
图 5. 模型透视图

Table 1. Table of parameters under simulated working conditions
表 1. 模拟工况参数表

参数类型	Level-1	Level-2	Level-3
盐水温度(°C)	-27.5	-29.5	-31.5
起始地温(°C)	20	22	24
相变潜热(KJ/m ³)	4940	9880	14,820
土层的比热容(kJ/kg·°C)	0.73	1.45	2.18
	1	2	3
土层的导热系数(W/m·°C)	0.76	1.51	2.27
	1.16	2.32	3.48
混凝土的导热系数(W/m·°C)	0.75	1.51	2.27

3.2. 盐水温度

对系列梯度盐水温度作用下隧道左线测温孔 t6 4.3 m 处温度值进行分析，如图 6~7。

由图 6 可知，盐水温度分别为-27.5°C、-29.5°C、-31.5°C时，土体的温度下降的总体趋势相同。在前 8 天，土体降温速度最快，-28°C、-30°C、-32°C的降温曲线没有大的差别，说明土体在未达到 0°C时三种不同冷源荷载对土体的降温影响较小；当土体温度下降到 0°C以下，土体的降温速度变的缓慢很多。-27.5°C、-29.5°C、-31.5°C降温曲线开始出现差值，随着冻结时间的继续，三种不同温度盐

水荷载引起的土体的温度变化越来越大。由图 7 可知，积极冻结 45 天结束时，三种不同荷载温度导致的土体的最终温度差在 2℃左右，基本上与盐水荷载呈线性关系，盐水温度越低冻结结束时的温度越小。

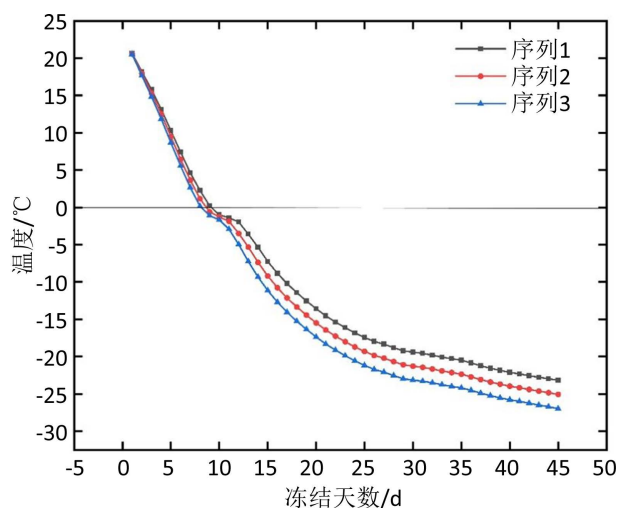


Figure 6. Temperature change diagram of 4.3 m at t6 point at different brine temperatures

图 6. 不同盐水温度下 t6 点 4.3 m 的温度变化图

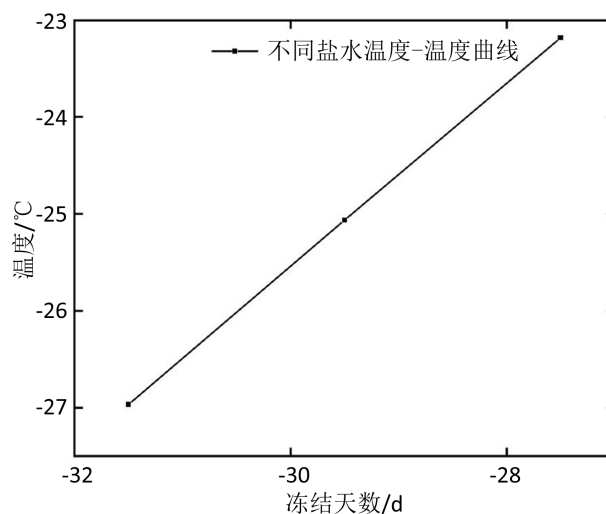


Figure 7. Temperature chart of the 45th day at t6 point 4.3 m at different brine temperatures

图 7. 不同盐水温度下 t6 点 4.3 m 的第 45 天温度图

3.3. 起始地温

对系列梯度起始地温作用下隧道左线测温孔 t6 4.3 m 处温度值进行分析，如图 8~9。

由图 8 可以看出，起始地温分别为 20℃、22℃、24℃的土体的降温曲线变化趋势相同。在前 8 天内，土体的降温速度最快，20℃、22℃、24℃三种不同的起始地温中起始地温为 24℃土体温度变化速率最快。从能量角度分析，该条件下的冷量荷载远大于土中蕴含的能量导致起始温度不同却在相同的时间到达相近值；当土体到达 0℃后三种不同的起始地温的土体温度变化趋势和速率大致相同，说明土体在 0℃以后

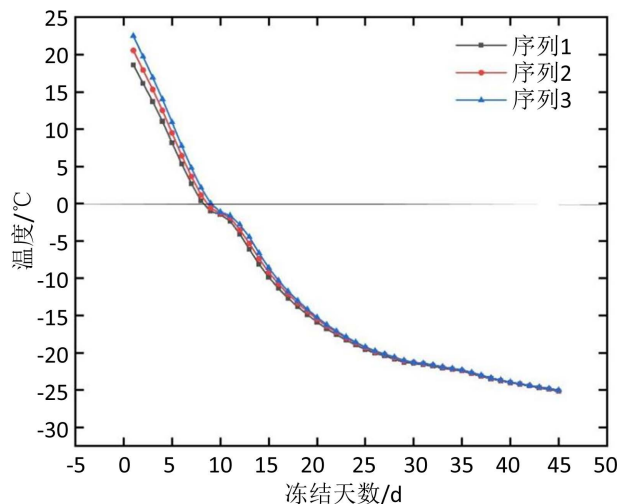


Figure 8. Temperature variation map of 4.3 m at t6 point under different initial ground temperature

图 8. 不同起始地温下 t6 点 4.3 m 的温度变化图

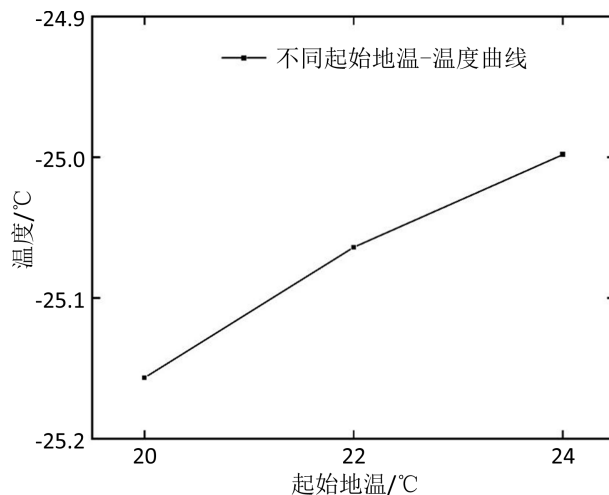


Figure 9. Temperature map of the 45th day at t6 point 4.3 m at different starting temperatures

图 9. 不同起始地温下 t6 点 4.3 m 的第 45 天温度图

土体的吸收冷量的速率一致，土体在 0°C 以后温度变化受起始地温的影响较小。由图 9 可以看出，在最终积极冻结 45 天结束时，三种不同起始地温导致的最终土体的温度相差在 0.1°C 左右，基本呈线性关系，土层的起始温度越低最终冻结结束时的温度就越低。

3.4. 相变潜热

对系列梯度相变潜热作用下隧道左线测温孔 t6 4.3 m 处温度值进行分析，如图 10~11。

由图 10 可以看出，相变潜热分别为 4940 kJ/m^3 、 9880 kJ/m^3 、 14820 kJ/m^3 的土体的降温曲线变化趋势相同。在前 8 天内，土体的降温速度最快，三种不同的相变潜热中在 0°C 以前土体的温度变化趋势和速率基本相同；当土体到达 0°C 后三种不同的相变潜热的土体温度变化趋势，但是速率却不相同，相变潜热小的变化速率大于相变潜热大的，在供冷量相同的情况下相变潜热越大需要克服能量越多，温度就降的越慢，但最终三种不同的相变潜热导致的土体的最终温度差相同。由图 11 可以看出，在最终积极冻

结 45 天结束时，三种不同的相变潜热导致的最终土体的温度相差在 0.2°C 左右，土层的相变潜热越低最终冻结结束时的温度就越低。

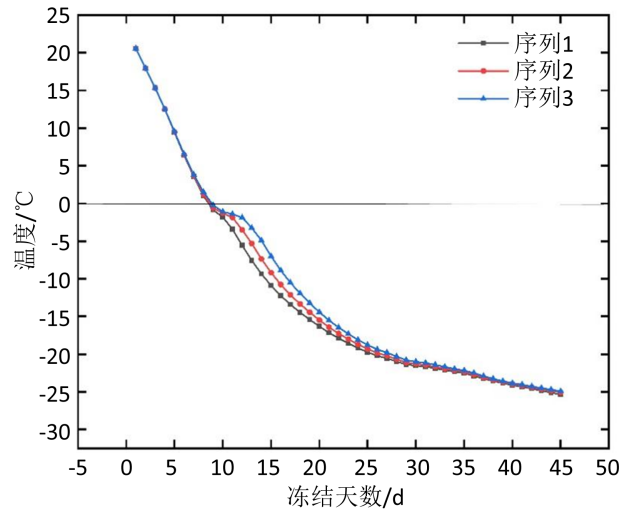


Figure 10. Temperature change diagram of 4.3 m at t6 point under different latent heat of phase transition

图 10. 不同相变潜热下 t6 点 4.3 m 的温度变化图

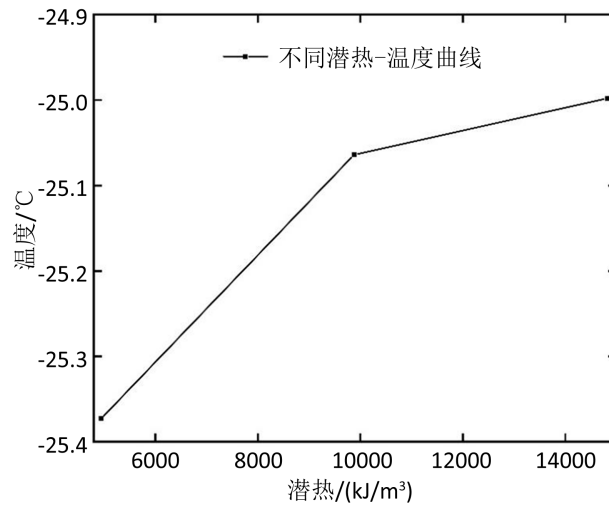


Figure 11. Temperature map of the 45th day at t6 point 4.3 m at different latent heat of phase transition

图 11. 不同相变潜热下 t6 点 4.3 m 的第 45 天温度图

3.5. 土层比热容

对系列梯度土层比热容作用下隧道左线测温孔 t6 4.3m 处温度值进行分析，如图 12~13。

由图 12 可以看出，三种不同比热容的土体的温度随时间变化趋势相同，其他条件相同的条件下，比热容小的一组土的温度变化速率越快，三种不同导热系数的土体在 0°C 以上温度下降最快，其中比热容越小温度下降越快；比热容每减小 50% 到达 0°C 就减少 3 天，比热容越小的就越先到达 0°C ，在土体达到 0°C 以后三种不同比热容的土体温度下降的速率变慢，相邻两组的差值基本保持不变。由图 12 可以看出，在最终积极冻结 45 天结束时，三种不同的比热容导致的最终土体的温度相差在 2°C 左右，基本呈线

性关系，土层的比热容越小最终冻结结束时的温度就越低。

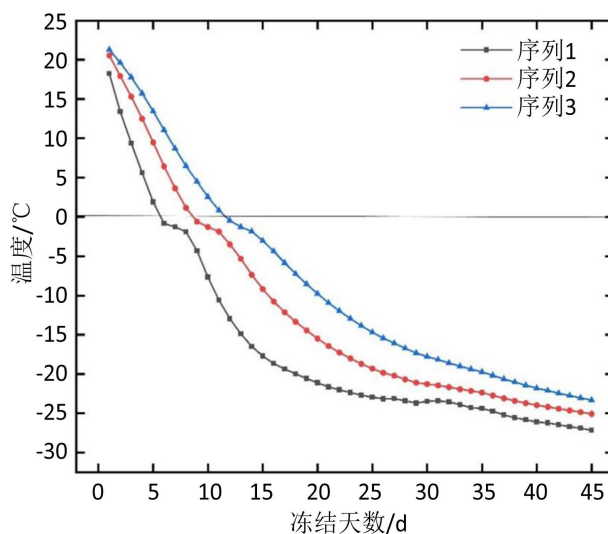


Figure 12. Temperature variation map of specific heat capacity of different soil layers at t6 point 4.3 m

图 12. 不同土层比热容 t6 点 4.3 m 的温度变化图

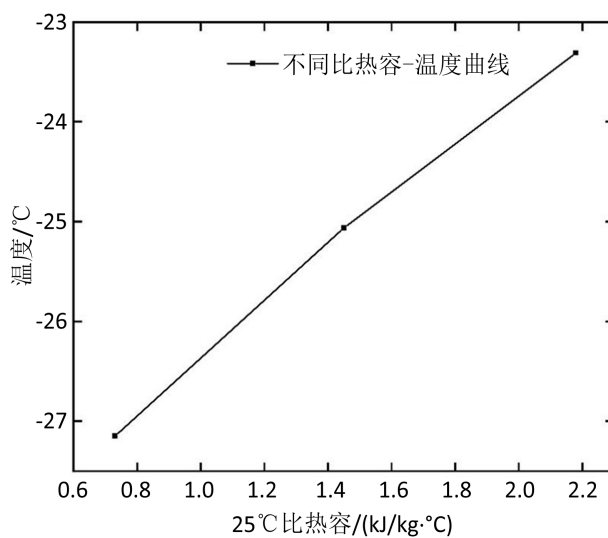


Figure 13. Temperature map of the 45th day at 4.3 m specific heat capacity t6 at different soil layers

图 13. 不同土层比热容 t6 点 4.3 m 的第 45 天温度图

3.6. 土层导热系数

对系列梯度土层导热系数作用下隧道左线测温孔 t6 4.3 m 处温度值进行分析，如图 14~15。

由图 14 可以看出，三种不同导热系数的土体的温度随时间变化趋势相同，其他条件相同的条件下，导热系数大的一组土的温度变化速率越快，三种不同导热系数的土体在 0°C 前温度下降最快，导热系数大的先到达 0°C；在土体达到 0°C 以后三种不同导热系数的土体温度下降的速率变慢，对照组和 1、3 两组差值随时间增加先增大后减小。由图 15 可以看出，在最终积极冻结 45 天结束时，三种不同的导热系数导致的最终土体的温度相差在 1°C~4°C，土层的导热系数越大最终冻结结束时的温度就越低。

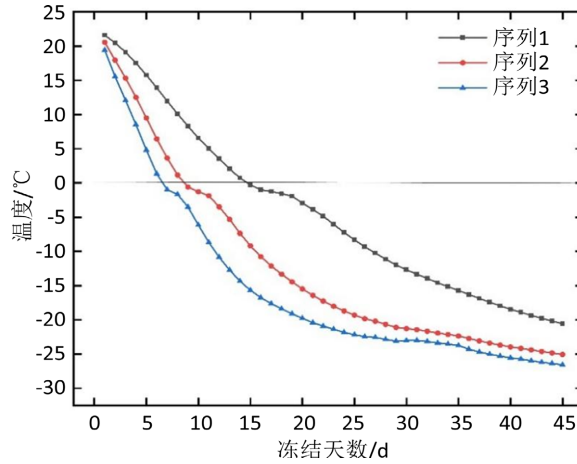


Figure 14. Temperature change map of 4.3 m at t6 point with thermal conductivity of different soil layers

图 14. 不同土层导热系数下 t6 点 4.3 m 的温度变化图

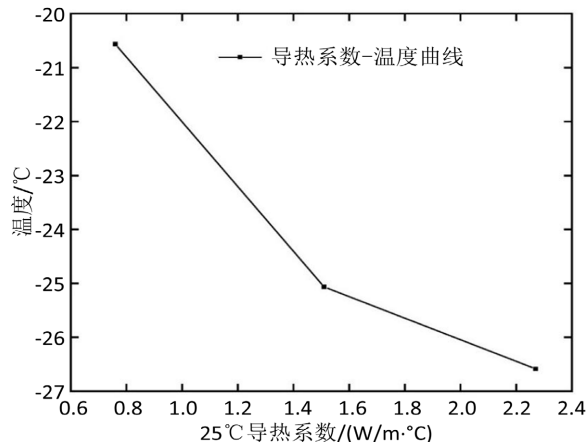


Figure 15. Temperature map of day 45 at t6 point 4.3 m with thermal conductivity of different soil layers

图 15. 不同土层导热系数下 t6 点 4.3 m 的第 45 天温度图

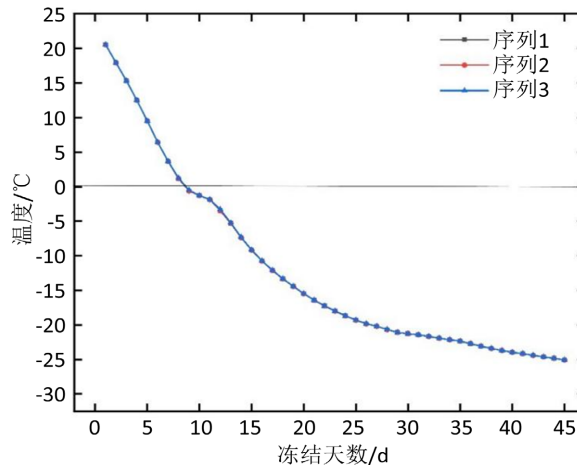


Figure 16. Temperature variation diagram of 4.3 m at t6 point with different thermal conductivity of concrete

图 16. 不同混凝土导热系数下 t6 点 4.3 m 的温度变化图

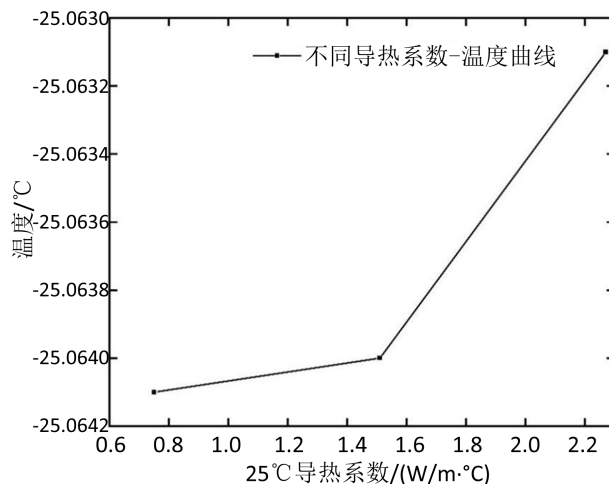


Figure 17. Temperature map of day 45 at t6 point 4.3 m with different thermal conductivity of concrete

图 17. 不同混凝土导热系数下 t6 点 4.3 m 的第 45 天温度图

3.7. 混凝土导热系数

对系列梯度混凝土导热系数作用下隧道左线测温孔 t6 4.3m 处温度值进行分析, 如图 16~17。

由图 16 可以看出, 不同导热系数的混凝土, 土体的温度随时间变化趋势相同, 变化速率相同, 最终达到的温度接近; 由图 17 可以看出, 三种不同导热系数的混凝土最终在积极冻结 45 天结束时, 最终土体的温度相差很小, 相差 0.001°C 左右, 说明在误差范围内, 三种不同导热系数的混凝土对最终的冻结温度场的没有影响。

4. 结论

通过有限元模型, 对盾构始发下水平冻结温度场进行参数分析, 得到结论如下:

1) 在其他条件不变的情况下, 土层加载的冻结盐水温度越低, 最终冻结结束时的温度就越低; 土层的导热系数越大土体温度下降越快, 最终冻结结束时的温度就越低; 土层的比热容越小土体温度下降就越快, 最终冻结结束时的温度就越低。冻结盐水温度每差距 2°C、土层导热系数与比热容在每差距 50% 的情况下最终在积极冻结 45 天时温度差分别为 2°C、3°C 与 2°C; 说明冻结盐水、土层比热容与导热系数对温度场影响较大。

2) 在其他条件不变的情况下, 土层的起始温度越低, 前期土体温度下降越慢, 最终冻结结束时的温度就越低; 土层的相变潜热越低, 最终冻结结束时的温度就越低。起始平均地温每差距 2°C 与相变潜热在每差距 50% 的情况下最终在积极冻结 45 天时温度差分别在 0.1 与 0.2°C, 说明起始平均温度、相变潜热对冻结效果影响较小。

3) 在其他条件不变的情况下, 混凝土的导热系数在每差距 50% 的情况下最终在积极冻结 45 天的温度差在 0.001°C~0.002°C, 在误差允许的条件下可视为混凝土的参数对最终冻结没有影响。

参考文献

- [1] 胡向东, 陈锦, 汪洋, 李伟平. 环形单圈管冻结稳态温度场解析解[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 874-880.
- [2] 袁云辉, 杨平, 江天玺. 复杂环境下浅埋暗挖隧道穿越薄富含水层冻结温度场研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 388-393.
- [3] 盛天宝, 魏世义. 特厚黏土层多圈孔冻结壁温度场实测研究与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8):

1516-1521.

- [4] 李攀, 谢雄耀, 季倩倩. 上海长江隧道冻土帷幕温度场动态演化机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 515-521.
- [5] 石荣剑, 岳丰田, 张勇, 陆路. 盾构地中对接冻结加固模型试验(I)——冻结过程中地层冻结温度场的分布特征[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 368-376.
- [6] 焦华喆, 孙冠东, 陈新明, 李振华, 任安圣. 深厚冲积层多圈孔冻结壁温度场发展研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 443-449.
- [7] 向亮, 王飞, 靳宝成, 欧阳奥辉. 红砂岩地层联络通道冻结法施工温度场分布研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 306-311.