

泥水平衡盾构仓内水平冻结温度场的模型试验

石 湛¹, 章铁军¹, 李美香², 陶司记¹, 伯 音¹, 李云波³

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430014; 2. 南京市江宁区堤防水库管理所, 江苏 南京 211103;
3. 江苏力恒工程咨询有限公司, 江苏 南京 210014)

摘 要: 为了获得盾构解困冻结过程中泥水仓内温度场的演变规律, 以南京市江宁区新济洲供水管线过江廊道盾构解困工程为原型, 依据相似理论进行了盾构内部水平冻结温度场的模型试验, 研究大孔距冻结过程中泥水仓内温度场演变过程及分布特征, 获得如下结论: 通过盾构超前地质探孔和注浆孔布置的 20 根冻结管, 在冻结管最大间距为 3.12 m 条件下, 75 d 时可将直径为 6 480 mm 的盾构泥水仓内冻实, 而冻结施工至 135 d 后泥水仓内冻土平均温度达到 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, 纵向温差约为 $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 整体冻结效果较均匀, 满足盾构开仓时的封水和承载要求。冻结施工中临时停冻会导致泥水仓内冻土冷量重新分布, 停冻 10 h 时整体冻结壁温度升高至 $-14\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而重新冻结 20 h 后冻结壁即可恢复到停冻前状态。冻结结束 45 d 后盾构泥水仓内冻土平均温度升高至 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 满足盾构复推施工要求, 而冻结管位置冻土温度回升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 还需要约 20 d, 并在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近维持约 125 d。施工中可采取强制解冻或循环泥浆等辅助措施来加快盾构泥水仓内冻土的解冻速度, 洞内水平冻结方法是构建盾构仓内常压检修环境的有效地层改良手段。

关 键 词: 人工冻结; 泥水平衡盾构; 盾构解困; 泥水仓内冻结; 模型试验

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2025) 05-1534-11

Model test of horizontal freezing reinforcement in mud tank of slurry balanced shield

SHI Zhan¹, ZHANG Tie-jun¹, LI Mei-xiang², TAO Si-ji¹, BO Yin¹, LI Yun-bo³

(1. Changjiang Survey, Planning and Design Research Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430014, China;
2. Nanjing Jiangning District Dike Reservoir Management, Nanjing, Jiangsu 211103, China;
3. Jiangsu Liheng Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210014, China)

Abstract: In order to obtain the temperature field evolution in the mud silo during the freezing process for shield rescue, a model test of horizontal freezing inside the shield was designed based on similitude theory. This was applied to the tunneling project in the Yangtze River corridor of the Xinjizhou water supply pipeline in Jiangning District, Nanjing. The temperature evolution and distribution characteristics in the mud silo during freezing were studied, leading to the following conclusions. Firstly, using 20 freezing pipes arranged through geological exploration and grouting holes, the slurry chamber of the shield (diameter 6 480 mm) could be completely frozen within 75 days, with a maximum pipe spacing of 3.12 m. After 135 days of freezing, the average temperature of the frozen soil in the slurry chamber reached $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, with a longitudinal temperature difference of approximately $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. The overall freezing effect was uniform, meeting the water sealing and bearing requirements for shield chamber opening, thus facilitating shield rescue construction. Secondly, temporary suspension of freezing during construction led to temperature redistribution in the frozen soil of the slurry chamber. A 10-hour suspension caused the frozen wall temperature to rise to $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, but it returned to its pre-suspension state after 20 hours of resumed freezing. Thirdly, 45 days post-freezing, the average temperature of the frozen soil in the shield slurry chamber rose to $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, meeting the requirements for shield re-pushing construction. It took about 20 days for the frozen soil temperature at the freezing pipe position to rise back to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, remaining around $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ for approximately 125 days. During construction, auxiliary measures like forced thawing or circulating mud can accelerate the thawing of frozen soil in the shield's slurry chamber. The horizontal freezing method in tunnels is an effective technique for improving formation to construct a maintenance environment in the shield chamber.

Keywords: artificial ground freezing; slurry balanced shield; shield relief; freezing in mud tank; model test

1 引言

盾构法是隧道建设中常用的施工方法,可以解决隧道建造过程中软弱地层变形的控制难题^[1]。当盾构连续推进距离长,或者遭遇不良地质条件时,常常需要应急开仓进行盾构设备检修^[2],而人工冻结改良地层是构建常压开仓环境的有效手段,特别是盾构处于江、河底等不具备地面施工条件的水下环境时^[3],盾构内部施工的水平冻结方法常常是地层改良的唯一手段^[4]。为了保证盾构复推之后的工作状态,冻结钻孔不能损伤盾构设备,受到泥水平衡盾构结构限制^[5],施工中仅能利用盾构周围注浆孔和内部超前地质探孔在盾构泥水仓内部及周围布置少量冻结管,造成冻结管间距大且布置方式不规则,而且盾构结构钢质材料导热性能与地层差异较大,改变了冻结过程中冷量传递的路径和效果,这也会影响泥水仓内冻土形成过程。所以,施工中判断泥水仓内冻结效果必须掌握冻结过程中温度场的演变规律和分布特征。

考虑盾构周围复杂施工环境及盾构结构对冻结施工过程的影响,众多学者对盾构周围冻结温度场的分布特征开展了一系列研究。作为施工中冻结效果评价的关键因素^[6],冻结温度场分布特征不仅受冻结管布置方式影响^[7],而且盾构隧道断面形式^[8]、施工地层地质条件^[9-10]以及冻结冷媒温度^[11]等因素都会显著影响冻结壁形成过程,特别是盾构结构引起附近地层条件改变而产生地下水渗流^[12],会改变盾构周围形成冻结壁的形状和冻结效果,甚至影响盾构周围地层稳定性^[13]。所以孙佳琪^[14]、王星童^[15]等通过建立三维数值模型,分析盾构周围冻结管间距、地层条件等施工因素对盾构接收端水平杯型冻结壁温度场演变过程的影响规律,而王杰^[16]、王星童^[17]、Kang^[18]等还通过盾构周围杯形冻结壁温度场发展过程的现场实测,分析水泥改良地层、冻结管布置方式以及冷媒温度对冻土形成效果影响,获得盾构接收端冻结温度场演化规律和分布特征。胡向东等^[4]在海底盾构故障修复施工中,采用水平和垂直冻结管结合的局部冻结技术,在盾构周围形成罩形冻土帷幕,从而实现海底盾构常压修复施工。模型试验方法也是冻结温度场研究的有效手段,Wang^[19]、李方政^[20]等分别通过单根、梅花型布置的双排管等型式的模型试验,分析冻结管布置方式对冻土形成过程影响,获得冻结过程中温度场时空演变规律。吉植强^[21]、孙立强^[22]等通过不同冻结管布置参数的模型试验,分析地下水渗流对冻结过程

影响,获得冻结过程中冻结壁厚度变化规律,提出冻结壁交圈时间的计算方法。刘欣^[23]、苏彦林^[24]等依托北京地铁联络通道工程设计了不同冻结管布置方式的模型试验,进一步研究地下水渗流速度对冻结壁形成过程的影响程度。石荣剑等^[25-26]以盾构对接冻结加固工程为背景,首次进行多圈倾斜冻结管的模型试验,分析冻结过程中冻结温度场分布特征,获得了盾构对接冻结过程中冻结壁发展速度、冻结壁厚度及发展时间等参数的计算方法,为盾构对接施工中的地层加固提供了新思路。

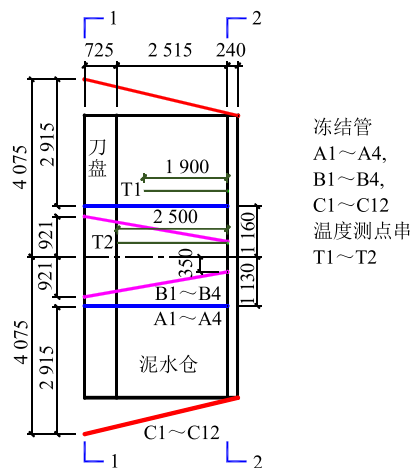
已有研究成果表明,冻结管布置方式和盾构结构都会对冻结温度场演化过程和分布特征产生显著影响,从而影响冻结过程和施工效果^[27]。盾构接收端冻结工程的冻结管多是布置在盾构周围土体内,而盾构对接和修复工程中冻结管布置方式受到盾构结构限制,多是竖直或者倾斜布置,从而在盾构外侧地层中形成不同形状的冻结帷幕。南京新济洲供水廊道工程中的盾构检修过程需要构建长时间、较大范围的动火施工环境,而且盾构开仓位置处于长江航道下,不具备地面施工条件而只能通过盾构内部水平冻结方法,将盾构泥水仓内泥浆全部冻实而构建盾构常压开仓条件,这是盾构应急解困的地层加固新方法^[28]。受到泥水平衡盾构结构的限制,仅能在泥水仓内部和周围布置少量近水平冻结管,造成冻结管间距偏大而且分布极不均匀,盾构泥水仓内部结构和较大冻结管间距都会影响冻土形成过程和温度场分布特征,而温度场研究成果是判断盾构泥水仓内冻结效果和常压开仓节点时间的基础,所以通过冻结模型试验研究获得温度场的演变规律和分布特征,为工程应用中冻结效果分析提供理论基础,研究成果也可供类似研究和工程施工时参考。

2 试验设计

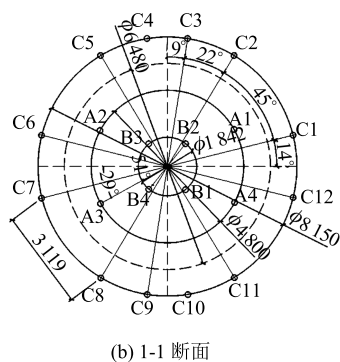
2.1 依托冻结工程情况

南京市江宁区新济洲越江供水管线廊道工程采用直径为 6 480 mm 的泥水平衡盾构施工,当掘进至 720 环时需要临时停机开仓检修。根据地质勘察资料,盾构停机位置埋深为 23 m,刀盘顶部约 1/4 范围处于②_{6a} 含砾中粗砂地层,下部 3/4 范围处于④_{2p} 破碎状中风化闪长岩,需要将盾构泥水仓冻实来隔绝外部地下水,并平衡中粗砂层中的水土压力,实现盾构常压开仓检修。受到复合式泥水平衡盾构结构限制,共布置 20 根近水平冻结管,其中利用盾构周围注浆孔布置 C1~C12 冻结管 12 根,与盾壳开孔角度为 13.5°,向四周发散布置。利用盾构面

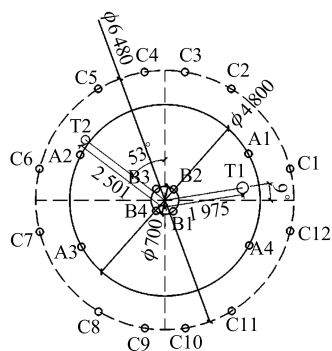
板上超前水平地质钻孔布置 A1~A4 冻结管 4 根, 在盾构回转中心四周布置 B1~B4 冻结管 4 根, 与水平方向呈 10° 角并向四周散布置, 工程中冻结设计方案如图 1 所示^[28]。所有冻结管长度均至盾构刀盘位置, 而终孔断面上冻结管之间的最大间距达到 3.12 m, 远大于常规施工中的冻结管间距, 这些因素都会显著影响冻土形成的过程和温度场的分布特征。



(a) 冻结孔布置侧视图



(b) 1-1 断面



(c) 2-2 断面

图 1 依托工程的冻结孔布置图^[28] (单位: mm)

Fig.1 Layouts of freezing hole^[28] (unit: mm)

2.2 模型试验设计

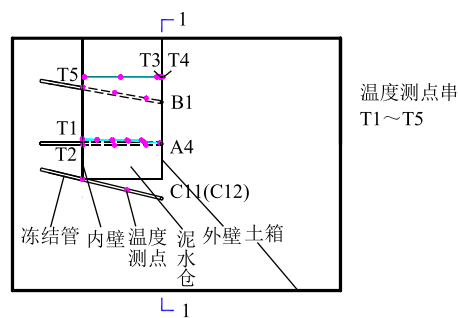
基于冻结工程施工参数, 按照相似准则进行模型试验设计^[29], 罗列试验过程中温度场主要影响参数, 获得方程:

$$F(D, L, T_C, T_0, T_f, E, c_n, \lambda_n, t) = 0 \quad (1)$$

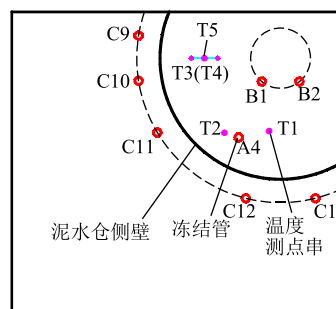
式中: D 为冻结管直径 (m); L 为冻结管间距 (m); T_C 为盐水温度 ($^\circ\text{C}$); T_0 为初始地温 ($^\circ\text{C}$); T_f 为冻结相变温度 ($^\circ\text{C}$); E 为冻结壁厚度 (m); c_n 为地层比热 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$); λ_n 为地层导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$); t 为冻结时间 (h)。

利用量纲因次分析法确定主要相似准则, 其中温度准则为 $\pi_1 = T_0/T_C$, $\pi_2 = T_f/T_C$, 几何准则为 $\pi_3 = L/D$, $\pi_4 = E/D$ 。根据冻结管尺寸确定试验几何尺寸 l 相似常数 C_l 为 4.45, 则时间 t 缩比 $C_t = C_l^2 = 19.8$, 温度 T 缩比 $C_T = 1$ 。模型所用材料与原型相同, 所以密度 ρ 缩比 C_ρ 、导热系数 λ 缩比 C_λ 、比热 c 缩比 C_c 和土体结冰潜热 ψ 缩比 C_ψ 均为 1。

模型试验在 $2\,350\text{ mm} \times 2\,300\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$ 土箱内进行, 盾构泥水仓结构采用钢板加工, 土箱四周采用 50 mm 厚橡塑保温棉进行双层保温, 构建与工程原型相似的边界条件。根据结构对称性选取工程的右下部分约 1/4 范围进行模型试验, 如图 2 所示。试验土样选取工程中的②_{6a} 含砾中粗砂地层,



(a) 测点布置侧视图



(b) 1-1 断面

图 2 模型试验设计图

Fig.2 Model test design diagrams

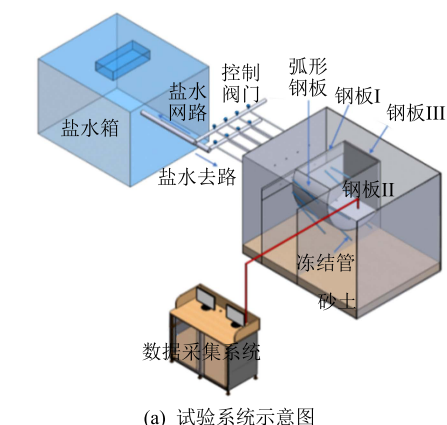
土体密度为 $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 含水率为 32%, 而盾构泥水仓内填充施工中使用的循环泥浆。

2.3 温度测点布置

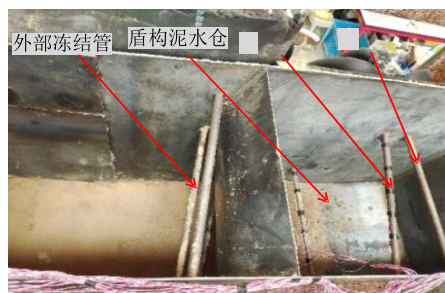
为了分析冻结过程中泥水仓内温度场演变过程, 在工程中测温孔对应位置设置 T1、T2 温度测点串, 间距 110 mm 各布置 6 个温度测点。在冻结管间距最大位置布置测温串 T5, 间距 160 mm 布置 3 个测点, 同时在泥水仓外壁位置的内、外表面对称布置 T3、T4 测点串, 横向间距 80 mm 各布置 3 个温度测点, 来分析冻结过程中泥水仓内冻土扩展范围和隔板内、外温度差别。选择 C12、A4 和 B1 冻结管外壁布置了 3 个温度测点, 监测试验过程中盐水温度变化, 所有温度测点从盾构泥水仓内壁开始依次编号, 具体测点布置如图 2 所示。

2.4 试验过程

利用钢板加工盾构模型, 在泥水仓模型周围分层填装现场取样地层, 并在设计位置布设温度测点。土箱内装土完成加载固结后, 连接冷冻系统和温度测试系统, 进行冻结模型试验。试验过程中盐水温度控制在 -30°C , 积极冻结 190 h 后, 模拟盾构泥水仓内清理需要切断冻结管而临时停止冻结 10 h, 然后再恢复冻结, 至 290 h 后结束冻结, 进行盾构泥水仓内冻土自然解冻, 模型试验共进行了 540 h。试验过程中对冻结管壁温度和土体温度进行全程连续自动监测, 如图 3 所示。



(a) 试验系统示意图



(b) 冻结管和温度测点布置



(c) 填土过程

图 3 冻结模型试验系统图

Fig.3 Freezing system diagrams in model test

3 试验过程数据分析

3.1 冻结管壁的温度变化

模型试验过程中, 盐水干管去、回路和冻结管壁温度变化如图 4 所示。

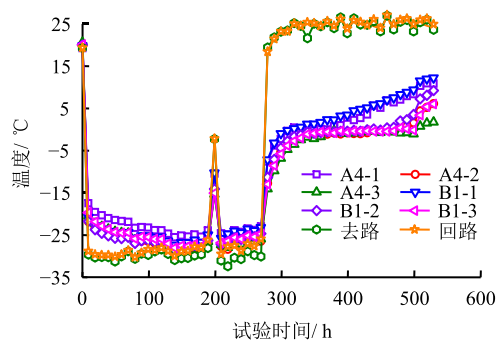


图 4 冻结管壁温度变化曲线

Fig.4 Temperature change curves during freezing of pipe wall

从图 4 可看出, 冻结模型试验开始后, 盐水去、回路干管温度即降低至 -30°C 水平, 且温度波动幅度和去、回路温差均较小, 保证了模型试验的冻结效果。布置在冻结管壁上的温度测点与冻结管周围土体接触而产生导热作用, 使冻结开始时管壁温度较盐水温度偏高约 10°C 。随着冻结进行, 冻结管周围形成的冻土削弱了冻结管与周围土体之间的导热作用, 降低冻结管壁温度, 至冻结 80 h 和 170 h 时冻结管壁温度分别降低到 -25°C 和 -27°C 。冻结 190 h 停止冻结时, 冻结管壁位置测点转换为测试该位置的土体温度, 所以温度升高至 $-13\sim-15^\circ\text{C}$ 。而在恢复重新冻结后, 受到冻结管壁低温的直接影响, 测点温度立即恢复至 -27°C 左右, 并一直维持在稳定冻结状态。

试验进行至 290 h 后停止冻结, 冻结管壁上测点测试的是周围土体温度变化过程, 受冻结管低温影响, 冻结管处为泥水仓内冻土温度最低位置, 控

制冻结壁整体质量评价效果。受到冻结壁内不同位置冷量重新分布影响,停冻后土体升温过程符合对数曲线分布,停冻 55 h 后土体温度升高至 -4°C ,满足盾构复推施工要求,25 h 后才会升温至 0°C 。由于冻土中冰融化过程需要吸收相变潜热,而盾构泥水仓内泥浆含水率远高于常规地层,所以相应位置温度维持在 0°C 近 150 h。

冻结管壁上温度测点从盾构泥水仓内壁表面依次布置,其中编号 1 测点位于盾构泥水仓内壁表面,如图 2 所示。受到盾构泥水仓内壁钢板导热影响,冻结过程中端部测点温度偏高,随着冻结进行,冻结管周围形成冻土缩小了冻结管不同位置的温差。特别是在停冻后,靠近盾构泥水仓内壁钢板位置的冻土升温速度快,在 0°C 温度停留时间相对较短,这是由于盾构泥水仓内壁钢板良好的导热作用,提升土体导热能力,导致相应位置土体温度变化明显。而停止冻结后 B1 冻结管位置土体温度升温速度较 A4 冻结管快,其原因是 A4 冻结管位于冻结壁中间位置,周围冻土冷量的持续补充作用,使冻结壁升温需要更长时间,而 B1 冻结管位于冻结壁边缘,受到周围未冻土的影响加快了冻土融化过程。

3.2 盾构泥水仓内温度变化

冻结模型试验过程中,盾构泥水仓内 T1、T2 和 T5 各测点的温度变化过程如图 5 所示。其中 T2-1 的 T2 为测温串编号,1 为测点编号。

由图 5(a)中各测点的温度变化过程可看出,模型试验中冻结 50 h 时土体温度从 20°C 快速降低到 0°C ,不同测温孔内测点温度变化规律基本相同,这是由于土体冷却阶段需要冷量相对较少,与冻结管距离差异对土体降温过程影响较小,而冻结管壁与土体之间较大温差提升冷量交换效果,导致土体降温速度快,特别是靠近冻结管的 T2 测温孔,冻结 25 h 时土体温度即降低到 0°C 。当土体温度降低到负温后,形成冻土过程中水转变为冰释放相变潜热量大,地层中自由水结冰需要冷量多,而且冻土与冻结管壁温差减小降低了冷量传递效率,所以冻土降温阶段的温降速度较土体冷却阶段慢,冻土区域内降低相同温度需要更长时间,不同位置测点温度呈现较大差别。

在临时停冻阶段,不同位置测温孔内温度均出现回升现象,特别是靠近冻结管位置温度相对较低的测点,升温幅度更明显,这是由于停止向土体内供应冷量后,泥水仓内横断面上不同位置之间温差导致冷量重新分布,冷量转移过程使温度相对较低位置的土体温度回升,特别是靠近冻结管较近位置

的 T2 测点,由于温度偏低而升温近 10°C ,如图 5(b)所示,而距离冻结管相对较远的 T5 位置土体温度仅回升约 3°C ,具体见图 5(c)。停冻后,冻结系统不再向土体内输入冷量使地层温度升高迅速,40~60 h 后测温孔内测点温度升高至 0°C ,并在 0°C 附近维持较长时间,这是由于冰融化后吸收相变潜热平衡了外部土体传递的热量,盾构泥水仓内泥浆含水率远大于周围地层,使温度维持在 0°C 附近的时间超过 100 h。

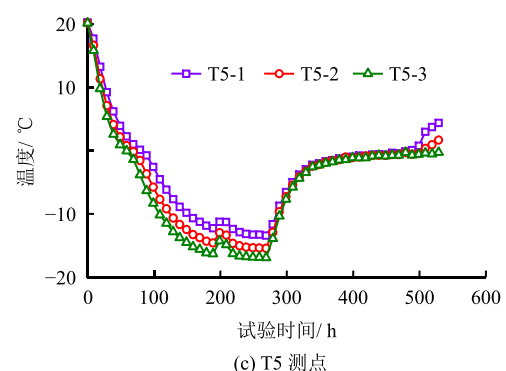
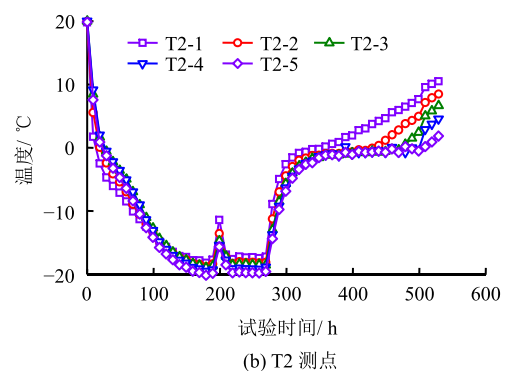
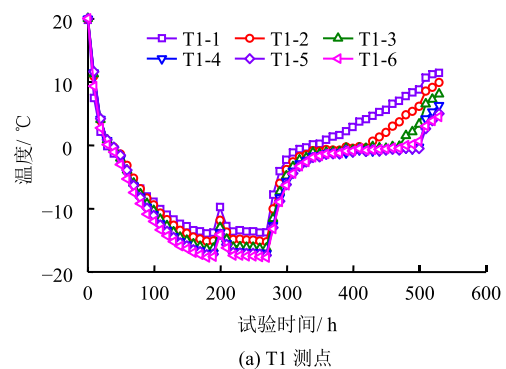


图 5 泥水仓内温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curves of mud silo

对于同一测温孔内测点来说,如图 5(a)所示,随着远离盾构泥水仓内壁而测点温度依次降低,冻结 190 h 时纵向测点间温度相差约 4.4°C ,冻结壁纵向呈现明显不均匀,这是由于发散冻结管布置条

件下,不同横断面上测点与冻结管距离的差别造成的。而位于盾构泥水仓内壁位置测点,受到泥水仓内壁钢板散热影响,温度偏高约 3°C 。停止冻结后形成冻土的差异性也会影响解冻过程,受到盾构泥水仓内壁散热影响,靠近泥水仓内壁位置测点温度回升较快,而且随着与盾构泥水仓内壁距离增加,土体温度在 0°C 状态维持时间逐渐延长,升温幅度逐渐变小,其原因是冻土温度升高会受到周围土体影响,远离盾构泥水仓内壁位置的土体体积大,周围土体内冻土升温需要冷量多,导致土体温度在 0°C 附近维持较长时间。而对于T5-1测点来说,如图5(c)所示,由于其距离盾构泥水仓内壁钢板仅 100 mm ,测点周围冻土融化后水分持续补充,造成测点温度维持在 0°C 更长时间,这说明了盾构泥水仓钢板导热性能差异性,也会影响泥水仓内部冻土形成过程和冻结效果。

3.3 盾构泥水仓外壁边界的温度变化

冻结过程中,位于盾构泥水仓外壁内、外对称位置的T3、T4测点温度变化如图6所示。

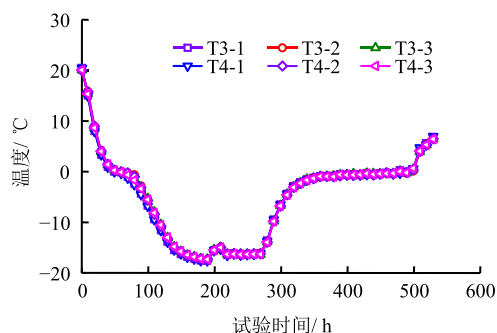


图6 T3、T4测点温度对比曲线

Fig.6 Comparison of temperature of T3 and T4

T3、T4位置对应的3个测点分别位于盾构泥水仓外壁的内、外表面,冻结模型试验过程中6个测点温度变化过程基本一致,如图6所示,其原因是由于盾构泥水仓外壁钢质材料良好的导热性能,使试验过程中外壁钢板表面的温度变化过程基本一致,而钢板向内、外两侧土体内的导热作用使横向间距为 800 mm 的3个测点以及内外测点之间的温度相差不大。所以,施工中冻土帷幕扩展到泥水仓周围一定范围内,会提升泥水仓外壁与冻土之间胶结效果,避免外壁与冻土交接结面上产生渗水通道。

从测点温度变化过程来看,与横断面上位置相近的T5测温串温度对比分析可见,在地层冷却阶段,T3和T4位置测点降温速度较T5测点快,这

是由于泥水仓外壁钢质材料良好的导热作用,加快了土体降温速度。而在 75 h 之后冻土降温阶段,3个测点降温过程基本一致,这是由于冻土温度降低缩小了泥水仓外壁与外部冻土之间的温差,以及盾构结构钢质材料良好导热作用的影响。冻结 190 h 之后停冻期间,临时停冻 10 h 内T3和T4测点温度回升约 2.5°C ,这是因为泥水仓外部冻土相对较均匀,临时停冻后冷量重分布过程使温度回升幅度较泥水仓内部小。而在冻结模型试验停止后,由于T3和T4测点均位于盾构泥水仓与周围土层之间,周围环境影响作用相对较弱,测点温度均在 0°C 附近维持较长时间。所以,盾构泥水仓钢质外壁良好的导热作用会影响土体降温及冻土形成过程,缩小周围冻土之间的温差,但是对冻土解冻过程影响不大。

4 讨 论

4.1 盾构泥水仓内冻结壁的温度分布特征

冻结过程中,不同时刻盾构泥水仓内中间横断面上温度分布云图如图7所示。

从图7(a)可以看出,冻结 90 h 时(相当于工程原型中 75 d),盾构泥水仓内温度均降低到 -0.15°C 以下,说明泥水仓内部全部形成冻土,隔绝了泥水仓与外部的水力联系。而整个断面上温度梯度相对较大,冻结壁呈现显著不均匀,温度最高的薄弱点位于B1、C9和C10冻结管之间,而间距最大的C11、C12冻结管位置的薄弱环节位于盾构泥水仓外部,对泥水仓内部冻结效果影响不大。所以冻结管布置方式是影响泥水仓内温度分布的关键因素,与冻结管距离不同造成不同位置土体温度的差异,导致泥水仓内形成冻土温度分布的不均匀。

如图7(b)所示,随着试验进行,泥水仓内温度进一步降低,而且横断面上温差进一步缩小,至 163 h (相当于工程中冻结 135 d 盾构开仓)时,泥水仓内温度最高点温度下降 14.1°C ,横断面上最大温差也降低至 16°C 。而停冻之后不再向泥水仓内供应冷量,未冻区内的热量传递使冻土温度持续升高直至进入融化状态,如图7(c)所示,330 h时横断面上最低点的温度升高至 -3.5°C 。

对比不同时刻盾构泥水仓横断面上温度云图可看出,冻结过程中断面上薄弱点位置基本保持不变,这也说明冻结管分布形式是影响冻结壁内温度分布的关键因素,而冻结壁内薄弱位置是评价冻结壁形成质量的关键因素,施工中应在薄弱点位置布置温度测点,来掌握其温度变化过程。随着冻结进行,盾构泥水仓横断面上温差持续减小的原因,是

因为土体温度降低缩小了冻土与冻结管壁之间温差,从而削弱冷量传递效果,进一步减小不同位置之间的温差。特别是停止冻结后,缺少冷源持续输入使温度最低的冻结管位置升温速度快,导致不同位置之间温差不断减小,直至共同进入融化状态。

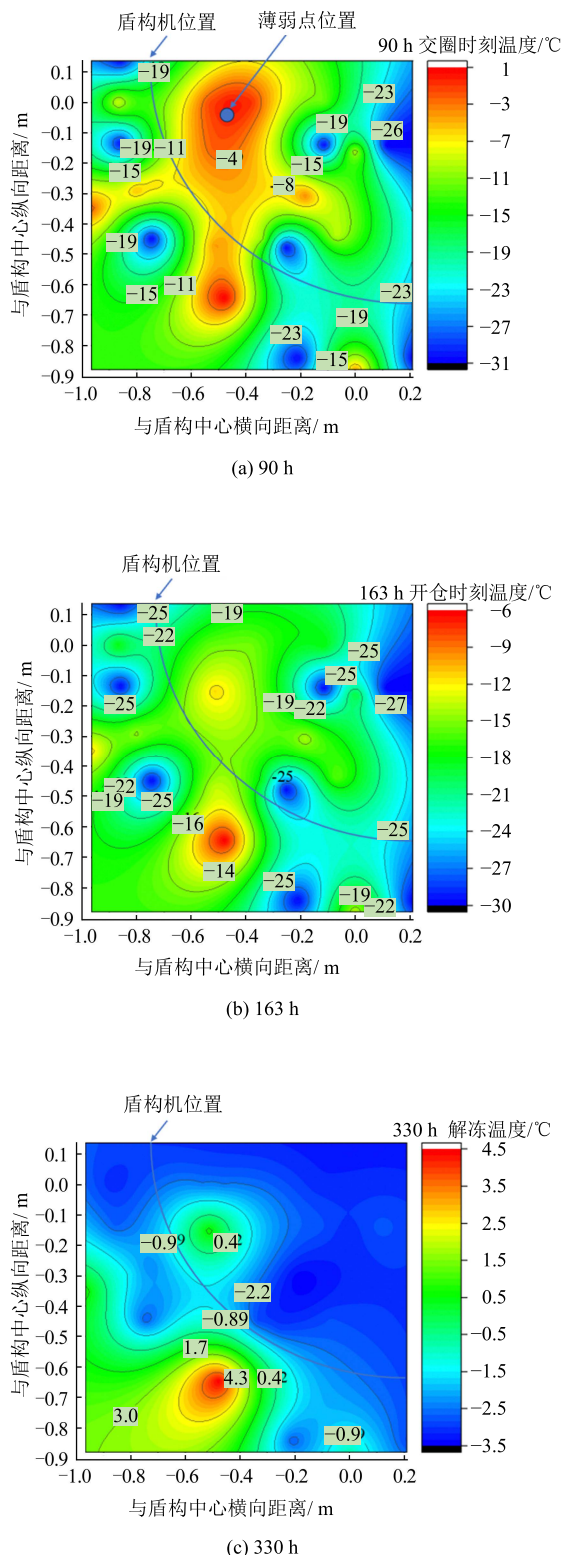


图7 不同冻结时刻泥水仓内温度分布云图
Fig.7 Temperature distributions in mud silo

4.2 盾构泥水仓内纵向温度分布特征

为了比较盾构泥水仓内纵向温度差别,对比分析 T1、T2 和 T5 测温孔在泥水仓交圈(90 h)和盾构开仓(163 h)时的温度分布,如图 8 所示,图中直线为数据拟合线,其中虚线和实线分别表示交圈时刻、开仓时刻。

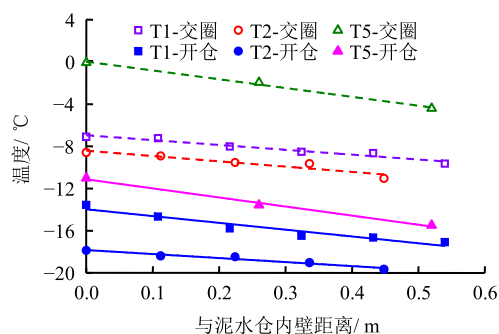


图8 泥水仓内纵向温度分布图
Fig.8 Longitudinal temperature distribution in mud silo

从图 8 可看出,受到盾构泥水仓内壁钢质材料导热影响,靠近泥水仓位置测点温度偏高,是泥水仓内形成冻土的薄弱断面。在泥水仓内形成封闭冻土的交圈时刻,靠近泥水仓内壁位置 T1、T2 和 T5 测点温度分别为 -7.50 、 -8.20 、 -0.15 $^{\circ}\text{C}$,不同测点之间温差是与冻结管距离不同造成的,温度最高的 T5 测点距离冻结管最远。随着冻结进行,各测点温度持续降低,在盾构开仓时相应位置测点温度分别降低至 -13.50 、 -17.90 、 -11.00 $^{\circ}\text{C}$,不同测点之间最大温差也从 8.05 $^{\circ}\text{C}$ 缩小至 6.90 $^{\circ}\text{C}$ 。

沿盾构泥水仓纵向,随着测点远离泥水仓内壁而温度逐步降低,造成纵向上温度存在差别,特别是温度最高位置的 T5 测点纵向温差最大。在冻结 90 h 的交圈时刻, T5 横向 0、0.26、0.52 m 位置测点温度分别 -0.15 、 -1.96 、 -4.41 $^{\circ}\text{C}$,至冻结 163 h 时的开仓时刻, T5 相应位置测点温度降低至 -11.02 、 -13.58 、 -15.40 $^{\circ}\text{C}$,不同时刻的纵向最大温差均为 4.4 $^{\circ}\text{C}$ 左右,这也说明测点位置与冻结管距离是影响温度分布的关键因素。

从盾构泥水仓内整体温度分布来看,不同测点位置纵向温度均呈线性降低,可通过下式进行拟合:

$$T = -al_l - b \quad (2)$$

式中: l_l 为与盾构泥水仓内壁的距离 (m); a 、 b 均为回归参数,相应测点位置的回归参数如表 1 所示。

表 1 回归参数汇总

Table 1 Summary of regression parameters

测点	冻结时刻	a	b	决定系数 R^2
T1	冻结壁交圈	5.03	8.42	0.892
	盾构开仓	6.45	13.97	0.925
T2	冻结壁交圈	3.80	17.83	0.954
	盾构开仓	4.62	6.95	0.953
T5	冻结壁交圈	8.34	0.03	0.994
	盾构开仓	8.59	11.13	0.993

从表 1 中表征温度梯度参数 a 的数值可以看出, 距离 A4 冻结管最近的 T2 测点纵向温差最小, 而距离相对较远的 T5 测点的温度较高、纵向温度梯度较大, 这再次说明与冻结管距离差异是影响泥水仓内纵向温度分布的关键因素。随着冻结进行, 不同位置上纵向温度梯度变化幅度较小, 特别是远离冻结管的 T5 测点位置处温度梯度基本保持不变。可用横向平均温度来表征冻结壁不同位置的冻结效果, 冻结过程中不同路径上纵向平均温度如表 2 所示。

表 2 不同路径上的纵向平均温度

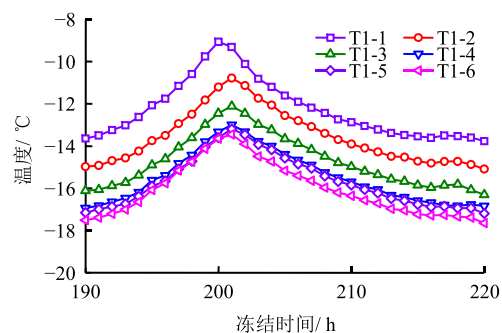
Table 2 Longitudinal average temperature on different paths

冻结时间 /h	纵向平均温度/℃		
	T1	T2	T5
90	-8.4	-9.8	-2.2
163	-15.3	-18.7	-13.3
190	-16.2	-18.8	-14.3

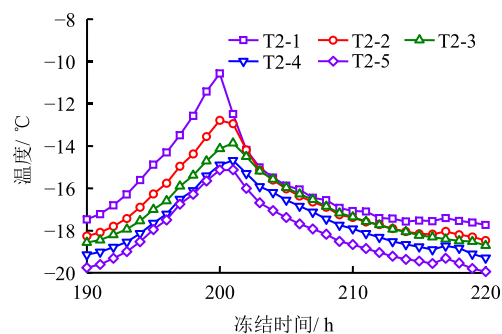
由表 2 可看出, 受到与冻结管距离差异影响, 在泥水仓冻实 90 h 时, 不同位置纵向平均温度最大相差 7.6℃。随着冻结进行平均温度差别逐渐减小, 冻结至 163 h (盾构开仓时间) 时, 冻结壁横断面上平均温度均低于 -13℃, 不同位置的平均温度最大差值为 5.4℃。而冻结至 190 h 时, 最高平均温度和差值分别降低到 -14.3、4.5℃, 冻结壁横断面上温度分布相对较均匀。而在最后冻结阶段的近 30 h 时间, 冻结壁平均温度下降约 1℃, 这说明冻结至 160 h 后, 冻结壁平均温度下降不明显, 冻结时间延续不会显著改变盾构泥水仓内冻结效果, 工程中应合理确定冻结壁设计平均温度和盾构开仓时间。

4.3 临时停冻期间冻土温度变化过程

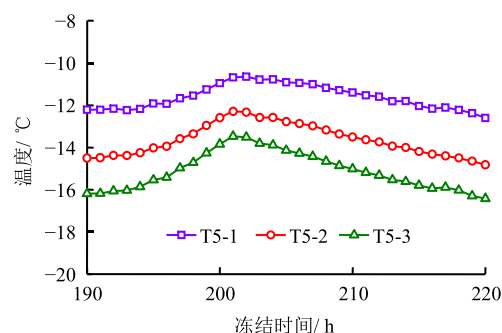
盾构检修过程中清理泥水仓时需要截断冻结管, 造成临时停止冻结工况。试验中冻结至 190 h 停止冻结 10 h 后, 再恢复冻结, 相应 T1、T2、T5 测点和管壁温度变化曲线如图 9 所示。



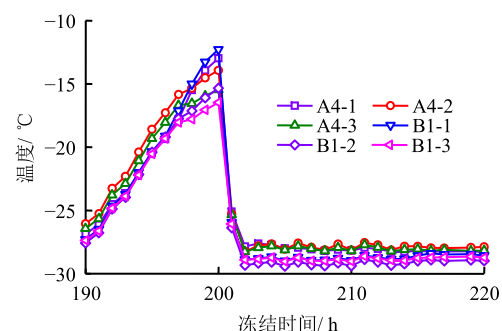
(a) T1 测点



(b) T2 测点



(c) T5 测点



(d) 冻结管壁

图 9 临时停冻期间测点温度变化曲线

Fig.9 Curves of temperature change at measuring points during temporary stoppage of freezing

由图 9 可以看出, 停止冻结后不再向泥水仓内输入冷量导致冻土温度回升, 停冻 10 h 时距离冻结管较近的 T2 测点温度最大回升 5.5℃ (图 9(b)中 T2-1 测点), 这是由于停止冻结后温差导致冻结壁

内部温度重新分布,不同位置处冻土温度回升至 $-14\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,使冻结壁内温度分布较均匀。随着停冻时间延长,盾构纵向测点之间温差少许缩小,而靠近盾构泥水仓内表面测点温度回升幅度较大,这是受到盾构泥水仓纵向上温差导致的冷量在冻结壁纵向上重分布后的表现。而恢复冻结后,泥水仓内表面位置处测点温度先行降低,这也是受到盾构结构钢质材料良好导热性能影响,使土体温度下降明显,所以工程中不能忽视盾构结构对冻结过程的影响。

对比不同测点温度变化过程可以看出,停止冻结后不同测点温度回升过程相差不大,而恢复冻结后土体温度降温过程出现较大差别,这是因为停止冻结后没有外部冷源输入,土体温度变化仅是不同温度土体之间温差引起的冷量交换,而盾构泥水仓内横断面上温差相对较小,所以不同位置上升温过程基本一致。恢复冻结后土体温度降低主要由冻结管位置输入冷量引起冷量传递的结果,所以距离冻结管较近的 T2 测点降温幅度大,10 h 后土体温度即可恢复到停止冻结前状态,而距离冻结管最远的 T5 测点位置是冻结壁横断面上的薄弱环节,20 h 后才会恢复到停冻前状态,这说明从盾构泥水仓内形成冻结壁的整体状态来说,重新冻结 2 倍的停冻时间才会使整体冻结壁均恢复到停冻前状态。图 9(d)中恢复冻结 2 h 时测点温度即可达到停冻前状态的原因,是由于相应测点位于冻结管壁,冻结开始后测点测试获得的温度为冻结管壁温度,所以温度降低速度快。

5 结 论

依托南京市江宁区新济洲越江供水管线廊道工程,通过冻结模型试验研究盾构泥水仓内冻土形成过程及温度分布特征,获得以下结论:

(1) 直径为 6 480 mm 泥水平衡盾构洞内布置 20 个水平冻结管的新冻结方法,可在 90 h (相当于工程原型中 75 d) 后将泥水仓内冻实,再冻结 73 h (工程原型中冻结时间为 135 d) 时泥水仓内的冻结壁平均温度降低至 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足盾构常压开仓施工要求。

(2) 盾构泥水仓内、外壁钢质结构的导热作用会显著影响冻土形成过程,而冻结管位置是影响冻结壁内温度分布的关键因素。泥水仓纵向上的冻结壁温度成线性降低趋势,纵向最大温差约为 $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 停冻 10 h 后盾构泥水仓内冻土温度均升高至 $-14\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而重新冻结 20 h 后冻结壁整

体状态可恢复至停冻前水平,2 倍停冻时间的积极冻结作用可弥补停冻对冻结壁削弱的影响。

(4) 冻结结束 55 h (工程原型 45 d) 后泥水仓内最低温度回升至 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足盾构复推施工要求。泥水仓内全部升温至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 还需要 25 h (工程原型 20 d),并在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近维持约 150 h (工程原型 125 d),施工中采取强制解冻或泥浆循环等辅助措施,加快盾构泥水仓内解冻,可尽早满足盾构复推条件。

参 考 文 献

- [1] 刘勇,周怡晟,索晓明,等. 盾构下穿高铁路基变形规律模型试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 941-951.
LIU Yong, ZHOU Yi-sheng, SUO Xiao-ming, et al. Model test on the deformation law of shield tunnel underpassing high speed railway roadbed[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(4): 941-951.
- [2] ZHANG J L, GAO Y M, LIU X, et al. A shield tunneling method for enlarging the diameter of existing tunnels: experimental investigations[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 128, 104605.
- [3] 钱七虎. 水下隧道工程实践面临的挑战、对策及思考[J]. 隧道建设(中英文), 2014, 34(6): 503-507.
QIAN Qi-hu. Challenges in construction of countermeasures, and reflections on the practice of underwater tunnels and countermeasures[J]. **Tunnel Construction**, 2014, 34(6): 503-507.
- [4] 胡向东, 龙良辉. 海底盾构修复冻结加固技术[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 537-42.
HU Xiang-dong, LONG Liang-hui. Repair and freezing reinforcement technology for underwater shield tunneling[J]. **Journal of Underground Space and Engineering**, 2010, 6(3): 537-42.
- [5] 蔡博文, 金大龙, 李兴高, 等. 盾构气压开舱条件下的泥膜闭气失效理论研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1395-1404.
CAI Bo-wen, JIN Da-long, LI Xing-gao, et al. Theory of failure of filter cake airtightness during chamber opening in a pressurized shield[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(5): 1395-1404.
- [6] 陈湘生. 冻结法几个关键问题及在地下空间近接工程中最新应用[J]. 隧道建设(中英文), 2015, 35(12): 1243-1251.
CHEN Xiang-sheng. Several key issues of freezing method and its latest application in underground space proximity engineering[J]. **Tunnel Construction**, 2015,

- 35(12): 1243-1251.
- [7] PIMENTEL E, PAPAKONSTANTINOU S, ANAGNOSTOU G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunnelling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2012, 28: 57-69.
- [8] 张明, 陈军浩. 水平冻结法施工超大断面隧道的技术研究与应[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2016, 36(4): 27-32.
- ZHANG Ming, CHEN Jun-hao. Technical research and application of horizontal freezing method for constructing super large cross-section tunnels[J]. **Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2016, 36(4): 27-32.
- [9] RUSSO G, CORBO A, CAVUOTO F, et al. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil: measurements and back analysis[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2015, 50: 226-238.
- [10] AFSHANI A, AKAGI H. Artificial ground freezing application in shield tunneling[J]. **Japanese Geotechnical Society Special Publication**, 2016, 3(2): 71-75.
- [11] 石荣剑, 岳丰田, 张勇, 等. 液氮冻结管壁温度的分布规律[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 31(1): 12-18.
- SHI Rong-jian, YUE Feng-tian, ZHANG Yong, et al. Temperature distribution law of freezing pipe wall in liquid nitrogen freezing[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2013, 31(1): 12-18.
- [12] 尹鑫晟, 舒营, 梁禄钜, 等. 考虑渗流的饱和粉土地层盾构开挖面稳定分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(7): 2005-2016.
- YIN Xin-sheng, SHU Ying, LIANG Lu-ju, et al. Stability analysis of shield excavation surface in saturated silt strata considering seepage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(7): 2005-2016.
- [13] 周中, 陈云, 刘撞撞. 泥水盾构泥水仓泥浆压力控制模型研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 1): 286-292.
- ZHOU Zhong, CHEN Yun, LIU Zhuang-zhuang. Study on slurry pressure control model in slurry chamber of slurry shield[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Supp1.): 286-292.
- [14] 孙佳琪, 苗胜军, 隋智力. 盾构隧道接收端冻结温度场的演化规律[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3300-3308.
- SUN Jia-qi, MIAO Sheng-jun, SUI Zhi-zhi. The evolution law of freezing temperature field at the receiving end of shield tunnel[J]. **Science, Technology and Engineering**, 2022, 22(8): 3300-3308.
- [15] 王星童. 各因素对盾构进洞杯形冻结温度场影响数值模拟研究[J]. 国防交通工程与技术, 2018, 16(2): 22-26.
- WANG Xing-tong. Numerical simulation study on the influence of various factors on the temperature field of shield tunneling cup shaped freezing[J]. **Traffic Engineering and Technology for National Defence**, 2018, 16(2): 22-26.
- [16] 王杰, 杨平, 王许诺, 等. 盾构始发水泥土加固后水平冻结温度实测研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(6): 99-104.
- WANG Jie, YANG Ping, WANG Xu-nuo, et al. Experimental study on horizontal freezing temperature after cement-soil reinforcement at the beginning of shield tunneling[J]. **Modern Tunnel Technology**, 2011, 48(6): 99-104.
- [17] 王星童. 盾构进洞杯形冻结温度场现场实测研究[J]. 中国市政工程, 2018 (2): 113-116.
- WANG Xing-tong. Field measurement and research on cup freezing temperature field of shield tunneling[J]. **China Municipal Engineering**, 2018 (2): 113-116.
- [18] KANG Y S, HOU C C, LI K J, et al. Evolution of temperature field and frozen wall in sandy cobble stratum using LN₂ freezing method[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2021, 185: 116334.
- [19] WANG B, RONG C X, CHENG H, et al. Temporal and spatial evolution of temperature field of single freezing pipe in large velocity infiltration configuration[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2020, 175: 103080.
- [20] 李方政, 丁航, 张绪忠. 渗流作用下富水砂层双排管冻结壁形成规律模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 386-395.
- LI Fang-zheng, DING Hang, ZHANG Xu-zhong. Model experimental study on the formation law of frozen walls in double row pipes of water rich sand layers under seepage action[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(2): 386-395.
- [21] 吉植强, 劳丽燕, 李海鹏, 等. 渗流速度对砂土人工冻结壁的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 130-138.
- JI Zhi-qiang, LAO Li-yan, LI Hai-peng, et al. The influence of seepage velocity on artificial frozen sand walls[J]. **Science Technology and Engineering**, 2018, 18(2): 130-138.
- [22] 孙立强, 商安策, 郎瑞卿, 等. 渗流地层人工冻结壁交

- 圈时间计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(增刊 1): 3663-3673.
- SUN Li-qiang, SHANG An-ce, LANG Rui-qing, et al. Calculation method for the intersection time of artificial frozen walls in permeable formations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2023, 42(Supp1.): 3663-3673.
- [23] 刘欣, 沈宇鹏, 刘志坚, 等. 地下水流速对地铁联络通道冻结壁形成过程影响的模型试验[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2667-2678.
- LIU Xin, SHEN Yu-peng, LIU Zhi-jian, et al. Model test on the influence of groundwater seepage velocity on formation of frozen walls in subway cross passage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(9): 2667-2678.
- [24] 苏彦林, 岳祖润, 李晓康, 等. 渗流作用下砂层冻结模型试验研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(10): 94-100.
- SU Yan-lin, YUE Zu-run, LI Xiao-kang, et al. Experimental study on sand layer freezing model under seepage effect[J]. **Railway Standard Design**, 2020, 64(10): 94-100.
- [25] 石荣剑, 岳丰田, 张勇, 等. 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.
- SHI Rong-jian, YUE Feng-tian, ZHANG Yong, et al. Model test on freezing reinforcement for shield junction (Part 1): distribution characteristics of temperature field during freezing process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 368-376.
- [26] 石荣剑, 陈斌, 岳丰田, 等. 盾构地中对接冻结加固模型试验 (II) ——冻结过程中地层的冻胀效应研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2639-2646.
- SHI Rong-jian, CHEN Bin, YUE Feng-tian, et al. Model test on freezing reinforcement for shield junction (Part 2): frost heave effect of soft stratum during freezing process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(9): 2639-2646.
- [27] WANG Z, RONG C X, DU M, et al. The development law of the freezing temperature field of a calcareous clay layer[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2020, 2020: 3902054.
- [28] 石湛, 章铁军, 李美香, 等. 越江泥水平衡盾构仓内水平冻结温度场研究[J]. 人民长江, 2024, 55(10): 157-165.
- SHI Zhan, ZHANG Tie-jun, LI Mei-xiang, et al. Freezing temperature field of horizontal freezing reinforcement in mud tank of mud-water balance shield under the Yangtze River[J]. **Yangtze River**, 2024, 55(10): 157-165.
- [29] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- YANG Jun-jie. Similarity theory and structural model testing[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005.

《岩土力学》2024 年第 5 期被 EI 收录论文 (27 篇, 收录率 100 %) (1)

序号	论文题名	作者	页码
1	区域尺度地埋管地源热泵与能源地下结构开采浅层地热能评价综述	孔纲强, 常洪林, 王天赐, 等	1265—1283
2	裂隙砂岩应变场演化与超声时移衰减特征研究	张朝俊, 吴顺川, 储超群, 等	1284—1296
3	高温作用下非饱和黄土裂隙演化及其定量分析	赵再昆, 王铁行, 张 亮, 等	1297—1308
4	荷载作用下砂土边坡-管道相互作用试验研究	喻文昭, 朱鸿鹄, 王德洋, 等	1309—1320
5	不均匀卵石持力层桩端后注浆效果试验研究	王 军, 金 天, 秦 伟, 等	1321—1333
6	层状岩石不排气三轴压缩力学特性试验研究	王 伟, 罗 霄, 陈 超, 等	1334—1342
7	基于统一强度理论的扰损围岩巷道脆塑性解答	张常光, 周 渭, 徐 灏, 等	1343—1355
8	考虑系泊点深度的单点系泊系统锚桩水平承载性能理论分析	董恒年, 孔纲强, 周 杨, 等	1356—1364
9	黏弹性非饱和土中劲性复合桩纵向动力响应分析	柳鸿博, 戴国亮, 周凤玺, 等	1365—1377
10	考虑微裂纹随机分布的堆石颗粒准静态强度统计模型	闫世豪, 迟世春, 王晋伟, 等	1378—1387
11	柱状药包侧向爆破下抵抗线对岩石破碎特性的影响研究	李萍丰, 王秀龙, 闫小兵, 等	1388—1396
12	考虑衬砌截面协调变形约束的既有隧道受盾构下穿施工影响的 Fourier 能量变分解	张治国, 沃 巍, 朱正国, 等	1397—1411

(未完, 见第 1594 页)