

DOI:10.11784/tdxbz202403017

渗流下砂-黏复合地层人工冻结多场耦合研究

高国耀¹, 郭伟¹, 任宇晓¹, 祝显鹏¹, 郭文秀², 闫澍旺¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 浙江如通苏湖城际铁路有限公司, 湖州 313000)

摘要: 对滨海地层进行人工冻结时, 高盐度地下水渗流的存在将严重影响冻结范围和冻结效果. 利用 Navier-Stokes 方程来描述滨海地层中液相在渗流过程中的动量守恒, 考虑渗流过程中土颗粒表面对盐的吸附和解吸作用以及人工冻结时液相的非对流通量对水、盐相变的影响, 建立了渗流对砂-黏复合地层人工冻结过程影响的水-盐-热-力学理论模型. 基于 COMSOL Multiphysics 软件对渗流条件下砂-黏地层的水-盐-热-力学多场耦合理论模型进行求解, 理论模型的计算结果与试验结果吻合效果较好. 通过参数分析, 研究了不同渗流速度对水、盐、温度和位移等各组分空间分布的影响. 研究表明: 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在砂-黏复合地层上游土体的冻结难度加大, 导致上游的冻结区域向下游缩减, 下游的冻结区域沿着渗流向下游扩大, 砂层和黏土层中冰的前缘位置分别向下游移动了 60.3%和 26.2%; 砂层和黏土层中盐结晶前缘位置分别向下游移动了 50.4%和 26.2%; 在水、盐相变的作用下, 土体内部应力的增加导致土体位移的增加, 在砂-黏复合地层的下游, 人工冻结后黏土层的位移峰值增大了 107%; 冻结管在垂直于渗流方向上的影响范围被缩减, 在冻结管两侧 0.3 m 位置处黏土层和砂层的温度分别降低了 1.1 °C 和 2.8 °C, 黏土层和砂层的总含盐量分别增加了 8.5%和 7.4%, 黏土层和砂层中冰的产生范围分别缩小了 10.2%和 54.9%. 本文研究成果为渗流条件下的滨海地层的人工冻结施工提供了理论依据和数据支撑.

关键词: 人工冻结; 冻结管; 渗流; 砂-黏复合地层; 多场耦合理论

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)02-0208-13

Artificial Freezing Multi-Field Coupling in Sand-Clay Composite Stratum Under Seepage Conditions

Gao Guoyao¹, Guo Wei¹, Ren Yuxiao¹, Zhu Xianpeng¹, Guo Wenxiu², Yan Shuwang¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Zhejiang Rudong-Nantong-Suzhou-Huzhou Intercity Railway Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: In the artificial freezing process of costal strata, the existence of underground water seepage with a high salinity will seriously affect the freezing range and freezing effect. In this paper, the Navier-Stokes equation is used to describe the momentum conservation of liquid phase in the seepage process of coastal strata, the adsorption and desorption effects of soil particle surface on salt during the seepage process and the influence of non-convective flux of liquid phase on the phase transition of water and salt during artificial freezing are taken into account, and a water-salt-thermal-mechanical theoretical model for the influences of seepage on the artificial freezing process of sand-clay stratum is established. Based on the software COMSOL Multiphysics, the water-salt-thermal-mechanical multi-field coupling theoretical model of sand-clay composite stratum under seepage conditions is solved, and it is found that the calculation results of the theoretical model are in good agreement with experimental results. Through a parameter analysis, the influences of different seepage velocities on the spatial distributions of water, salt, temperature and

收稿日期: 2024-03-14; 修回日期: 2024-07-08.

作者简介: 高国耀(1994—), 男, 博士研究生.

通信作者: 任宇晓, renyx@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171273, 52108335, 52078336); 天津市科技计划资助项目(20JCJQC00220); 天津大学自主创新基金资助项目(2024XSU-0019).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52171273, No. 52108335, No. 52078336), the Science and Technology Plan Program of Tianjin, China (No. 20JCJQC00220), the Tianjin University Independent Innovation Fund (No. 2024XSU-0019).

soil displacement are studied. Results show that as the seepage velocity increases from 0 m/d to 15 m/d, the difficulty in freezing the upstream soil in the sand-clay composite stratum also increases, resulting in a reduction of the upstream frozen area towards the downstream and the downstream frozen area expanding downstream along the seepage direction. In the sand and clay layers, the leading-edge positions of ice move downstream by 60.3% and 26.2%, and those of salt crystallization move downstream by 50.4% and 26.2%, respectively. Under the action of phase changes in water and salt, an increase in the internal stress of soil leads to a growing soil displacement, and the clay layer's peak displacement increases by 107% after artificial freezing in the downstream of the sand-clay composite stratum. The influencing range of a freezing pipe in the direction perpendicular to the seepage direction is reduced. The values of temperature of clay and sand layers at a position of 0.3 m away from both sides of the freezing pipe are reduced by 1.1 °C and 2.8 °C, respectively. In the clay and sand layers, the total salt contents increase by 8.5% and 7.4%, while the ranges of ice generation are reduced by 10.2% and 54.9%, respectively. The research results in this paper provide a theoretical basis and data support for artificial freezing construction in coastal strata under seepage conditions.

Keywords: artificial freezing; freezing pipe; seepage; sand-clay composite stratum; multi-field coupling theory

人工冻结技术因其方法简单、见效快、无污染等优点在富水或饱水地下掘进工程中被广泛应用^[1-4]。沿海城市地层受海洋沉积环境、海水浸没和潮汐的影响,具有地下水矿化度高、流速大的特点,因此在进行人工冻结施工时,其存在冻结范围不明、冻结帷幕发育不均匀等工程问题^[5-7]。砂-黏复合地层在沿海地区普遍存在,砂层中高盐度地下水渗流现象加剧了上述工程问题的不确定性。因此,有必要对砂-黏地层在人工冻结过程中的温度场、变形场及各组分的相变规律进行研究。

以往研究发现,地下水渗流的存在显著影响地层温度场分布^[8-10]。基于多孔介质传热理论与达西定律的模拟显示,冻结帷幕的闭合时间随着渗流速度的增加而增加^[11],在水流上游位置加密布置冻结管可在一定程度上解决此类工程问题^[12],但达西定律不能准确描述孔隙中的高流速的渗流。通过以往的实验研究可知,在热力-水力耦合作用下,渗流对冻结帷幕的形成起着弱化叠加效应^[7,13]。地下水的流速、冻结管内制冷剂温度对地层上、下游冻结帷幕厚度和冻结壁平均温度的影响较大^[14]。相邻冻结管的中间位置最先交圈,随着渗流速度的增加,最早的交圈位置向下游偏移^[15]。地层中的渗流作为热源影响着上游和下游冻结帷幕的形成,而冻结帷幕直接影响土体的变形,因此渗流条件下地层的变形分布与静水条件下的情形不同^[16-17],但高流速渗流条件下的砂-黏地层中温度场、冰含量分布和变形规律的理论研究鲜有涉及,且当地下水的流速过大时,达西定律已不适用,需要建立新的理论方程来研究其冻结过程。

诸多学者针对高矿化度地下水渗流地层中冻结帷幕长期不相交问题,基于多孔介质传热、渗流场及相变影响,建立了水-盐-热-力数学模型^[18-20],对渗

流层冻结壁发育规律的描述多是基于温度场的演变^[21-22]。研究^[23]发现,孔隙大小、温度和盐浓度是影响未冻水含量的主要因素。另外,在冻结过程中砂-黏地层的温度分布、水盐迁移和相变与均质地层的情形明显不同^[24-25]。目前,现有多场耦合理论中大多不考虑砂-黏地层中非对流通量对水、盐的质量守恒和能量迁移的影响以及溶质势和热通量在液相对流通量中的作用,且忽略了动量守恒中土体黏弹性和塑性的影响以及砂-黏地层在人工冻结过程中液相流动的非线性变化的影响。

本文基于质量、能量和动量守恒方程,综合考虑冻结过程中非对流通量对盐、压力、热量、水等组分的影响,考虑流体力学和热力学条件下土体中固体颗粒表面对盐的吸附和解吸能力以及砂-黏地层中的高流速渗流具有的显著非线性,在耦合理论中采用 Navier-Stokes 方程考虑高矿化度地下水渗流过程中的动量守恒问题,分析高矿化度地下水渗流条件下砂-黏地层人工冻结过程中的各组分的耦合机理和相变规律。利用 COMSOL Multiphysics 软件对多场耦合偏微分方程进行求解,研究了不同渗流速度下砂-黏复合地层中温度、地层位移、冰、结晶盐、总含盐量和吸附盐的分布情况。

1 控制方程

假设液相为理想溶液,包括未冻水和溶解盐;固相由固体基质、冰和盐晶体组成,分别记为 s 、 i 和 p 。孔隙率为多孔介质单位体积的孔隙体积,用土孔隙率 n 表示。

1.1 固体基质守恒方程

考虑固体基质对盐的吸附作用,砂-黏复合地层

中固体基质的质量守恒方程^[26]可表示为

$$\frac{\partial(\phi^s \rho_s^s)}{\partial t} + \text{div}(\phi^s \rho_s^s \mathbf{v}^s) = 0 \quad (1)$$

式中: ϕ^s 为固体基质的体积分数, $\phi^s = 1 - n$; ρ_s^s 为固体基质在固相中的密度; t 为时间; \mathbf{v}^s 为固体基质的速度矢量, 其与位移矢量 \mathbf{u} 的关系为 $\mathbf{v}^s = \partial \mathbf{u} / \partial t$.

固相由固体基质的质量分数 ω_s^s 和吸附盐的质量分数 ω_p^s 组成, 即 $\omega_s^s + \omega_p^s = 1$. 在多孔介质中考虑吸附-解吸效应时, 存在如下表达式

$$\frac{\partial[(1-n)\rho^s(1-\omega_p^s)]}{\partial t} + \text{div}[(1-n)\rho^s \omega_s^s \mathbf{v}^s] = 0 \quad (2)$$

固相密度 ρ^s 是温度 T 和孔隙水压力的函数^[26], 其可表示为

$$\rho^s = \rho^{s0} \exp[\beta_{sp}(P^1 - P^{10}) - \beta_{sT}(T - T_0)] \quad (3)$$

式中: ρ^{s0} 为固体基质的参考密度; β_{sT} 和 β_{sp} 分别为固相热膨胀系数和固相压缩系数; P^1 和 P^{10} 分别为孔隙水压力和初始孔隙水压力; T_0 为初始温度.

将式(3)代入式(2)可以得到考虑吸附和解吸效应的砂-黏复合地层固体基质的质量守恒方程的展开式, 其可表示为

$$\frac{1}{(1-n)} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{(1-\omega_p^s)} \frac{\partial \omega_p^s}{\partial t} + \beta_{sT} \frac{\partial T}{\partial t} = \beta_{sp} \frac{\partial P^1}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (4)$$

式中 ε_v 为体积应变.

1.2 水守恒方程

结合 Zhou 等^[26]的研究成果, 考虑液相非对流通量的影响, 推导出砂-黏复合地层中水的质量守恒方程, 其可表示为

$$\frac{\partial(nS^l \rho_w^l)}{\partial t} + \text{div}(nS^l \rho_w^l \mathbf{v}^l) - \text{div} \mathbf{j}_p^l = -\frac{\partial m_i}{\partial t} - \frac{\partial m_p^l}{\partial t} \quad (5)$$

式中: ρ_w^l 为液态水密度; \mathbf{j}_p^l 为盐溶液的非对流通量; $\partial m_i / \partial t$ 和 $\partial m_p^l / \partial t$ 分别为冰结晶的速率和结晶盐水合物的形成速率; S^l 表示液相的饱和度.

饱和多孔介质中液相的速度矢量 \mathbf{v}^l 是固相速度 \mathbf{v}^s 与平均液相速度之和, 其可表示为

$$\mathbf{v}^l = \frac{\mathbf{q}^l}{nS^l} + \mathbf{v}^s \quad (6)$$

式中 \mathbf{q}^l 为液相对流通量.

对于饱和多孔介质, 各组分在同一相中的非对流通量之和等于 0, 即

$$\text{div} \mathbf{j}_w^l + \text{div} \mathbf{j}_p^l = 0 \quad (7)$$

式中 \mathbf{j}_w^l 为液态水的非对流通量.

考虑到结晶盐水合物的形成消耗具有相同离子数 (ν_i) 的水, 冰结晶的速率和结晶盐水合物的形成速率分别满足以下表达式^[21], 即

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = C_w k_i (1 - a_w)^{n_i} - C_i k_i (a_w - 1)^{n_i} \quad (8)$$

$$\frac{\partial m_p^l}{\partial t} = C^p k_p (a_s - a_{s0})^{n_{p1}} - C^l k_p (1 - a_s)^{n_{p1}} \quad (9)$$

式中: k_i 为水-冰相变的动力学参数; n_i 为材料常数; a_w 为水活度, 其是关于温度的函数; C^l 和 C^p 分别为盐的溶解浓度和盐的结晶浓度; k_p 为盐结晶速率的动力学参数; a_s 和 a_{s0} 分别为盐结晶时的过饱和度和初始过饱和度^[21]; n_{p1} 和 n_{p1} 为冻融过程中的材料参数; C_w 和 C_i 分别为水浓度和冰浓度.

ρ^l 为液相密度, 其计算公式^[26]为

$$\rho^l = \rho^{l0} \exp[\beta_{lw} \omega_p^l + \beta_{lp}(P^1 - P^{10}) - \beta_{lT}(T - T_0)] \quad (10)$$

式中: ρ^{l0} 为液体参考密度; β_{lp} 为液相压缩系数; β_{lT} 为液体热膨胀系数; β_{lw} 为浓度依赖系数.

将式(6) ~ (10)代入式(5)得到砂-黏复合地层中水质量守恒的展开式为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} - \frac{1}{S^l} \frac{\partial S^l}{\partial t} - \frac{1}{S^l} \frac{\partial S^p}{\partial t} + \frac{(1-\omega_p^l) \rho^l}{\rho_w^l} \beta_{lp} \frac{\partial P^1}{\partial t} - \\ & \frac{(1-\omega_p^l) \rho^l}{\rho_w^l} \beta_{lT} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\rho^l}{\rho_w^l} [(1-\omega_p^l) \beta_{lw} + 1] \frac{\partial \omega_p^l}{\partial t} = \\ & \frac{\text{div} \mathbf{j}_p^l - \text{div}(\rho_w^l \mathbf{q}^l) - \frac{\partial m_i}{\partial t} - \frac{\partial m_p^l}{\partial t}}{n \rho_w^l S^l} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: 液态水密度 ρ_w^l 可表示为 $\rho_w^l = \rho^l (1 - \omega_p^l)$, ω_p^l 为溶解盐的质量分数; S^l 和 S^p 分别为冰和结晶盐的饱和度和.

砂-黏复合地层中冰的质量守恒方程^[21]可表示为

$$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{S^l} \frac{\partial S^l}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{1}{nS^l \rho^l} \frac{\partial m_i}{\partial t} \quad (12)$$

1.3 盐守恒方程

考虑砂-黏复合地层中液相非对流通量存在, 结合 Zhou 等^[26]的研究成果, 推导出溶液的质量守恒方程, 其可表示为

$$\frac{\partial(nS^l \rho_p^l)}{\partial t} + \nabla \cdot (nS^l \rho_p^l \mathbf{v}^l) + \nabla \cdot \mathbf{j}_p^l = -\frac{\partial m_p}{\partial t} - \frac{\partial m_p^l}{\partial t} \quad (13)$$

式中 $\partial m_p / \partial t$ 是结晶盐水合物的相变速率. 结晶盐水合物的形成速率可表示为

$$\frac{\partial m_p^l}{\partial t} = \frac{\nu_i M_i}{M_p} \frac{\partial m_p}{\partial t} \quad (14)$$

式中 M_1 和 M_p 分别为结晶盐水和离子的化学计量数。

砂-黏复合地层中盐的非对流通量可表示为

$$\mathbf{j}_p^l = -nS^l \rho^l D_p \nabla \omega_p^l \quad (15)$$

式中 D_p 为盐的扩散系数。

溶液的质量守恒方程即式(13)可展开为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n} \left(1 - \frac{\rho^s \omega_p^s}{\rho^l \omega_p^l} \right) \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{S^l} \frac{\partial S^l}{\partial t} - \frac{1}{S^p} \frac{\partial S^p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \\ & \left[\beta_{lp} + \frac{(1-n)\omega_p^s \rho^s}{nS^l \rho^l \omega_p^l} \beta_{sp} \right] \frac{\partial P^l}{\partial t} + \frac{(1-\omega_p^l \beta_{lw})}{\omega_p^l} \frac{\partial \omega_p^l}{\partial t} + \\ & \frac{1}{\omega_p^l} \frac{(1-n)\rho^s}{nS^l \rho^l} \frac{\partial \omega_p^s}{\partial t} - \left[\frac{(1-n)\omega_p^s \rho^s}{nS^l \rho^l \omega_p^l} \beta_{st} + \beta_{tr} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & \frac{\text{div}(\rho^l \omega_p^l \mathbf{q}^l) + \text{div} \mathbf{j}_p^l - \frac{\partial m_p}{\partial t} - \frac{v_l M_1}{M_p} \frac{\partial m_p}{\partial t}}{nS^l \rho^l \omega_p^l} \quad (16) \end{aligned}$$

考虑到盐在砂-黏复合地层中的吸附-解吸效应, 盐在冻土中的沉积动力学公式^[26]可表示为

$$\frac{\partial \omega_p^s}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{n\rho^l}{(1-n)\rho^s} k_{ad} S^l \omega_p^l - k_{de} \omega_p^s \quad (17)$$

式中 k_{ad} 和 k_{de} 分别为吸附系数和解吸系数。

砂-黏复合地层中结晶盐的质量守恒方程可表示为

$$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{S^p} \frac{\partial S^p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{1}{n\rho^p S^p} \frac{\partial m_p}{\partial t} \quad (18)$$

式中 ρ^p 为结晶盐的密度。

1.4 能量守恒方程

在砂-黏复合地层中的能量守恒中考虑相变潜热、热传导及热通量, 能量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial \Phi_h}{\partial t} + \nabla \mathbf{q}_h = L_{wi} \frac{\partial m_i}{\partial t} + L_{sc} \frac{\partial m_p}{\partial t} + L_{lp} \frac{\partial m_p^l}{\partial t} \quad (19)$$

式中: L_{wi} 、 L_{sc} 和 L_{lp} 分别为水-冰相变潜热、溶液-结晶盐相变潜热和水-结合水相变潜热; \mathbf{q}_h 为热通量。

热传导 Φ_h 的微分方程为

$$\frac{\partial \Phi_h}{\partial t} = (\rho_c)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

式中 $(\rho_c)_{\text{eff}}$ 为有效导热系数, 其可表示为

$$(\rho_c)_{\text{eff}} = (1-n)\rho^s c_s + nS^l \rho^l c^l + nS^i \rho^i c_i^i + nS^p \rho^p c_p^p \quad (21)$$

考虑液相非对流通量的影响, 热通量 \mathbf{q}_h 的表达式为

$$\mathbf{q}_h = (\rho^l c^l \mathbf{q}^l + c_p^l \mathbf{j}_p^l)(T - T_0) - \lambda_{\text{eff}} \nabla T \quad (22)$$

结合式(19)~(22), 砂-黏复合地层能量守恒方程可表示为

$$\begin{aligned} & \text{div} \left[\left[c_p^l \mathbf{j}_p^l + K_1 \rho^l c^l (\text{div} P^l + \rho_w^l \mathbf{g}) \right] \Delta T - \lambda_{\text{eff}} \nabla T \right] + \\ & \left[(1-n)\rho^s c_s + nS^l \rho^l c^l + nS^i \rho^i c_i^i + nS^p \rho^p c_p^p \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & L_{wi} \frac{\partial m_i}{\partial t} + L_{sc} \frac{\partial m_p}{\partial t} + L_{lp} \frac{v_l M_1}{M_p} \frac{\partial m_p}{\partial t} \quad (23) \end{aligned}$$

式中: \mathbf{g} 为重力加速度矢量; K_1 为饱和多孔介质的渗透系数; λ_{eff} 为冻土有效导热系数^[26]; c_s 、 c^l 、 c_i^i 和 c_p^p 分别为固体基质、液相、冰和结晶盐的比热容; ρ^l 为冰的密度。

1.5 动量守恒方程

人工冻结过程中存在冻结管和冻结帷幕, 这使得液相在砂-黏复合地层中的渗流具有显著的非线性, 因此有必要在耦合理论中引入 Navier-Stokes 方程来描述渗流的动量守恒。在土体冻结过程中 π 相的动量守恒方程^[26]可表示为

$$\rho^\pi n^\pi \frac{d\mathbf{v}^\pi}{dt} - \text{div}(n^\pi \boldsymbol{\sigma}^\pi) - \rho^\pi n^\pi \mathbf{g}^\pi = \dot{m}^\pi \quad (24)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}^\pi$ 为 π 相的应力张量; \dot{m}^π 为 π 相与其他相的动量交换; \mathbf{g}^π 为 π 相的体积密度。

忽略渗流过程中液相的动量守恒, 在砂-黏复合地层中液相动量守恒可表示为

$$\frac{d\mathbf{v}^l}{dt} = \mathbf{F}_g - \frac{\nabla P^l}{\rho^l} + \mu_l \nabla^2 \mathbf{v}^l \quad (25)$$

式中: \mathbf{F}_g 表示单位质量力; μ_l 为液相的动力黏度。

砂-黏复合地层中的总应力可表示为

$$n^\pi \boldsymbol{\sigma}^\pi = \boldsymbol{\sigma}' + S^l P^l + S^i P^i + S^p P^p \quad (26)$$

式中: P^i 和 P^p 分别为孔隙中冰压力和盐结晶压力; $\boldsymbol{\sigma}'$ 为有效应力。

体积力只考虑重力, 根据 Hu 等^[21]的研究, 渗流条件下砂-黏复合地层的加权平均密度可表示为

$$\rho^\pi n^\pi \mathbf{g}^\pi = \left[(1-n)\rho^s + nS^l \rho^l + nS^i \rho^i + nS^p \rho^p \right] \mathbf{g} \quad (27)$$

式中 \mathbf{g} 为体积密度。

有效应力可表示为由土颗粒骨架应变、热应变、湿应变、塑性体积应变和黏弹性应变有关的函数^[26], 即

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D} \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_T - \boldsymbol{\varepsilon}_s - \boldsymbol{\varepsilon}_f - \boldsymbol{\varepsilon}_r) \quad (28)$$

式中: \mathbf{D} 为多孔介质的弹性张量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_T$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_f$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ 分别为土颗粒骨架的应变、热应变、湿应变、塑性体积应变和黏弹性应变。

将式(25)~(28)代入式(24), 则砂-黏复合地层在冻结过程中的动量守恒方程可表示为

$$n\rho^l \left(\mathbf{F}_g - \frac{\nabla P^l}{\rho^l} + \mu_l \nabla^2 \mathbf{v}^l \right) - \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}^l + S^l P^l + S^i P^i + S^p P^p) - [(1-n)\rho^s + nS^l \rho^l + nS^i P^i + nS^p P^p] \mathbf{g} = \dot{m}^\pi \quad (29)$$

1.6 边界条件

式(4)、(11)、(12)、(16)、(17)、(18)、(23)和(29)为高度非线性的非齐次多场耦合理论方程,包含孔隙率 n 、孔隙水压力 P^l 、溶解盐质量分数 ω_p^l 、吸附盐质量分数 ω_p^s 、冰饱和度 S^i 、温度 T 、结晶盐饱和度 S^p 和土体变形 ε_v 共 8 个与时间和空间相关的未知量,利用 COMSOL Multiphysics 进行求解. 砂-黏复合地层的边界与外部存在热对流、热交换、水供应和盐供应. 求解耦合方程,必须满足下列边界条件,即

$$\begin{cases} (\rho_w^l \mathbf{q}^l - \mathbf{j}_p^l) \cdot \mathbf{n} = \bar{P}^l \\ (\rho^l \omega_p^l \mathbf{q}^l + \mathbf{j}_p^l) \cdot \mathbf{n} = \bar{\omega}_p^l \\ [(\rho_w^l c_w^l \mathbf{q}^l + c_p^l \mathbf{j}_p^l)(T - T_0) - \lambda_{\text{eff}} \nabla T] \cdot \mathbf{n} = \bar{T} \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \bar{\varepsilon}_v \end{cases} \quad (30)$$

式中: \mathbf{n} 为边界上的向外法向量; “ $\bar{\quad}$ ” 为求均值运算.

使用 COMSOL Multiphysics 求解,耦合方程可改写为

$$d_a \frac{\partial \xi}{\partial t} + \operatorname{div} \boldsymbol{\Gamma} = f \quad (31)$$

式中: ξ 为控制方程的未知变量, $\xi = \{n, P^l, S^p, S^i, \omega_p^l, \omega_p^s, T, \varepsilon_v\}$; d_a 为阻尼系数; $\boldsymbol{\Gamma}$ 为通量矢量; f 为源项.

2 理论验证

结合 Rong 等^[13]对渗流条件下人工冻结过程温度场的分布及变化规律的模型试验研究结果,验证本文理论模型. 表 1 给出了本研究使用的基本物理力学和热力学参数^[22]. 该试验设计系统如图 1 所示,试验箱尺寸为 1.50 m × 2.00 m × 1.00 m,箱体的左、右两侧分别设置进、出水口,箱体中间设置 1 根外径为 20 mm 的冷冻管,渗流的水温在 15 °C 左右波动,冻结管壁温度控制在 -30 °C,模型试验所用砂的孔隙率为 0.32,体积含水量为 20%,渗透系数为 2.28 × 10⁻⁴ m/s. 在距离试验箱底部 0.5 m 位置处的主测试面上,沿着渗流方向在两根冻结管中间设置 1 个 0.6 m 长的 C 轴, C 轴以冻结管的连线为中心线前后对称. 利用本文所提出的理论模型得到沿 C 轴的温度分布结果与 Rong 等^[13]的模型试验结果进行对比,如图 2 所示. 选取模型的渗流速度分别为 0 m/d、3 m/d 和 6 m/d,溶解盐质量分数分别为 0、2% 和 4%.

可以看出,理论模型的计算结果与模型试验结果吻合较好. 在人工冻结 32 h 后,渗流速度和溶解盐质量分数越高,下游位置处的温度就越低;溶解盐质量分数越高,砂层的温度就越低. 当渗流速度为 0 m/d 时,随着溶解盐质量分数由 0 增加到 4%, C 轴中部的温度降低了 3.7 °C;当渗流速度为 6 m/d 时,随着溶解盐质量分数由 0 增加到 4%, C 轴中部的温度降低了 1.8 °C.

表 1 数值模型中物理参数

Tab.1 Physical parameters for numerical model

参数	取值
吸附系数 k_{ad}/s^{-1}	2.5×10^{-4}
解吸系数 k_{de}/s^{-1}	1.5×10^{-4}
固相热膨胀系数 β_{sT}/K^{-1}	7.8×10^{-6}
浓度依赖系数 β_{lw}	0.692 3
冰的密度 $\rho^i/(kg/m^3)$	917
结晶盐密度 $\rho^p/(kg/m^3)$	1 460
固相密度 ρ^s (黏土颗粒)/(kg/m ³)	2 750
固相密度 ρ^s (砂颗粒)/(kg/m ³)	2 650
盐的动力学参数 k_p/s^{-1}	1.8×10^{-3}
吸湿膨胀系数 β_s	1.5×10^{-4}
冰的动力学参数 k_i/s^{-1}	5.82×10^{-3}
水-结合水相变潜热 $L_{lp}/(kJ/mol)$	73.04
溶液-结晶盐相变潜热 $L_{sp}/(kJ/mol)$	2.34
水-冰相变潜热 $L_{wi}/(kJ/mol)$	6.01
液相压缩系数 $\beta_{lp}/(kPa)^{-1}$	1×10^{-7}
液体热膨胀系数 β_{lT}/K^{-1}	2.1×10^{-4}
液态水密度 $\rho_w^l/(kg/m^3)$	1 000
摩尔气体常数 $R/(J/(mol \cdot K))$	8.2
结晶盐的摩尔质量 $M_p/(kg/mol)$	0.142
液相的摩尔质量 $M_l/(kg/mol)$	0.018
固体比热容 $c_s/(J/(kg \cdot K))$	850
冰的比热容 $c_i^l/(J/(kg \cdot K))$	2 090
结晶盐的比热容 $c_p^p/(J/(kg \cdot K))$	1 743
液态水比热容 $c_w^l/(J/(kg \cdot K))$	4 180
盐溶液的比热容 $c_p^l/(J/(kg \cdot K))$	891
固相压缩系数 $\beta_{sp}/(kPa)^{-1}$	2×10^{-4}
土颗粒导热系数 $\lambda_s/(W/(m \cdot K))$	1.5
液态水导热系数 $\lambda_w/(W/(m \cdot K))$	0.58
结晶盐导热系数 $\lambda_p/(W/(m \cdot K))$	1.35
盐溶液导热系数 $\lambda_p^l/(W/(m \cdot K))$	0.14
冰导热系数 $\lambda_i/(W/(m \cdot K))$	2.22

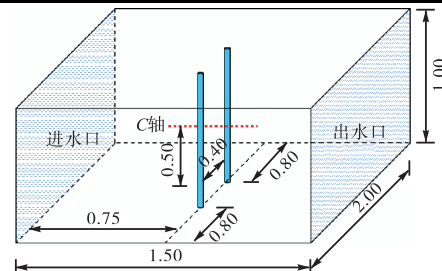


图 1 Rong 等^[13]的模型试验(单位: m)
Fig.1 Model test conducted by Rong et al^[13] (unit: m)

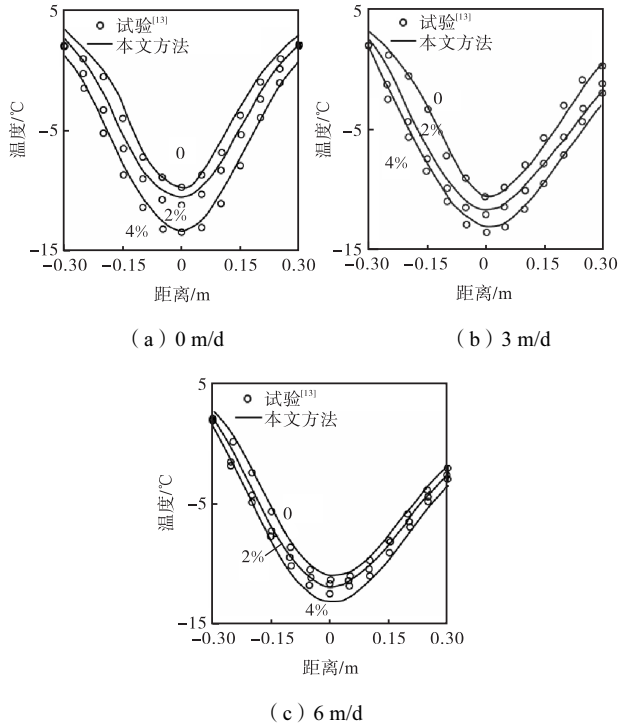


图 2 不同渗流速度下 C 轴上 Rong 等^[13]的试验中温度分布与本文理论模型结果验证

Fig.2 Verification of results of proposed theoretical model with spatial temperature distributions in model tests conducted by Rong et al^[13] at different seepage velocities on C axis

3 参数研究

如图 3 所示, 基于 COMSOL 建立下部为 1.00 m 厚的砂层且顶部覆盖 1 层 0.50 m 厚的海洋黏土模型, 模型宽为 2.00 m, 长为 2.50 m. 海相黏土的孔隙率为 0.48, 渗透系数为 $5.15 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ^[27-28], 所用砂的基本物理性质为 Rong 等^[13]模型试验所给出的参数. 模型边界目标参数如表 2 所示, 土体中 ω_{p0}^l 和初始温度 T_0 分别为 0.005 和 13 °C, 初始冰饱和度 S^i 、初始结晶盐饱和度 S^p 和初始吸附盐质量分数 ω_{p0}^s 均为 0.

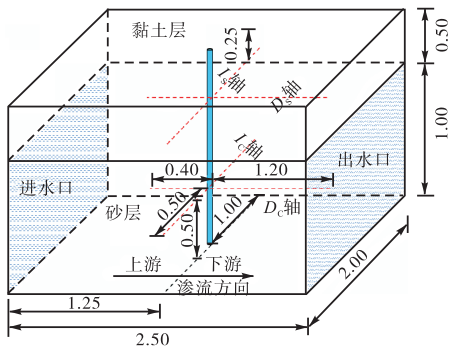


图 3 砂-黏复合地层模型(单位:m)

Fig.3 Sand-clay composite stratum model (unit: m)

表 2 参数分析使用的目标参数

Tab.2 Target parameters used in parametric analysis

目标参数	数值
初始温度 $T_0/^\circ\text{C}$	13
冻结管壁温度 $T_p/^\circ\text{C}$	-27
初始盐质量分数 ω_{p0}^l	0.005
入水口处盐质量分数 ω_p^l	0.005
液相渗流速度 $v^l / (\text{m/d})$	0, 5, 10, 15
初始吸附盐质量分数 ω_{p0}^s	0
初始冰饱和度 S^i	0
初始结晶盐饱和度 S^p	0

土样中冻结管壁温度设为 -27 °C, 渗流仅存在于砂层中. 地层中的初始孔隙水压力为 $P^l = \gamma_w \Delta H$, 渗流速度 v^l 的大小分别为 0 m/d、5 m/d、10 m/d 和 15 m/d. 如图 3 所示, 选取模型中的 4 条轴线 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s , 绘制温度、冰、盐和土位移分布剖面图(图 4), 在单根冻结管的作用下, 对不同渗流速度下砂-黏复合地层中各组分分量的空间分布情况进行了研究.

图 4 为在渗流速度为 10 m/d 的条件下, 冻结 70 h 后砂-黏复合地层中孔隙率、温度、冰含量、结晶盐含量、吸附盐含量、土体位移、未冻水含量、总含盐量沿 D_c 、 D_s 轴所在位置的长度为 2.50 m 的全尺寸剖面分布的等值线图. 由图 4(a)可以看出, 冻结管附近冻结区域的孔隙率明显增大, 砂地层下游孔隙率大于上游的对应值. 在渗流作用下, 冻结管上游温度基本保持不变, 砂层下游温度下降了近 10 °C, 进而砂层下游比上游产生了更多的冰和结晶盐, 渗流和冻结使冻结区的吸附盐含量比非冻结区域降低了 50% 以上. 黏土层中各组分受渗流影响较小, 沿着渗流方向以冻结管基本呈对称分布, 如图 4(b) ~ (e) 所示. 由图 4(f) 可知, 下游砂地层中冰含量和结晶盐含量较高, 造成了明显的冻胀和盐胀, 导致下游地层位移明显. 由图 4(g) 和 (h) 可知, 相较于非冻结区域, 冻结区中未冻水含量较低, 黏土冻结区中未冻水含量比砂层冻结区中未冻水含量高 43%, 冻结区域中盐过饱和和后析出结晶盐导致该区域总含盐量增加了 3 倍. 在砂层中, 渗流会限制上游冻结效应的发展, 扩大砂层下游冻结效应的范围, 渗流对黏土层中冻结范围的影响较小, 在黏土层的上、下游各组分基本呈对称分布.

由于砂和黏土的导热能力、孔隙率和渗透性等土体性质存在显著差异, 在复合地层的冻结中存在显著不同. 采用本文提出的理论模型进行参数研究, 分析了 0 m/d、5 m/d、10 m/d 和 15 m/d 的渗流速度对单根冻结管下的人工冻结机理的影响.

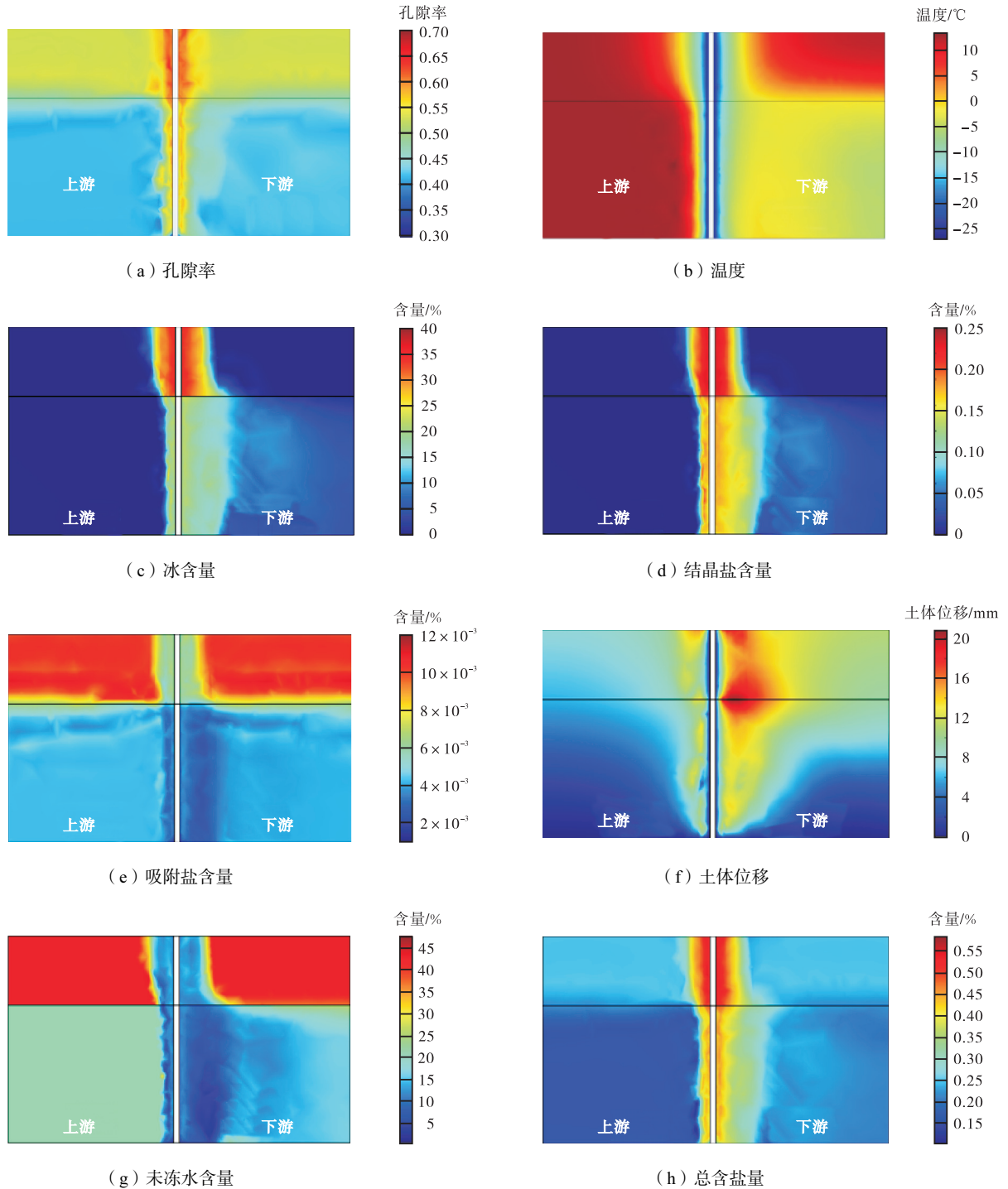


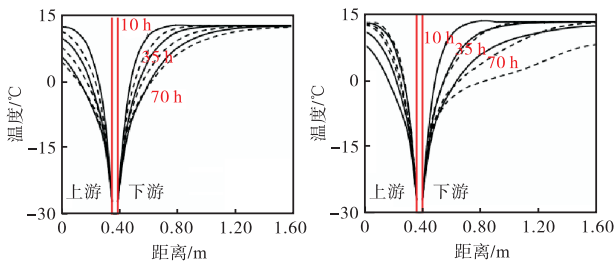
图 4 在 10 m/d 渗流速度下冻结 70 h 后土样各组分分布剖面图

Fig.4 Contour map of each component distribution profile in soil specimen after 70 h of freezing at seepage velocity of 10 m/d

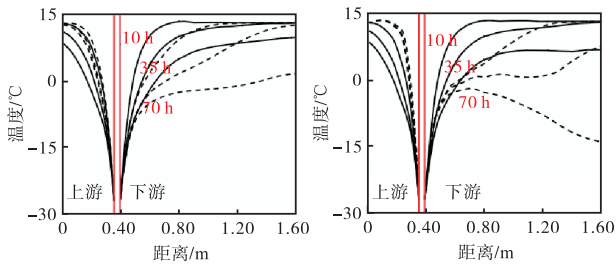
渗流速度对温度沿渗流方向 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴分布曲线的影响如图 5 所示. 随着冻结时间增加, 砂-黏复合地层中的温度逐渐降低, 高矿化度的地下水渗流携带的热量导致上游温度升高, 渗流经过冻结管的降温后在砂-黏复合地层的下游位置处温度降低. 从图 5(a) ~ (d) 可以看出, 随着高矿化度地下水的渗流速度从 0 m/d 变为 15 m/d, 在人工冻结 70 h 后, 在砂-黏复合地层上游砂-黏地层的冻结能力被削弱, 黏土

层和砂层温度仅分别降低了 0.5 °C 和 2.4 °C, 分别为 12.5 °C 和 11.6 °C, 而在砂-黏复合地层下游距冻结管 0.3 m 位置处黏土层和砂层的温度分别降低了 3.2 °C 和 13.3 °C. 当高矿化度地下水的渗流速度为 15 m/d 时, 在砂-黏复合地层下游距冻结管 0.3 m 处砂层中最低温度的峰值低至 -15 °C, 黏土层温度仍高于冻结温度 1.3 °C, 如图 5(d) 所示. 在垂直于高矿化度地下水渗流方向剖面上, 砂层中温度分布以冻结管为中心

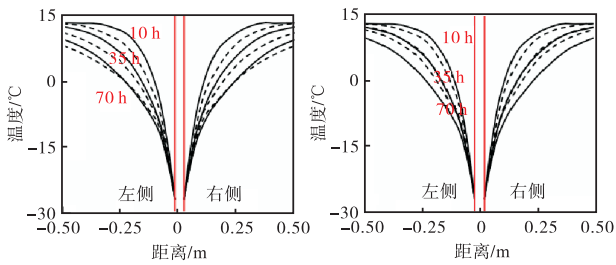
对称分布,在渗流的影响下砂层温度高于黏土层温度,如图 5(e)~(h)所示.随着高矿化度地下水的渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d,在垂直于渗流方向上,在冻结管两侧 0.3 m 位置处砂-黏复合地层中黏土层的温度仅降低了 1.1 °C,下部砂层的温度降低了 2.8 °C.在滨海砂-黏复合地层中上部黏土的渗透性较差,因此高矿化度的地下水渗流削弱了渗流垂直面上的降温幅度.下部砂层是高温渗流地下水的唯一通道,因此高矿化度地下水的渗流条件下,砂-黏复合地层底部砂层的人工冻结效果较差.



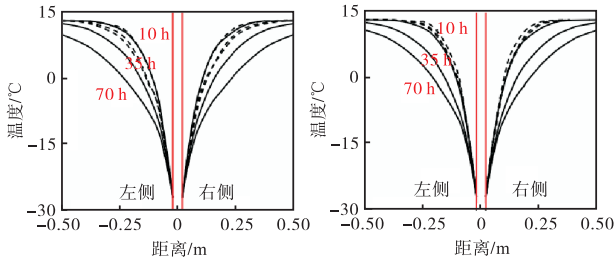
(a) 0 m/d 下沿 D_c 和 D_s 轴温度 (b) 5 m/d 下沿 D_c 和 D_s 轴温度



(c) 10 m/d 下沿 D_c 和 D_s 轴温度 (d) 15 m/d 下沿 D_c 和 D_s 轴温度



(e) 0 m/d 下沿 I_c 和 I_s 轴温度 (f) 5 m/d 下沿 I_c 和 I_s 轴温度

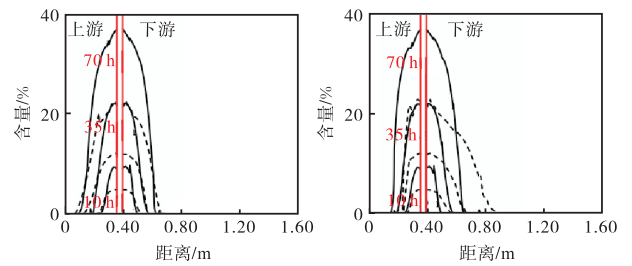


(g) 10 m/d 下沿 I_c 和 I_s 轴温度 (h) 15 m/d 下沿 I_c 和 I_s 轴温度

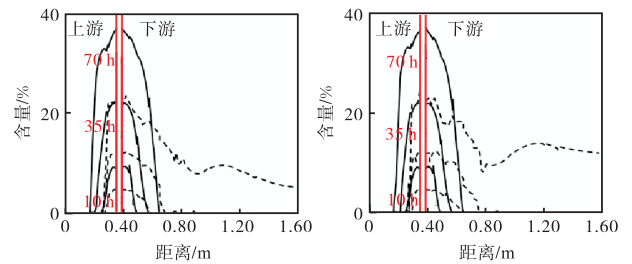
---- 砂层 — 黏土层

图 5 不同渗流速度下沿 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴温度分布情况
Fig.5 Temperature distribution along axes D_c 、 D_s 、 I_c and I_s at different seepage velocities

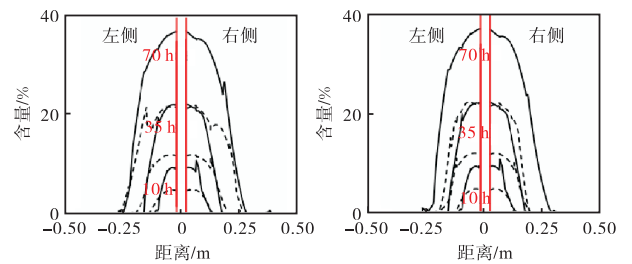
渗流速度对沿渗流方向 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴上冰含量分布曲线的影响如图 6 所示.随着冻结时间的增加,砂-黏复合地层中的冰含量逐渐增加,渗流导致上游冰含量降低而下游冰含量增加.由图 6(a)~(d)可以看出,随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d,砂层和黏土层中冰的产生位置的前缘分别向下游方向移动了 60.3% 和 26.2%.从图 6(d)中可以看出,在人工冻结 70 h 后,渗流导致下游砂层中冰的产生范围向下游扩展了 200% 以上.在垂直于渗流方向上,砂地



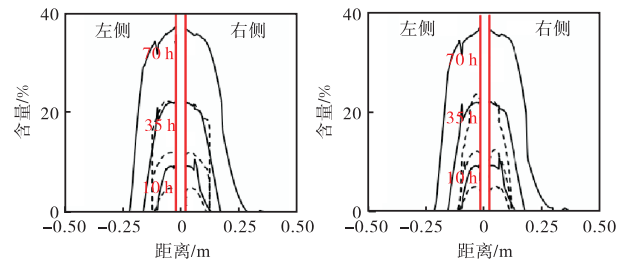
(a) 0 m/d 下沿 D_c 和 D_s 轴冰含量 (b) 5 m/d 下沿 D_c 和 D_s 轴冰含量



(c) 10 m/d 下沿 D_c 和 D_s 轴冰含量 (d) 15 m/d 下沿 D_c 和 D_s 轴冰含量



(e) 0 m/d 下沿 I_c 和 I_s 轴冰含量 (f) 5 m/d 下沿 I_c 和 I_s 轴冰含量



(g) 10 m/d 下沿 I_c 和 I_s 轴冰含量 (h) 15 m/d 下沿 I_c 和 I_s 轴冰含量

---- 砂层 — 黏土层

图 6 不同渗流速度下沿 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴冰含量分布情况
Fig.6 Ice content distribution along axes D_c 、 D_s 、 I_c and I_s at different seepage velocities

层中冰含量的分布以冻结管为对称轴呈对称分布. 如图 6(e) ~ (h) 所示, 在人工冻结 70 h 后, 冻结管两侧砂层和黏土层中冰的产生范围分别向冻结管方向缩小了 54.9% 和 10.2%. 由于黏土层的孔隙率较大, 复合地层中砂层的冰含量峰值比黏土层中的对应值低 50.2%.

渗流速度对沿渗流方向 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴上结晶盐含量分布曲线的影响如图 7 所示. 由图 7(a) ~ (d) 可以看出, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在

人工冻结 70 h 后, 在砂-黏复合地层上游, 在砂层和黏土层中结晶盐的产生范围的前缘分别沿着渗流方向缩减了 50.4% 和 26.2%. 渗流导致砂-黏复合地层中上游冻结难度增加, 结晶盐含量降低, 这种规律在下游则恰好相反. 当渗流速度超过 10 m/d 时, 砂-黏复合地层模型下游 1.20 m 范围内均存在结晶盐. 砂层中水的相变是由于温度降低导致水活度降低引起的, 盐的结晶是由于水减少导致盐的过饱和引起的, 因此结晶盐和冰的分布是相似的. 沿垂直渗流方向, 渗流速度对 I_c 和 I_s 轴上结晶盐含量分布曲线的影响如图 7(e) ~ (h) 所示. 由图 7(e) ~ (h) 可以看出, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 冻结管左、右两侧砂层和黏土层中结晶盐的产生范围分别向冻结管方向缩减了 55.2% 和 15.3%. 当渗流速度为 15 m/d 时, 黏土层中结晶盐峰值比砂层中的对应值大 46.9%, 如图 7(h) 所示.

渗流速度对沿渗流方向 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴上吸附盐含量分布曲线的影响如图 8 所示. 渗流和冻结是影响盐吸附的主要因素. 如图 8(a) ~ (d) 所示, 在人工冻结 70 h 后, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 黏土层和砂层中冻结管附近吸附盐含量的最低值分别下降 8.0% 和 12.0%. 如图 8(d) 所示, 当渗流速度为 15 m/d 时, 非冻结区黏土层中吸附盐含量是砂层中对应值的 2 倍以上. 渗流速度对垂直渗流方向上沿 I_c 和 I_s 轴上吸附盐含量分布曲线的影响如图 8(e) ~ (h) 所示. 由图 8(e) ~ (h) 可以看出, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在冻结管左、右两侧距冻结管 0.30 m 位置处的非冻结区, 黏土层和砂层中吸附盐含量分别下降了 4.8% 和 7.7%.

渗流速度对沿渗流方向 D_c 和 D_s 轴上总含盐量分布曲线的影响如图 9(a) ~ (d) 所示. 随着冻结时间的增加, 冻结管附近的总含盐量逐渐增加, 冻结导致盐随水在冻结管附近积聚. 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 砂-黏复合地层上游总含盐量减少, 下游含盐量增加. 如图 9(a) ~ (d) 所示, 在人工冻结 70 h 后, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在砂-黏地层中的上游, 冻结区域的黏土层和砂层总含盐量分别增加了 7.1% 和 9.8%. 复合地层下游砂层和黏土层含盐量分别增加了 25.4% 和 8.5%. 渗流速度对垂直渗流方向 I_c 和 I_s 轴上盐含量分布曲线的影响如图 9(e) ~ (h) 所示. 从图 9(e) ~ (h) 可以看出, 在人工冻结 70 h 后, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在冻结管左、右两侧距冻结管 0.30 m 位置处的非冻结区, 黏土层和砂层的总含盐量分别增加了 8.5% 和 7.4%.

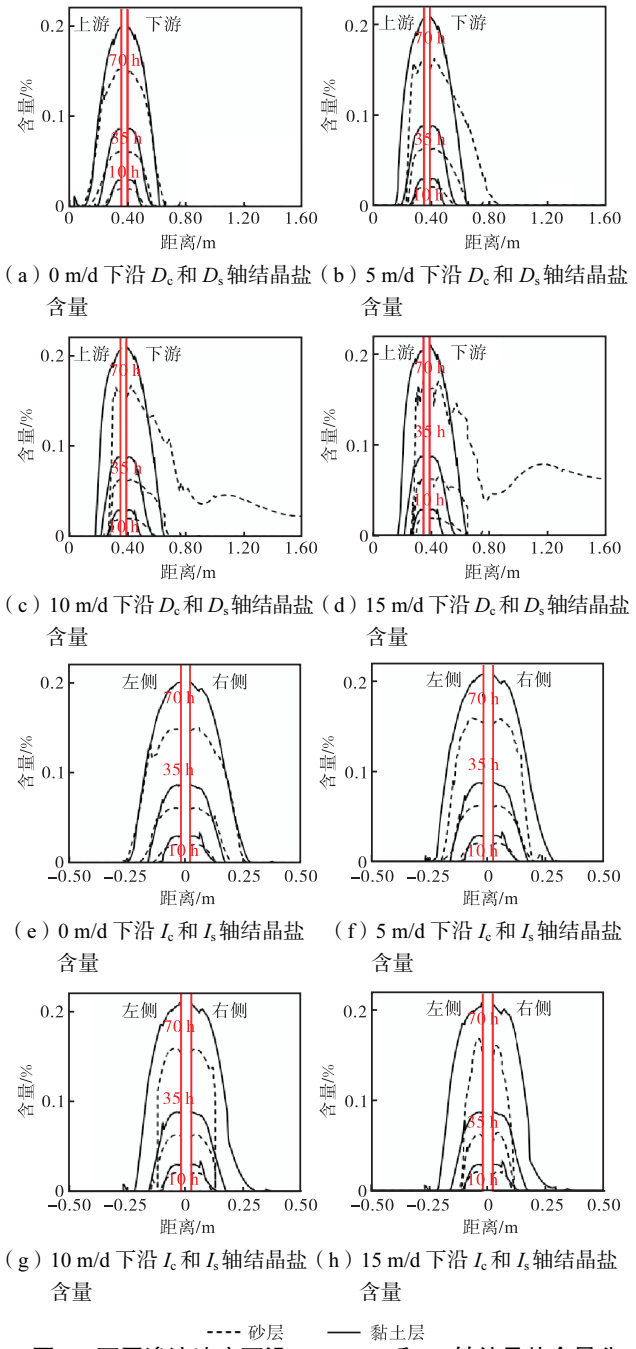


图 7 不同渗流速度下沿 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴结晶盐含量分布情况
Fig.7 Crystalline salt content distribution along axes D_c , D_s , I_c and I_s at different seepage velocities

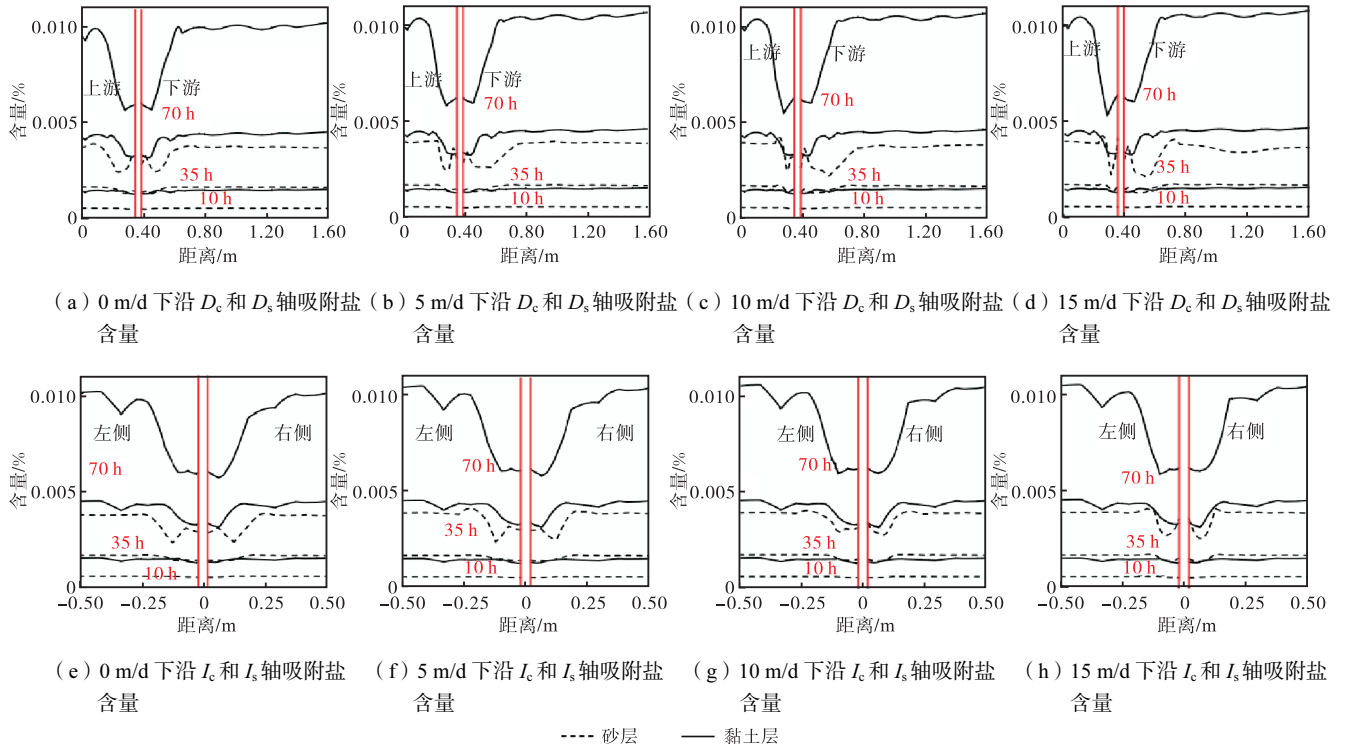


图 8 不同渗流速度下沿 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴吸附盐含量分布情况

Fig.8 Adsorbed salt content distribution along axes D_c , D_s , I_c and I_s at different seepage velocities

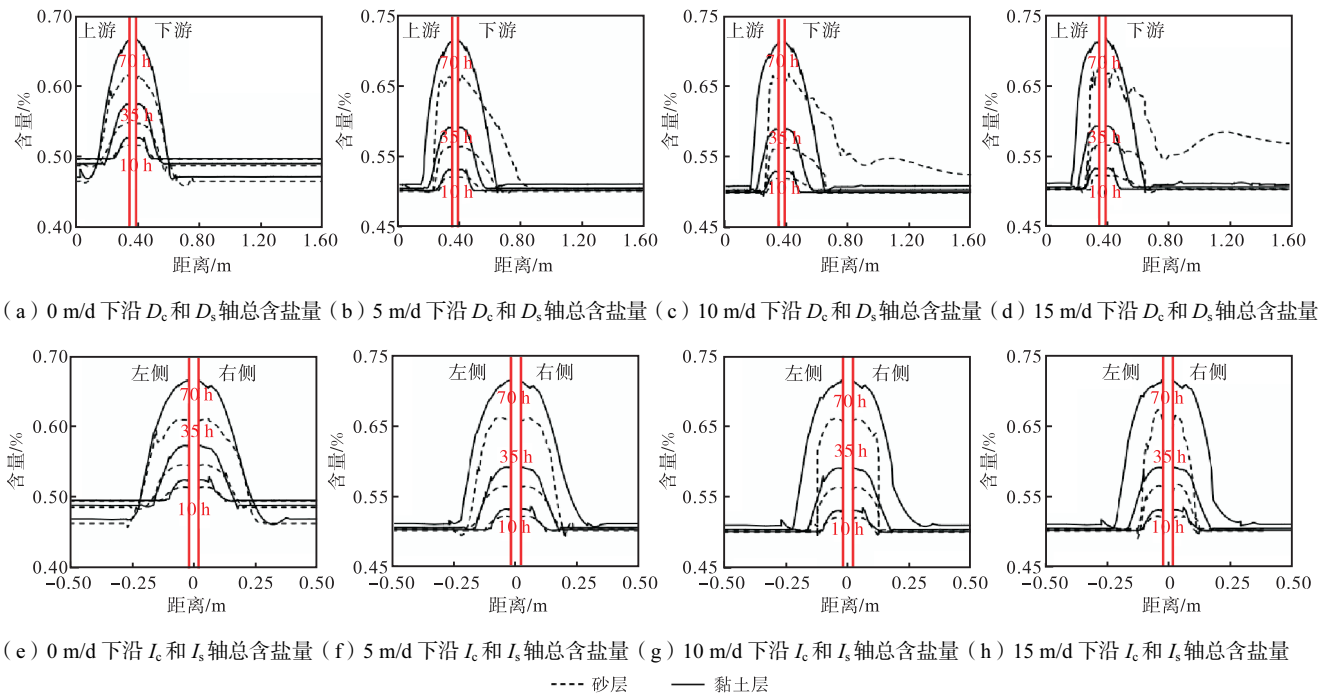


图 9 不同渗流速度下沿 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴总含盐量分布情况

Fig.9 Total salt content distribution along axes D_c , D_s , I_c and I_s at different seepage velocities

渗流速度对沿渗流方向 D_c 、 D_s 轴上土体位移分布曲线的影响如图 10(a) ~ (d) 所示. 随着冻结时间的增加, 砂-黏复合地层中由冻胀和盐胀引起的土体位移逐渐增大. 随着渗流的增加, 砂-黏复合地层下游土体位移增加的区域逐渐增加. 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在砂-黏复合地层上游, 黏土层

和砂土层的土体位移峰值分别减少 4.7%和 39.8%, 在砂-黏复合地层下游, 砂层的土体位移峰值减少 12.7%, 黏土层的土体位移峰值增大 107%. 当渗流速度为 15 m/d 时, 在人工冻结 70 h 后, 在砂-黏复合地层的上游和下游, 黏土层的土体位移峰值比砂层的土体位移峰值分别高 44.7%和 93.8%, 如图 10(d) 所

示. 在垂直渗流方向上, 渗流速度对地层沿 I_c 和 I_s 轴上位移分布曲线的影响如图 10(e) ~ (h) 所示. 由图 10(e) ~ (h) 可以看出, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在冻结管左、右两侧, 砂层位移峰值减小了 20.4%, 黏土层位移峰值增大了 25.3%. 由于土体性质和渗流条件的差异, 黏土层的冻胀和盐胀大于砂层, 因此黏土层的土体位移较大.

4 结 论

本文推导了渗流条件下砂-黏复合地层人工冻结的水-盐-热-力学耦合模型. 耦合模型的计算结果与文献[13]中实验室模型试验结果吻合较好. 通过分析各组在不同渗流速度条件下的空间分布情况, 得出以下结论.

(1) 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在砂-黏复合地层上游土体的冻结难度加大, 导致上游的冻结区域向下游缩减, 下游的冻结区域向下游发展, 黏土层和砂层中冰前缘位置分别缩短 26.2%和 60.3%. 在冻结管两侧 0.3 m 位置处, 砂-黏复合地层中黏土层和砂层的温度分别降低了 1.1 °C 和 2.8 °C.

(2) 人工冻结后, 在水、盐相变的作用下, 土体内部应力的增加导致土体位移的增加. 随着渗流速度由 0 m/d 增加到 15 m/d, 在砂-黏复合地层下游, 人工冻结后砂层的土体位移峰值减少 12.7%, 黏土层的土体位移峰值增大 107%. 同时, 在冻结管左、右两侧距冻结管 0.3 m 位置处的非冻结区, 渗流的存在增加了盐吸附的难度, 黏土层和砂层中吸附盐含量分别下降 4.8%和 7.7%.

(3) 在渗流的作用下, 冻结管的冻结影响范围会被缩减. 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 15 m/d, 在垂直于渗流方向上, 砂层和黏土层中结晶盐的产生范围分别缩减了 55.2%和 15.3%; 在冻结管左、右两侧距冻结管 0.3 m 位置处的非冻结区, 黏土层和砂层的总含盐量分别增加了 8.5%和 7.4%.

参考文献:

[1] Cai H B, Liu Z, Li S, et al. Improved analytical prediction of ground frost heave during tunnel construction using artificial ground freezing technique[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 92: 103050.

[2] Marwan A, Zhou M M, Abdelrehim M Z, et al. Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 75: 112-125.

[3] Cai H B, Hong R B, Xu L X, et al. Frost heave and thawing settlement of the ground after using a freeze-sealing pipe-roof method in the construction of the Gongbei Tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 125: 104503.

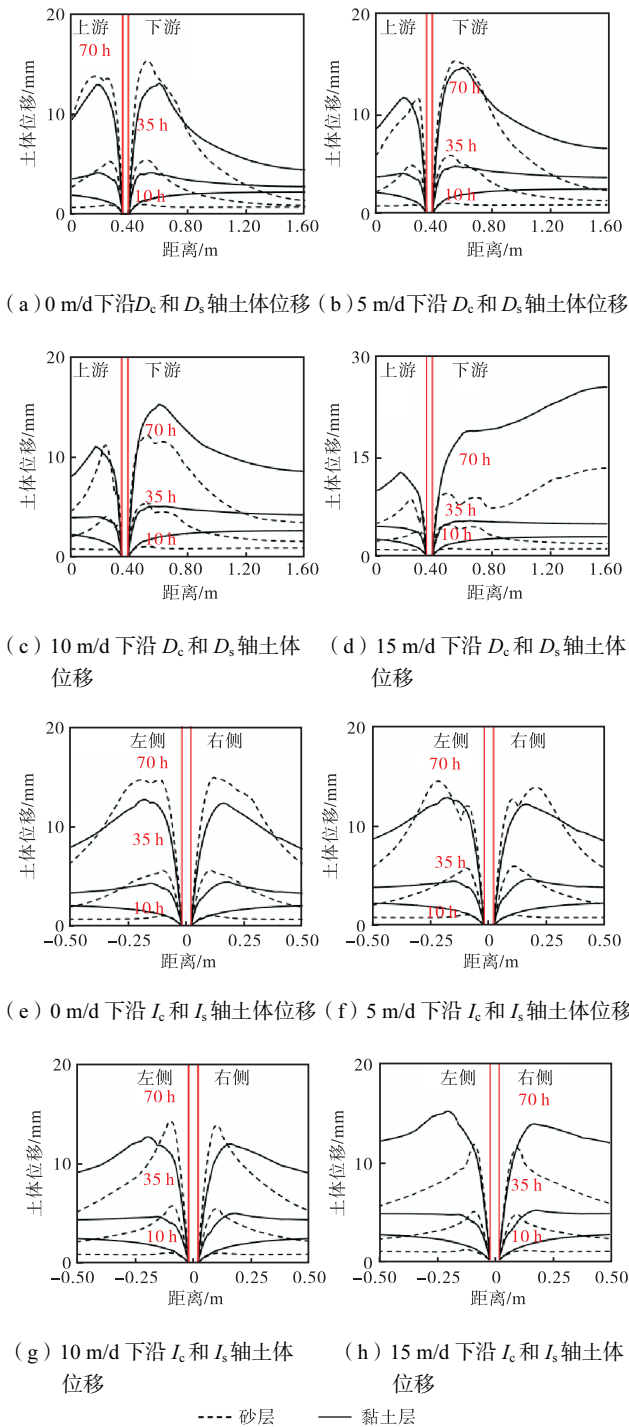


图 10 不同渗流速度下沿 D_c 、 D_s 、 I_c 和 I_s 轴土体位移分布情况
 Fig.10 Soil displacement distribution along axes D_c , D_s , I_c and I_s at different seepage velocities

- [4] Hu X D, Hong Z Q, Fang T. Analytical solution to steady-state temperature field with typical freezing tube layout employed in freeze-sealing pipe roof method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 79: 336-345.
- [5] Hong Z Q, Hu X D. Application of analytical solution to steady-state temperature field by double-row-pipe freezing and verification with field measurement: A case study of connected aisle[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 6435060.
- [6] 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: 4136-4142.
- [7] Long W, Rong C X, Shi H, et al. Temporal and spatial evolution law of the freezing temperature field of water-rich sandy soil under groundwater seepage: A case study[J]. *Processes*, 2022, 10(11): 2307.
- [8] Hong Z Q, Hu X D, Fang T. Analytical solution to steady-state temperature field of freeze-sealing pipe roof applied to Gongbei tunnel considering operation of limiting tubes[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 105: 103571.
- [9] Hong Z Q, Zhang J, Han L, et al. Numerical study on water sealing effect of freeze-sealing pipe-roof method applied in underwater shallow-buried tunnel[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 794374.
- [10] 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.
- [11] Yang X, Ji Z Q, Zhang P, et al. Model test and numerical simulation on the development of artificially freezing wall in sandy layers considering water seepage[J]. *Transportation Geotechnics*, 2019, 21: 100293.
- [12] 董艳宾, 荣传新, 王 彬, 等. 大流速地下水作用下多圈冻结孔优化布置方法研究[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(4): 18-25.
- Dong Yanbin, Rong Chuanxin, Wang Bin, et al. Study on optimal arrangement method of multi-circle frozen hole under action of large velocity groundwater[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(4): 18-25(in Chinese).
- [13] Rong C X, Sun S C, Cheng H, et al. Experimental study on temporal and spatial evolutions of temperature field of double-pipe freezing in saline stratum with a high velocity[J]. *Energies*, 2022, 15(4): 1308.
- [14] 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 Fangzheng, Ding Hang, Zhang Xuzhong. Model test research of formation law of double-row-pipe freezing wall in water rich sand layer under seepage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(2): 386-395(in Chinese).
- [15] 荣传新, 王 彬, 程 桦, 等. 大流速渗透地层人工冻结壁形成机制室内模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(3): 596-613.
- Rong Chuanxin, Wang Bin, Cheng Hua, et al. Laboratory model test study on formation mechanisms of artificial frozen walls in permeable strata with high seepage velocity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(3): 596-613(in Chinese).
- [16] Shi C H, Sun X H, Liu S L, et al. Analysis of seepage characteristics of a foundation pit with horizontal waterproof curtain in highly permeable strata[J]. *Water*, 2021, 13(9): 1303.
- [17] Hu X D, Deng S J, Wang Y. Test investigation on mechanical behavior of steel pipe-frozen soil composite structure based on freeze-sealing pipe roof applied to Gongbei tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 79: 346-355.
- [18] Zhang X D, Wang Q, Yu T W, et al. Numerical study on the multifield mathematical coupled model of hydraulic-thermal-salt-mechanical in saturated freezing saline soil[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(7): 04018064.
- [19] Hou R J, Li T X, Fu Q, et al. Research on the distribution of soil water, heat, salt and their response mechanisms under freezing conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104486.
- [20] Zhang X D, Wang Q, Wang G, et al. A study on the

- coupled model of hydrothermal-salt for saturated freezing salinized soil[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017: 4918461.
- [21] Hu X D, Zhang L Y, Han Y G. An analytical solution to temperature distribution of single-row-piped freezing with different pipe surface temperatures[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 353/354/355/356: 478-481.
- [22] Zhang J, Lai Y M, Li J F, et al. Study on the influence of hydro-thermal-salt-mechanical interaction in saturated frozen sulfate saline soil based on crystallization kinetics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118868.
- [23] Wu T, Zhou X M, Zhang L G, et al. Theory and technology of real-time temperature field monitoring of vertical shaft frozen wall under high-velocity groundwater conditions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2021, 189: 103337.
- [24] Qiu L J, Li J H, Wang Y S. Similarity model test on stress and deformation of freezing pipe in composite strata during active freezing[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5283.
- [25] Wang Y T, Hua W H, Xu X T, et al. Moisture migration in the Qinghai-Tibet silty clay within an added quartz sand layer under one-dimensional freezing[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 202: 103627.
- [26] Zhou L Z, Zhou F X, Ying S, et al. Study on water and salt migration and deformation properties of unsaturated saline soil under a temperature gradient considering salt adsorption: Numerical simulation and experimental verification[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 134: 104094.
- [27] 邹 燃. 天津滨海新区吹填土固结前期微观特征及沉降过程模拟研究[D]. 长春: 吉林大学建设工程学院, 2013.
- Zou Ran. Study on the Microscopic Feature and Process Simulation of Previous Settlement Consolidation of Dredger Fill in Binhai New Area of Tianjin[D]. Changchun: College of Construction Engineering, Jilin University, 2013 (in Chinese).
- [28] 缪姜燕. 考虑渗流影响的软黏土动力特性试验研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2018.
- Miao Jiangyan. Experimental Study on Dynamic Characteristics of Soft Clay Considering Seepage Effect[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2018 (in Chinese).

(责任编辑: 武立有)