

DOI: 10.11779/CJGE2024S20031

渗流条件下滨海地层人工冻结多场耦合理论模型

朱紫义¹, 任磊², 高国耀¹, 郭伟¹, 任宇晓¹, 冯守中^{*3}, 祝显鹏¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 安徽滁宁高速公路股份有限公司, 安徽 滁州 239000; 3. 滁州学院土木与建筑工程学院, 安徽 滁州 239000)

摘要: 采用 Navier-Stokes 方程考虑流体动量守恒对渗流过程的影响, 建立了考虑渗流对滨海砂土地层人工冻结过程影响的水-盐-热-力学理论模型。理论模型的计算结果与试验吻合良好, 验证了所提模型的准确性。通过参数分析, 探讨了渗流速度对冰、盐空间分布的影响。研究发现, 渗流削弱了冻结效果, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 冻结管左右两侧的土体位移降低了 23.1%; 冻结管左右两侧的结冰范围缩减了 37.8%; 冻结管左右两侧的盐分的析出范围缩减了 42.7%; 砂层上游的吸附盐突变位置向下游移动了 52%, 下游的吸附盐突变位置向下游移动了 32%。

关键词: 人工冻结; 冻结管; 渗流; 砂地层; 多场耦合

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0171-06

作者简介: 朱紫义(1999—), 女, 河北邯郸人, 硕士, 主要研究方向为岩土工程。E-mail: zhuzy@hfu.edu.cn。

Multi-field coupling theoretical model for artificial freezing of coastal soils under seepage

ZHU Ziyi¹, REN Lei², GAO Guoyao¹, GUO Wei¹, REN Yuxiao¹, FENG Shouzhong³, ZHU Xianpeng¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Anhui Chuning Expressway Co., LTD, Chuzhou 239000, China; 3. College of Civil and Architecture Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: A hydro-salt-thermal-mechanical theoretical model for the influences of seepage flow on the artificial freezing process in sand-clay stratum is derived. The influence of momentum conservation of fluid during seepage process is considered by using the Navier-Stokes equation. The good agreement between the results from the theoretical model and laboratory tests in the literature verifies the accuracy of the proposed model. The parametric studies are conducted to investigate the influences of the seepage velocities on the spatial distributions of ice and salinity. It is found that the seepage weakens the freezing effects. With the seepage velocity increases from 0 to 10 m/d, at the left and right sides of the freezing pipe, the soil displacement decreases by 23.1 %. The range of water freezing is reduced by 37.8 %. The range of salt precipitation is reduced by 42.7 %. The mutation position of the adsorbed salt in the upstream of the sand stratum moves by 52 % downstream, and that in the downstream moves downstream by 32 %.

Key words: artificial freezing; frozen pipe; seepage flow; sand stratum; multi-field coupling theory

0 引言

沿海地区的水下地下工程建设不可避免地会受到地下水渗流影响^[1], 将导致施工区域软土地基沉降, 造成周围建筑物和地面的不均匀沉降。为保持原有地层稳定, 人工冻结技术在岩土工程中广泛应用^[2], 包括海底隧道和城市地铁建设^[3]。流速较大条件下易出现冻结壁不闭合的现象^[4], 不能满足施工设计的要求。

在人工冻结过程中, 确定地层的冻结范围是非常重要的。基于热势叠加理论, Hu 等^[5]和 Pimentel 等^[6]推导了静水和渗流条件下不同冻结形式下的稳态温度场的理论公式, 用来预测圆形冻结壁的厚度和平均温度^[7]。地下水渗流的存在使等温线向下游移动, 下游

冻结壁厚度大于上游^[8]。但现有的解析解不能揭示多孔介质冻结过程中渗流与各物理场的耦合机制。

当存在地下水渗流时, 水流携带的热量导致冻结区的解冻^[9], 研究渗流条件下冻结过程中的多场耦合机制是必要的。考虑冻结过程中多场耦合变化, 建立了渗流条件下人工冻结过程多场耦合数值模型^[10]。饱和土的冻结过程涉及多场、多相, 针对沿海地区地下水含盐量高的问题^[11], 在多孔介质理论框架下建立多

基金项目: 国家自然科学基金项目(52171273, 52108335, 52078336); 天津市科技计划项目(20JCJCJC00220)

收稿日期: 2024-06-21

***通信作者:** (E-mail: fsz63@vip.163.com)

场宏观模型, 模拟地下水渗流条件下的冻结过程。

本文建立了渗流条件下砂地层在人工冻结时的水-盐-热-力耦合模型。充分考虑非对流通量对传热传质的影响, 固体颗粒对盐的解吸和吸附作用, 以准确模拟人工冻结过程。采用 Navier-Stokes 方程来考虑渗流过程中流体的动量守恒, 研究了单管冻结条件下, 不同渗流速度下滨海砂地层中各组分的分布规律。

1 控制方程

1.1 固体基质质量守恒方程

多孔介质中固体基质的质量守恒方程为^[12]:

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

式中: w_p^s 为固体颗粒吸附盐的质量分数; T 为温度; P_l 为孔隙水力压力。

1.2 水分守恒方程

多孔介质中水分质量守恒方程的展开式为

$$\begin{aligned} nS^l(1-w_p^l)\beta_{lp}\rho^l \frac{\partial P_l}{\partial t} + \text{div}(\rho_w^l \mathbf{q}^l) - \text{div}(\mathbf{j}_p^l) \\ = -\frac{\partial m_i}{\partial t} - \frac{\partial m_p}{\partial t} + n\rho_w^l \frac{\partial S^i}{\partial t} + n\rho_w^l \frac{S^p}{\partial t} - S^l\rho_w^l \frac{\partial n}{\partial t} + \\ nS^l\rho^l[(1-w_p^l)\beta_{lw} + 1] \frac{\partial w_p^l}{\partial t} - nS^l\rho_w^l \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \\ (1-w_p^l)nS^l\beta_{IT}\rho^l \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: β_{lp} 为液相压缩率; β_{IT} 为液体热膨胀系数; β_{lw} 为浓度依赖系数; $\partial m_i / \partial t$ 为冰的结晶速率; $\partial m_p / \partial t$ 为结晶盐水合物的形成速率; $\mathbf{j}_p^l$ 为盐在液相中的非对流通量; ρ_w^l 为液态的水密度; ρ^l 为液相的密度; w_p^l 溶解盐的质量分数。

冰的质量守恒方程为^[13]

$$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{S^i} \frac{\partial S^i}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{1}{nS^i\rho^i} \frac{\partial m_i}{\partial t} \quad (3)$$

式中: ρ^i 为冰的密度。

1.3 盐分守恒方程

考虑冻结多孔介质液相中盐溶液的非对流通量, 溶液的质量守恒为

$$\frac{\partial(nS^l\rho_p^l)}{\partial t} + \text{div}(nS^l\rho_p^l\mathbf{v}^l) + \text{div}(\mathbf{j}_p^l) = -\frac{\partial m_p}{\partial t} - \frac{\partial m_p^l}{\partial t} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{j}_p^l$ 为冻土中盐的非对流通量; $\partial m_p / \partial t$ 为结晶盐的相变速率。

可得到展开的溶液质量守恒方程:

$$\frac{1}{n} \left(1 - \frac{\rho^s w_p^s}{\rho^l w_p^l} \right) \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{S^l} \frac{\partial S^i}{\partial t} - \frac{1}{S^l} \frac{S^p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} +$$

$$\begin{aligned} \left[\beta_{lp} + \frac{(1-n)w_p^s\rho^s}{nS^l\rho^l w_p^l} \beta_{sp} \right] \frac{\partial P_l}{\partial t} + \frac{(1-w_p^l\beta_{lw})}{w_p^l} \frac{\partial w_p^l}{\partial t} + \\ \frac{1}{w_p^l} \frac{(1-n)\rho^s}{nS^l\rho^l} \frac{\partial w_p^s}{\partial t} - \left[\frac{(1-n)w_p^s\rho^s}{nS^l\rho^l w_p^l} \beta_{sT} + \beta_{IT} \right] \frac{\partial T}{\partial t} \\ \text{div}(\rho^l w_p^l \mathbf{q}^l) + \text{div}(\mathbf{j}_p^l) - \frac{\partial m_p}{\partial t} - \frac{\nu_l M_l}{M_p} \frac{\partial m_p}{\partial t} \\ = \frac{nS^l\rho^l w_p^l}{nS^l\rho^l w_p^l} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: w_p^l 为液相中盐的质量分数; $\mathbf{j}_p^l$ 冻为土中盐的非对流通量; $\mathbf{q}^l$ 为液相相对流动体积; M_l 为液体的摩尔质量; M_p 为结晶盐的摩尔质量。

考虑多孔介质中盐的吸附-解吸效应, 冻土中盐分的沉积动力学公式为

$$\begin{aligned} (1-n)\rho^s \frac{\partial w_p^s}{\partial t} + \text{div}[(1-n)\rho^s \mathbf{v}^s] \\ = k_{ad} nS^l \rho^l w_p^l - k_{de} (1-n)\rho^s w_p^s \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k_{ad} 和 k_{de} 分别为吸附系数和解吸系数。

结晶盐的质量守恒方程为^[13]

$$\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{S^p} \frac{\partial S^p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{1}{n\rho^p S^p} \frac{\partial m_p}{\partial t} \quad (7)$$

式中: ρ^p 为结晶盐的密度。

1.4 能量守恒方程

多孔介质冻结过程中的能量守恒与热容和热传导度有关, 能量守恒方程表示为

$$\begin{aligned} [(1-n)\rho^s c_s + nS^l\rho^l c^l + nS^i\rho^i c_i^i + nS^p\rho^p c_p^p] \frac{\partial T}{\partial t} + \\ \text{div}[(c_p^l \mathbf{j}_p^l - \rho^l c^l \mathbf{q}^l)(T - T_0) - \lambda_{eff} \nabla T] \\ = L_{wi} \frac{\partial m_i}{\partial t} + L_{sc} \frac{\partial m_p}{\partial t} + L_{lp} \frac{\nu_l M_l}{M_p} \frac{\partial m_p}{\partial t} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量; λ_{eff} 为冻土有效导热系数; c_s , c^l , c_i^i 和 c_p^p 分别代表固体颗粒、液相、冰和结晶盐的热容; L_{wi} , L_{lp} , L_{sc} 分别为水、冰的相变潜热、自由水、结合水相变潜热和溶液-结晶盐的相变潜热。

1.5 动量守恒方程

人工冻结过程中的各向异性和渗流状态影响着砂土地层的冻结状态, 在动量守恒中引入 Navier-Stokes 方程来描述渗流的动量守恒。土体冻结过程中 π 相的动量守恒方程为

$$\rho^\pi n^\pi \frac{d\mathbf{v}^\pi}{dt} - \text{div}(n^\pi \boldsymbol{\sigma}^\pi) - \rho^\pi n^\pi \mathbf{g}^\pi = \dot{m}^\pi \quad (9)$$

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

可得到土体的动量守恒方程:

$$n\rho^l \left(F_g - \frac{\nabla P^l}{\rho^l} + \mu_l \nabla^2 \mathbf{v}^l \right) - \text{div}(\boldsymbol{\sigma}^l + S^l P^l + S^i P^i + S^p P^p) -$$

表 1 数值模型中物理参数^[12]
Table 1 Physical parameters for numerical simulation^[12]

名称	符号	值	单位	名称	符号	值	单位
吸附系数	k_{ad}	2.5×10^{-4}	s^{-1}	水冰相变潜热	L_{wi}	6.01	$kJ \cdot mol^{-1}$
解吸系数	k_{de}	1.5×10^{-4}	s^{-1}	液相压缩率	β_{lp}	1×10^{-7}	kPa^{-1}
固相热膨胀系数	β_{sT}	7.8×10^{-6}	K^{-1}	液体热膨胀系数	β_{lr}	2.1×10^{-4}	K^{-1}
浓度依赖系数	β_{lw}	0.6923	—	液态水密度	ρ_w^l	1000	$kg \cdot m^{-3}$
冰的密度	ρ^l	917	$kg \cdot m^{-3}$	摩尔气体常数	R	8.2	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
结晶盐密度	ρ^p	1460	$kg \cdot m^{-3}$	结晶盐的物质的量	M_p	0.142	$kg \cdot mol^{-1}$
盐的动力学参数	K_p	1.8×10^{-3}	s^{-1}	液相的物质的量	M_l	0.018	$kg \cdot mol^{-1}$
吸湿膨胀系数	β_s	1.5×10^{-4}	—	固体热容	c_s	850	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
冰的动力学参数	K_i	5.82×10^{-3}	s^{-1}	冰的热容	c_i^l	2090	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
自由水结合水相变潜热	L_{lp}	73.04	$kJ \cdot mol^{-1}$	结晶盐的热容	c_p^p	1743	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
盐、结晶盐相变潜热	L_{sc}	2.34	$kJ \cdot mol^{-1}$	固相压缩率	β_{sp}	2×10^{-4}	kPa^{-1}

$$[(1-n)\rho^s + nS^l\rho^l + nS^i\rho^i + nS^p\rho^p] \mathbf{g} = \dot{m}^\pi \quad (10)$$

式中： F_g 为单位质量力； μ_l 为液相的动力黏度； P^i 为冰压力； P^p 为孔隙中盐结晶压力； σ' 为有效应力。

1.6 边界条件

将耦合方程（1）～（3），（5）～（8），（10）代入 COMSOL Multiphysics 进行求解。边界与外部存在热对流和热交换和水、盐供应。要解耦合方程，必须满足下列边界条件：

$$\left. \begin{aligned} (\rho_w^l \mathbf{q}^l - \mathbf{j}_p^l) \cdot \mathbf{n} &= \bar{P}^l, \\ (\rho^l w_p^l \mathbf{q}^l + \mathbf{j}_p^l) \cdot \mathbf{n} &= \bar{w}_p^l, \\ [(\rho_w^l c_w^l \mathbf{q}^l + c_p^l \mathbf{j}_p^l) \cdot (T - T_0) - \lambda_{eff} \nabla T] \cdot \mathbf{n} &= \bar{T}, \\ \sigma \cdot \mathbf{n} &= \bar{\varepsilon}_v. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

2 理论验证

结合 Wang 等^[14]的渗流条件下人工冻结过程温度场验证本文理论模型。模型试验如图 1 所示，箱体中间设置一根外径为 42 mm 的冷冻管。整个模型的初始温度为 10℃，冻结管的初始温度为 -30℃。在箱体 0.4 m 处设置 D 轴。表 1 给出了本研究使用的物理参数，模型试验所用砂土的干密度为 1612 kg/m³，孔隙率为 0.33，渗透系数为 2.28×10⁻⁴ m/s。理论模型中 D 轴的温度分布结果与试验结果对比如图 2 所示。可以看出理论分析结果与模型试验结果基本一致。

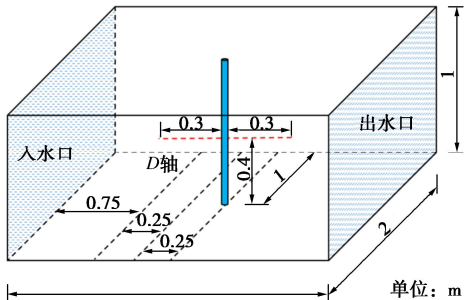


图 1 Wang 等^[14]的模型试验示意图
Fig. 1 Sketch of model tests conducted by Wang et al.^[14]

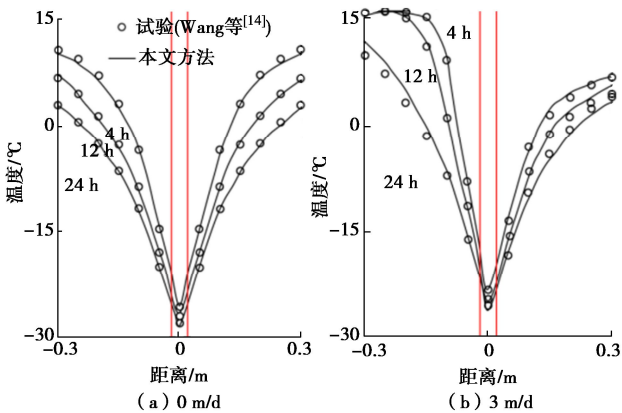


图 2 不同渗流速度下 D 轴上 Wang 等^[14]的试验中温度分布与理论验证

Fig. 2 Verification of proposed theory with model tests conducted by Wang et al.^[14] and spatial temperature distribution at (a) 0 m/d and (b) 3 m/d seepage velocity on D axis

3 参数研究

通过参数化研究，分析了不同渗流速度和温度梯度下各组分在砂层中的空间分布。砂土层模型试验渗流如图 3 所示。模型边界目标参数如表 2 所示，砂层中 w_{p0}^l 和 T_0 的初始值分别为 0.005 和 10℃。冻结管壁温度设为 -27℃，渗流只存在于砂层底部。冰饱和度 S^i 、结晶盐饱和度 S^p 、吸收盐含量 w_{p0}^s 的初始条件和边界条件均为 0。选取图 2 中位于砂层中 4 条轴线 D_c ， D_s ， I_c ， I_s ，绘制温度、冰、盐、位移分布图。

表 2 参数分析中使用的目标参数

Table 2 Target parameters used in parametric studies						
项目	P_0/kPa	$T_p/^\circ C$	$T_0/^\circ C$	w_{p0}^l	w_p^l	渗流/($m \cdot d^{-1}$)
试验	$\gamma_w \Delta H$	-30	10	—	—	0,3
渗流	$\gamma_w \Delta H$	-27	13	0.005	0.005	0,5,10

不同渗流速度的下部砂层中温度沿 D 轴和 I 轴分布情况如图 4 所示。随着渗流速度从 0 m/d 增加到 10

m/d, 在人工冻结 70 h 后, 在沿着 D 轴方向上的砂层上游的温度增加 8.8°C , 下游最高降低了 13.2°C , 如图 4 (a) 所示。当渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 人工冻结 70 h 后, 冻结管左右两侧的沿着 I 轴的温度升高了 6.2°C , 如图 4 (b) 所示。

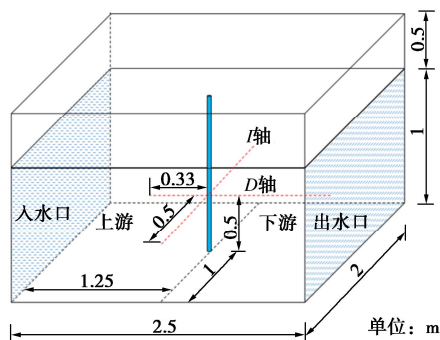


图3 砂地层模型

Fig. 3 Sketch of sand stratum model

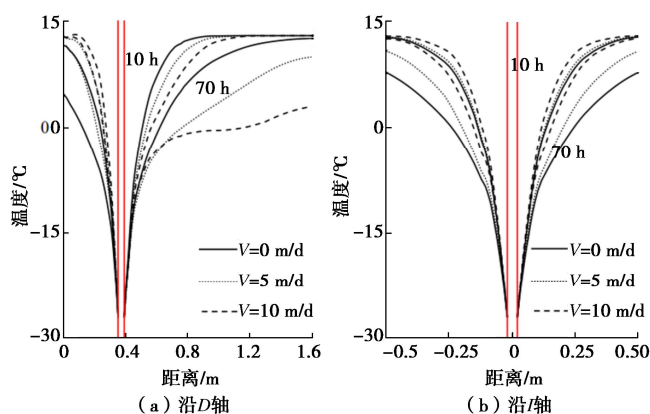


图4 在不同渗流速度下, 冻结 10, 75 h 后, 砂层中温度分布
Fig. 4 Distribution of temperature along (a) D axis and (b) I axis in sand stratum after 10 and 75 hours of freezing under different seepage velocities

不同渗流速度对下部砂层中含冰量沿 D 轴和 I 轴分布情况如图 5 所示。渗流导致水分开始冻结的位置沿着 D 轴向下游移动。随着渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 在人工冻结 70 h 后, 在沿着 D 轴方向上的砂层上游水分冻结的位置向下游移动了 63.5%, 下游中水分冻结的位置向下游移动了 173.2%, 如图 5 (a) 所示。当渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 即人工冻结 70 h 后, 冻结管左右两侧的沿着 I 轴的水分冻结范围缩减了 37.8%, 如图 5 (b) 所示。

不同渗流速度对下部砂层中结晶盐量沿 D 轴和 I 轴分布情况如图 6 所示。图 6 (a) 给出了沿着渗流方向上结晶盐含量随着渗流和冻结时间变化的分布情况, 盐分析出的位置沿着 D 轴向下游移动。随着渗流

速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 在人工冻结 70 h 后, 在沿着 D 轴方向上的砂层上游盐分开始析出的位置向下游移动了 65.1%, 下游中盐分开始析出的位置向下游移动了 182.7%。当渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 即人工冻结 70 h 后, 冻结管左右两侧的沿着 I 轴的盐分的析出范围缩减了 42.7%, 如图 6 (b) 所示。

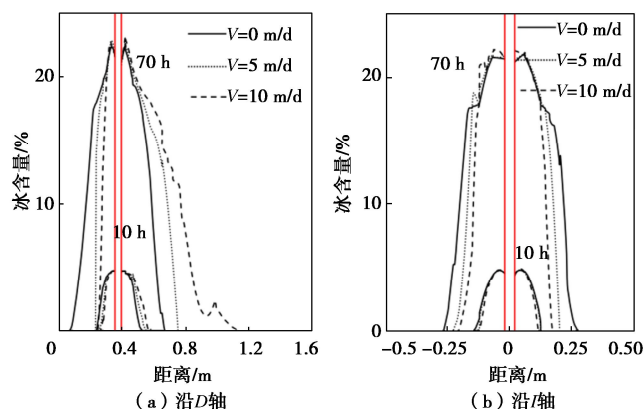


图5 在不同渗流速度下, 冻结 10, 75 h 后, 砂层中冰含量分布
Fig. 5 Distribution of ice content along (a) D axis and (b) I axis in sand stratum after 10 and 75 hours of freezing under different seepage velocities

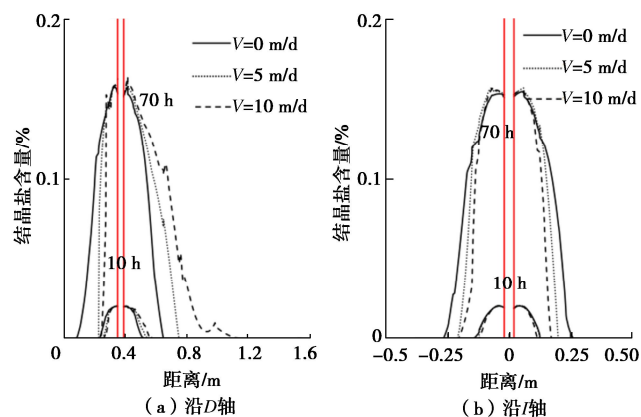


图6 在不同渗流速度下, 冻结 10, 75 h 后, 砂层中结晶盐含量分布
Fig. 6 Distribution of crystalline salt content along (a) D axis and (b) I axis in sand stratum after 10 and 75 hours of freezing under different seepage velocities

不同渗流速度对下部砂层吸附盐含量沿 D 轴和 I 轴分布的影响如图 7 所示。渗流削弱了下游的盐分吸附能力。随着渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 在人工冻结 70 h 后, 在沿着渗流的 D 轴方向上, 砂层上游的吸附盐突变位置向下游移动了 52%, 下游的吸附盐突变位置向下游移动了 32%, 如图 7 (a) 所示。当渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 即人工冻结 70 h 后,

冻结管左右两侧的沿着 I 轴的吸附盐突变范围向冻结管方向缩小了 16.2%，如图 7 (b) 所示。

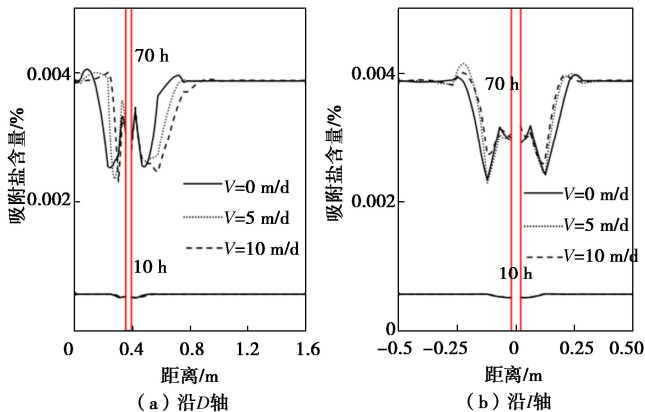


图 7 在不同渗流速度下, 冻结 10, 75 h 后, 砂层中吸附盐含量分布

Fig. 7 Distribution of adsorbed salt content along (a) D axis and (b) I axis in sand stratum after 10 and 75 hours of freezing under different seepage velocities

不同渗流速度对下部砂层中土体位移沿 D 轴和 I 轴分布情况如图 8 所示。随着冻结时间的增加, 砂地层在冻胀和盐胀的作用下土体位移逐渐增加。随着渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 在人工冻结 70 h 后, 在沿着 D 轴方向上的砂层上游的土体位移降低了 33.4%, 下游的土体位移降低了 14.3%, 如图 8 (a) 所示。当渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 即人工冻结 70 h 后, 冻结管左右两侧的沿着 I 轴的土体位移降低了 23.1%, 如图 8 (b) 所示。

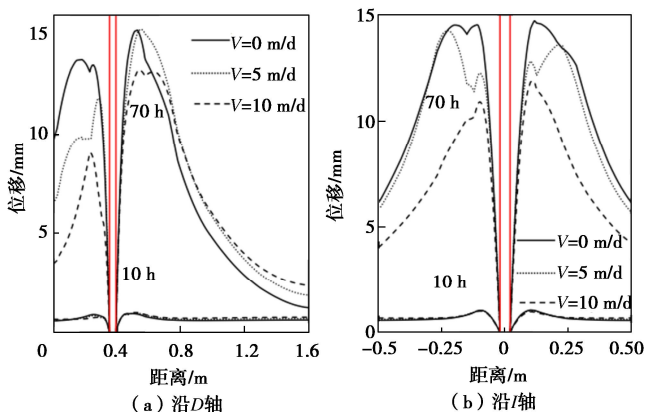


图 8 在不同渗流速度下, 冻结 10, 75 h 后, 砂层中位移分布

Fig. 8 Distribution of soil displacement along (a) D axis and (b) I axis in sand stratum after 10 and 75 hours of freezing under different seepage velocities

4 结 论

本文推导了渗流条件滨海砂土层人工冻结的水-盐-热-力学耦合模型。利用 COMSOL Multiphysics 软

件对导出的微分方程进行求解。理论计算结果与文献中实验室模型试验结果吻合较好, 验证了模型的准确性。通过参数分析, 研究了不同渗流速度下的砂地层中各组分的空间分布情况。得出以下 3 点结论。

(1) 在砂层冻结后, 地层中的孔隙被堵塞, 砂层底部上游的高温流体穿过地层的左右两侧下游流动。随着渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 在人工冻结 70 h 后, 砂层上游的最高温度增加 8.8℃。冻结管左右两侧的土体位移降低了 23.1%, 渗流削弱了冻结效果, 减小了冻结导致的土体位移。

(2) 在垂直于渗流方向上, 冻结管左右两侧的冰、结晶盐对称分布。在人工冻结 70 h 后, 随着渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 砂层上游水分冻结位置向下游移动 63.5%, 下游中水分冻结位置向下游移动 173.2%, 冻结管左右两侧的水分冻结范围缩减 37.8%。

(3) 冻结区域中盐分的吸附能力是被抑制的。随着渗流速度从 0 m/d 增加到 10 m/d, 在人工冻结 70 h 后, 砂层上游的吸附盐突变位置向下游移动 52%, 下游的吸附盐突变位置向下游移动 32%, 冻结管左右两侧的吸附盐突变范围向冻结管方向缩小 16.2%。

参考文献:

- [1] LIU X H, SUN Z Z, ZHU J P, et al. Study on stress-strain characteristics of pipeline-soil interaction under ground collapse condition[J]. Geofluids, 2022, **2022**: 5778761.
- [2] ALZOUBI M A, XU M H, HASSANI F P, et al. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **104**: 103534.
- [3] PAPAKONSTANTINOUS S, ANAGNOSTOU G, PIMENTEL E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 2013, **166**(3): 280-298.
- [4] CHEN K Z, HUANG S, LIU Y J, et al. Thermal, mechanical behavior and engineering response of frozen soil[J]. Geofluids, 2022, 7472284.
- [5] HU X D, YU J Z, REN H, et al. Analytical solution to steady-state temperature field for straight-row-piped freezing based on superposition of thermal potential[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, **111**: 223-231.
- [6] PIMENTEL E, SRES A, ANAGNOSTOU G. Large-scale laboratory tests on artificial ground freezing under seepage-flow conditions[J]. Géotechnique, 2012, **62**(3): 227-241.
- [7] 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.
- [8] MING F, CHEN L, LI D Q, et al. Estimation of hydraulic conductivity of saturated frozen soil from the soil freezing characteristic curve[J]. Science of the Total Environment, 2020, **698**: 134132.
- [9] LI M K, CAI H B, LIU Z, et al. Research on frost heaving distribution of seepage stratum in tunnel construction using horizontal freezing technique[J]. Applied Sciences, 2022, **12**(22): 11696.
- [10] ZHANG X D, WU Y J, ZHAI E C, et al. Coupling analysis of the heat-water dynamics and frozen depth in a seasonally frozen zone[J]. Journal of Hydrology, 2021, **593**: 125603.
- [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] 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.
- [13] GAO G Y, GUO W, REN Y X. Numerical study on coupled modelling of artificial freezing marine soil[J]. Computers and Geotechnics, 2023, **159**: 105409.
- [14] 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.

(编校: 孙振远)

(上接第 66 页)

- [43] ALMAJED A, LEMBOYE K, ARAB M G, et al. Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique[J]. Soils and Foundations, 2020, **60**(2): 356-371.
- [44] PRABHAKAR, ANNADURAI R. Synergistic effect of Polyvinyl Acetate (PVA) and Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) on the mechanical properties of natural sands[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, **20**: e03323.
- [45] HAMZA M, NIE Z H, AZIZ M, et al. Strengthening potential of xanthan gum biopolymer in stabilizing weak subgrade soil[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2022, **24**(9): 2719-2738.
- [46] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, **29**(2): 04016204.
- [47] VYDEHI K V, ALI BAIG MOGHAL A, MARIYAM RASHEED R. Shrinkage characteristics of biopolymer treated expansive soil[C]// Geo-Congress 2022. Charlotte, North Carolina. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2022: 92-99.
- [48] KANTESARIA N, CHANDRA P, SACHAN A. Stabilization of expansive soil using agar biopolymer[C]// IFCEE 2021. Dallas, Texas. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021: 272-281.
- [49] LIU S H, DU K, WEN K J, et al. Stabilization of expansive clayey soil through hydrogel for mechanical improvements[J]. International Journal of Civil Engineering, 2023, **21**(9): 1423-1431.
- [50] SHIBAEV A V, MURAVLEV D A, MURAVLEVA A K, et al. pH-dependent gelation of a stiff anionic polysaccharide in the presence of metal ions[J]. Polymers, 2020, **12**(4): 868.
- [51] CAI G J, ZHANG T, LIU S Y, et al. Stabilization mechanism and effect evaluation of stabilized silt with lignin based on laboratory data[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, **34**(4): 331-340.

(编校: 孙振远)