

DOI: 10.11779/CJGE2022S2038

人工冻土水热侵蚀问题室内试验研究

吴元昊¹, 孙 旻¹, 洪泽群²

(1. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200135; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 对人工冻结工程灾害过程中发生的人工冻土水热侵蚀问题进行了概念上的定义, 并指出该问题的实质是双移动边界位置的确定。采用自行研制的冻土侵蚀室内模拟试验装置对该问题进行研究, 介绍了试验装置及测点布置情况, 给出双移动位置的定量判定标准。选择影响水热侵蚀的水流速率、冻土初始温度、土体含水率 3 个主要因素作为试验变量, 采用控制变量法进行试验分组, 得到不同情况下双边界随时间的移动变化情况。试验研究发现: 双边界移动速率随流速呈现两阶段变化规律, 即先快速增加后平稳趋势, 表明冻土的存在使侵蚀速率大大减缓; 冻土初始温度对于边界移动的影响并不明显, 3 种情况下侵蚀边界移动情况基本一致; 土体饱和与否对水热侵蚀边界移动有很大影响, 土体未饱和时对应的潜蚀速率明显大于饱和时的潜蚀速率。

关键词: 冻结工程; 突变机理; 水热侵蚀; 双移动边界; 试验研究

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0173-06

作者简介: 吴元昊(1991—), 男, 河南驻马店人, 博士, 主要从事冻结法及隧道地下工程的研究工作。E-mail: wu_yuanhao163@163.com。

Laboratory tests on fluvial-thermal erosion of artificial frozen soil

WU Yuan-hao¹, SUN Min¹, HONG Ze-qun²

(1. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The problem of fluvial-thermal erosion of artificial frozen soil during the process of ground freezing disasters is conceptually defined, and its essence is the determination of the position of the double-moving boundary. The self-developed indoor simulation test device for the erosion of frozen soil is used to study the problem. The test device and the arrangement of measuring points are introduced, and the quantitative judgment standard for the double-moving boundary is given. Three main factors affecting the fluvial erosion are selected: water flow velocity, initial temperature of frozen soil and moisture content of soil. The control variable method is used to group the tests. The movements of the double boundaries over time under different conditions are obtained. It is found that the movement rate of the double boundaries shows a two-stage change pattern with the flow velocity. The movement rate increases rapidly and then slows down, indicating that the existence of the frozen soil greatly slows down the erosion rate. Under three different temperature conditions, the movement of erosion boundary is basically the same, indicating that the initial temperature of the frozen soil has few influences on the boundary movement. Whether the soil is saturated or not has a great influence on the movement of erosion boundary, and the corresponding erosion rate when the soil is not saturated is obviously greater than that when it is saturated.

Key words: ground freezing work; catastrophic mechanism; fluvial-thermal erosion; double-moving boundary; laboratory test

0 引 言

人工地层冻结法是一种有显著止水效果的的地层加固技术, 越来越广泛地应用于城市地下工程施工中^[1]。然而, 在不断的工程实践中也发生过一些事故或险情^[2-4], 轻则延缓工程进度、重则造成较大人员伤亡和财产损失。目前, 对人工冻结工程灾害过程机理的研究较少, 且多数为事故经验的定性总结^[5]。

对人工冻结工程灾害过程的研究表明, 灾害的发

生与地下水对冻土的侵蚀作用密切相关^[5-7]。例如, 对于冻土帷幕中某渗水孔隙(灾害源), 在地下水的侵蚀作用下其周围冻土温度上升, 冻土升温至融点后发生相变, 相变后的土体颗粒由于颗粒间黏结作用大大减弱, 在水流冲刷作用下作为溶质被带走。以上过程中, 水对冻土的作用主要包括力的冲刷作用和热的侵蚀作用

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1452300)

收稿日期: 2022-12-01

两个方面，笔者将其称之为冻土的“水热侵蚀”。

本文通过自行研制的试验装置对于上述冻土水热侵蚀问题进行室内模拟试验研究，对该问题所涉及的两个侵蚀边界的位置判定给出相应定量标准，确定侵蚀问题的影响因素，得到了各影响因素对水热侵蚀问题的侵蚀规律。

1 冻土水热侵蚀问题描述

1.1 水热侵蚀的定义

如前所述，冻结工程灾害的产生和发展都与地下水对冻土的侵蚀作用相关，本文主要研究冻土渗透孔隙扩展过程：如图 1，设水流对土颗粒表面施加切应力 τ_a ，颗粒间临界抵抗作用为起动切应力 τ_c 。当冻土尚未融化时，除了颗粒间的黏聚力还有冰的胶结作用， τ_a 小于 τ_c ，孔隙大小不变；随着热量传递，颗粒间黏结作用减弱， τ_c 约等于 τ_a 时，土颗粒即将呈悬浮状态，一旦 τ_c 低于 τ_a ，土颗粒即变为悬浮状态，而后被水流带走。像这样，孔隙周边冻土被不断融化然后剥离带走，渗透通道逐渐扩大至发生涌水（砂）事故。

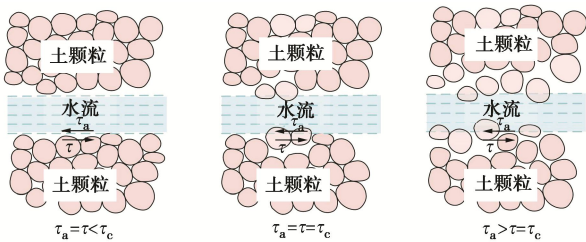


图 1 水热侵蚀作用下冻土孔隙扩展示意图

Fig. 1 Diagram of pore expansion under fluvial-thermal erosion

本文把上述“在水流作用下，冻土边界后退、冻土帷幕渗透通道扩展的过程”称为冻土的水热侵蚀 (fluvial-thermal erosion)，在人工冻结工程相对应的破坏问题即为人工冻土帷幕局部水热侵蚀破坏问题。

1.2 双移动边界问题

从理论上讲水热侵蚀实质上是一个移动边界问题，且涉及两个移动边界。如图 2 所示，第一个移动边界是冻土和融土的相变边界，又称“融化锋面”。

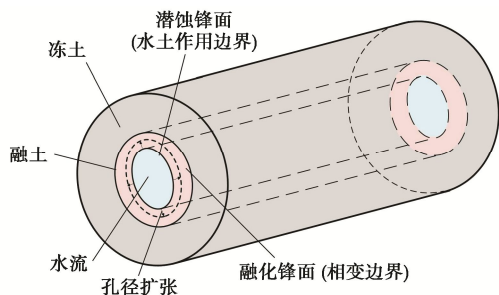


图 2 双移动边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double-moving boundary

第二个移动边界是水流和冻土接触面的水土作用边界，又称“潜蚀锋面”。这里“潜蚀”借用了土力学里的概念^[8]，是指在渗透水流作用下，土中细颗粒在粗颗粒形成的孔隙通道中移动、流失的现象，这里用“潜蚀”表示融土中的颗粒在渗透通道中流失也是贴切的。一般意义上的冻土被水流冲刷流走，实际上指的是潜蚀锋面的移动，而并非是融化锋面的移动。两者虽然在某些情况下会发生重合，但概念不同，需要加以区分。

2 试验方案

2.1 试验系统

如图 3，水热侵蚀试验系统可分为试验管、水流控制装置和测温装置。试验管中部为含有中心预制孔的圆柱形冻土试样；水流自试验管顶部流入，经缓冲后流经试样内孔，最后自底部流出，通过上下游的定水头水箱控制侵蚀水流的水头差；在内孔四周布置测温点，通过测点温度来确定双移动边界位置。其中，试验管尺寸为外径 20 cm、内径 18 cm、高 30 cm，材料选用壁厚 1 cm 的亚克力管。

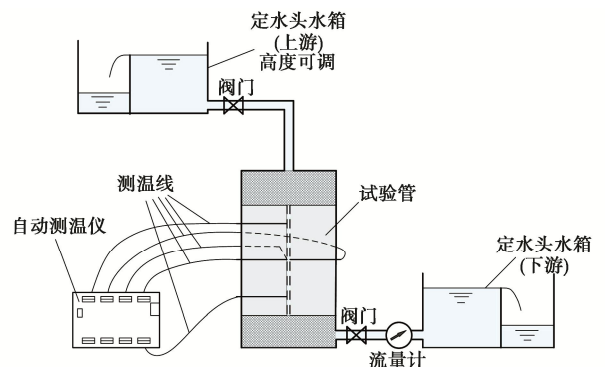


图 3 试验系统布置图

Fig. 3 Layout of testing apparatus

根据对称性，试验管内测温点布置如图 4 所示。从上到下依次选出 3 个横截面 A—A，B—B，C—C，A—A 和 C—C 截面各只设置一个测孔，分别命名为 AA1，CC1，由于边界效应影响，其监测值不直接作为移动边界的判定依据，后续不再讨论。

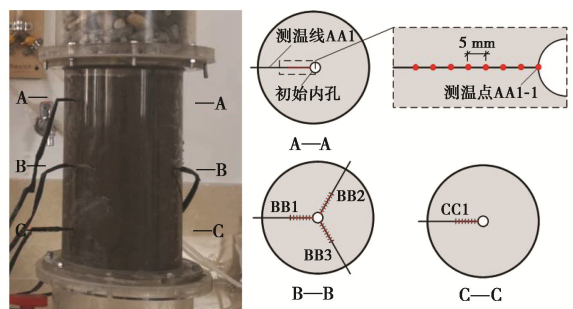


图 4 测温点布置图

Fig. 4 Layout of measuring points for temperature

B—B 截面设置 3 个测孔, 相邻夹角为 120°, 沿顺时针方向依次命名为 BB1, BB2, BB3。每个测孔布置 8 个测点, 从内向外依次编号为 XXX-1, XXX-3, …… , XXX-8, 第一个测点设置在内孔边缘处, 相邻测点间距 5 mm, 单孔测点范围覆盖径向 0~3.5 cm。

2.2 试样参数

试验采用上海地区黄浦江与长江汇流处吴淞口下的⑤₂层土进行重塑土试验。基本土工参数: 含水率 $w=32.3\%$, 重度 $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$, 土粒相对质量密度 $G_s=2.71$, 饱和度 $S_r=0.92$, 孔隙比 $e=0.691$, 渗透系数 $K=1.22 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 液限=34.2%, 塑限=20.2%, 液性指数=14.1。

颗粒级配: 界限粒径 d_{60} 、有效粒径 d_{10} 及平均粒径 D 分别为 0.0596, 0.01, 0.05 mm, 不均匀系数 C_u 为 6.28。

此外, 根据对该层土的热物理参数研究^[9], 冻土导热系数 $k_s=2.224 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ 、比热容 $c_s=1163 \text{ J/(kg}\cdot\text{°C)}$; 未冻土导热系数 $k_l=1.305 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ 、比热容 $c_l=1536 \text{ J/(kg}\cdot\text{°C)}$; 开始冻结温度 $T_1=0 \text{ °C}$, 完全冻结温度 $T_s=-2.1 \text{ °C}$ 。单位质量冻土的融化潜热为其中冰的相变潜热, 冰的融化潜热为 $L_i=3.35 \times 10^5 \text{ J/kg}$, 在 $T_s=-2.1 \text{ °C}$ 时未冻水含量 $W_u=3.3\%$, 则冻土的融化潜热可由下式计算:

$$L = \frac{W - W_u}{1 + W} L_i \quad (1)$$

则可计算该层冻土的融化潜热 $L=7.34 \times 10^4 \text{ J/kg}$ 。

2.3 试验方案

影响双移动边界移动速率的因素有很多, 如跟土性有关的参数有冻土初始温度、导热系数、含水率(冻土含冰量)、平均粒径、孔隙率、塑性指数、抗剪强度、黏聚性(分散性)等; 跟水流特性有关的参数有水流形态(层流、紊流)、水温、流速、黏度、含盐量等。本试验选择影响双移动边界的主要因素有冻土初始温度、土体含水率、水流速率 3 个变量进行试验。其他诸如土体的导热系数各向异性、水流的形态和黏度等, 由于其复杂性和不可控的特点, 未予考虑。

采用控制变量法进行试验分组见表 1。

表 1 试验分组情况

Table 1 Test groups

组别	水头差 $\Delta h/\text{m}$	初始温度 $T_0/\text{°C}$	饱和度 S_r
1-1, 2, 3	0.1, 0.15, 0.2		
1-4, 5, 6	0.25, 0.3, 0.35		
1-7, 8, 9	0.4, 0.5, 0.6,	-15	0.92
1-10, 11	0.8, 1.0		
1-12, 13	1.2, 1.4		
2-1, 2, 3	0.2	-5, -15, -25	0.92
3-1, 2			0.8, 0.92
3-3, 4	0.2	-15	1.0, 1.1

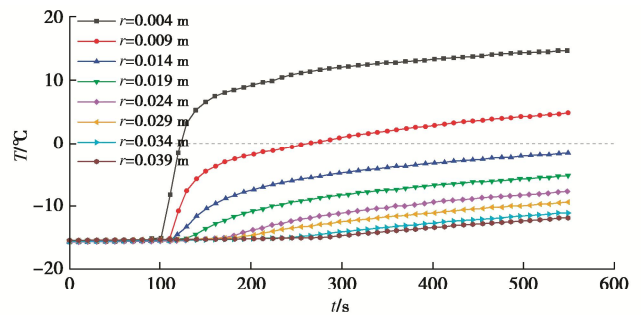
其中冻土初始温度 T_0 取 -5°C , -15°C , -25°C ; 冻土含冰量(含水率)取饱和度 S_r 分别为 0.8, 0.92, 1.0, 1.1(对应含水率分别为 28.1%, 32.3%, 35.1%, 38.6%); 水流速率由水头差 Δh 控制, Δh 依次取 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 m。

3 试验结果及分析

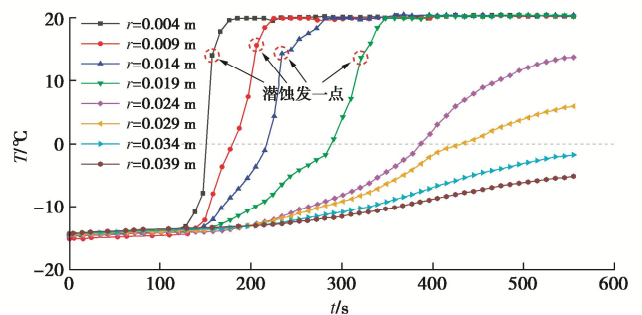
3.1 双移动边界位置的判定条件

因无法肉眼直接观察, 试验难点之一即在于双边界位置的确定。为掌握两移动锋面位置随时间的变化规律, 采用间接方法进行推算。

标准组和对照组的 BB2 测点温度变化如图 5, 对照组在内孔加上导热良好的薄壁钢管内衬, 别的试验条件与标准组相同: $T_0=-15 \text{ °C}$ 、饱和度 $S_r=0.92$ 、水头差 $\Delta h=0.2 \text{ m}$ 。可以发现两组测点温度变化规律明显不同: 未发生潜蚀的对照组, 其冻土传热基于固定边界进行, 测点升温速率越来越慢(图 5(a)), 温度曲线随时间趋于平缓; 而发生潜蚀的标准组, 冻土传热是基于移动内边界进行, 对于固定位置的测点, 随着移动边界靠近, 升温越来越快, 经过该点时速率达到峰值, 而后随移动边界远离, 升温减慢, 接近水流温度(图 5(b)), 温度曲线表现为两头平稳, 中间“陡峭”的趋势, 曲线由“陡峭”变“平缓”的转折点时刻即为移动边界经过该点的时间。这种曲线特征点在数学上称为“拐点”, 在本文中即是“潜蚀发生点”。



(a) 对照组 BB2 测面各测点温度随时间变化情况



(b) 标准组 BB2 测面各测点温度随时间变化情况

图 5 两种情况下测点温度随时间变化的典型特征曲线

Fig. 5 Characteristic curves of temperature change with time

下面给出融化与潜蚀发生时间点的定量确认标准。以标准组 BB2-2 测点为例(图 5(b) 红色曲线),

其温度变化与升温速率曲线见图 6。可以看出, 升温速率 $\Delta T/\Delta t$ 分别在 $t=t_0$ 和 $t=t_R$ 时刻经历了峰值, t_0 时刻由 $-10\text{ }^\circ\text{C}\sim-5\text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $-5\text{ }^\circ\text{C}\sim-0\text{ }^\circ\text{C}$, 可以认为冻土开始融化, 这是因为升至 $-5\text{ }^\circ\text{C}\sim-0\text{ }^\circ\text{C}$ 后, 传至该处的热量大部分用于融化潜热, 只有少部分用于升温显热, 因此升温速率与未融化时相比会有所降低。升至 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 后, 绝大部分冰已融化成水, 可认为融化锋面刚刚离开此处, 故融化锋面到达该点的时刻 t_S 可取温度曲线与 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 线交点所对应的时刻 (图 5 (b))。图 (a) 第二个峰值出现在 t_R 时刻, 此时该点温度已超过 $0\text{ }^\circ\text{C}$, 是由于潜蚀锋面到达该测点处造成升温越来越快, 锋面越过之后, 该点就处在水流之中, 温度逐渐升至与水流相同的温度。

综上所述, 融化锋面到达的时刻 t_S 可取测点温度曲线与 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 水平线交点所对应的时刻, 潜蚀锋面到达的时刻 t_R 可取温度曲线在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的部分中升温最快的时刻, 该时刻可由升温曲线的峰值点确定。

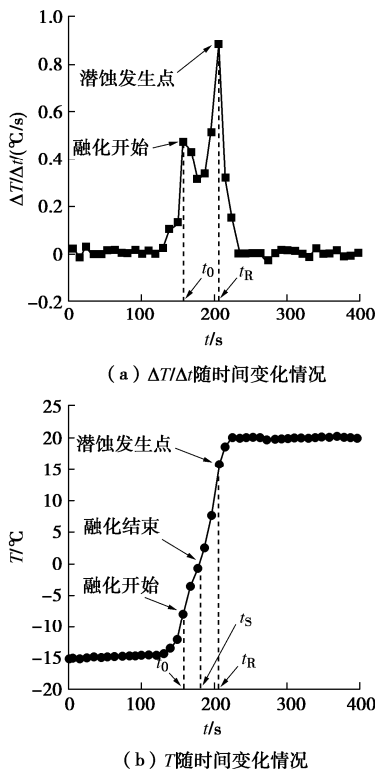


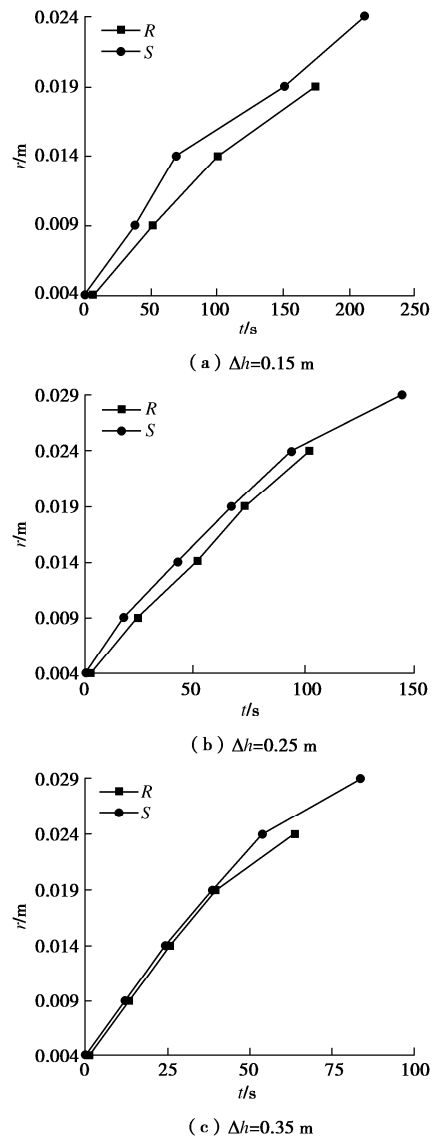
图 6 典型曲线的融化、潜蚀发生时间点判定示例

Fig. 6 Example of determining time point of melting and sub-erosion in typical curves

3.2 水头差 Δh (流速 v_w) 对水热侵蚀速率的影响

根据上述双移动边界位置判定方法, 得到各水头差 Δh 下潜蚀边界 $R(t)$ 和融化边界 $S(t)$ 随时间变化情况, 如图 7 所示。当 $\Delta h > 0.5\text{ m}$ 时, 内孔边界移动过快, 到达相邻测点的时间间隔较短, 小于传感器采集周期, 因此无法得到每个点的温度变化情况。这里选取测点 1 ($r=0.004\text{ mm}$) 到测点 4 ($r=0.019\text{ mm}$) 间平均移动速率作为潜蚀速率, 具体见图 8。

总体来说, 随着水头差的增大 (流速增加), 双边界移动速率普遍加快。各水头差 Δh 下 $R(t)$ 和 $S(t)$ 具有一定的相似性, 前期潜蚀边界随时间近似线性增加, 到一定程度后速率降低接近零, 内孔径几乎不再扩展, 该现象在流速较大时更为明显。这是因为当流速达到一定值后, 潜蚀速率主要受流速 v_w 影响, 在侵蚀前期, 流速维持恒定, 潜蚀速率 v_R 也基本保持恒定; 随着内部孔径 R 越来越大, 流经试样的水流量 Q 也越来越大, 当流量达到试验装置所能供给的最大流量 Q_m 后, 随着孔径进一步的增大, 流量无法增加, 上游水头出现下降, 进而导致水流流速降低, 潜蚀速率也随之下降, 当流速降低到一定程度后, 潜蚀边界停止移动, 即内孔孔径不再扩张。由于融化边界是跟随潜蚀边界移动的, 因此融化边界的移动规律与潜蚀边界也相似, 尤其在潜蚀移动速率较大的情况下 (如图 7 (c), (d)), 两边界基本保持重合; 当潜蚀速率较低 (如图 7 (a), (b)) 或下降时, 两条曲线分叉, 融化边界会逐渐拉开与潜蚀边界的距离。



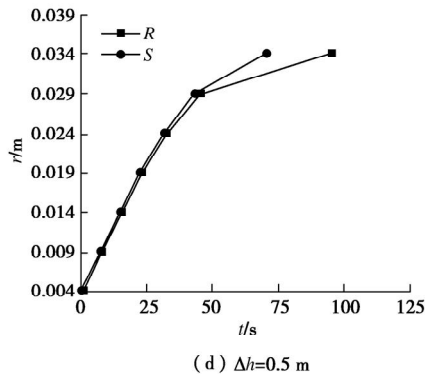


图 7 不同水头差下双边界随时间移动情况

Fig. 7 Double boundaries moving with time under different heads

潜蚀初期线性速率 v_{R0} 随水头差 Δh 变化情况如图 8 所示, 随着 Δh 越来越大, 潜蚀速率也逐渐增大, 增加速率呈先增加后减少的趋势。出现拐点的原因如下: 随着流速增加, 潜蚀速率和烧蚀速率加大, 流速较小时, 潜蚀速率小于烧蚀速率; 而当流速较大时, 潜蚀速率高于烧蚀速率, 最终潜蚀速率取二者的较小值。其中, 烧蚀速率是指假设冻土融化后土颗粒立即被水流带走的前提下, 水土作用边界移动的速率。则该速率为潜蚀速率的上限值, 潜蚀速率达到该值时, 表明潜蚀锋面和融化锋面一直重合。关于烧蚀速率的理论计算参见文献[7]。这一结果表明, 与非冻土相比, 冻土的存在能够极大的延缓局部侵蚀扩散的速率。

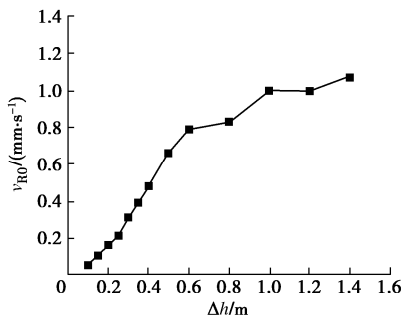


图 8 潜蚀初期线性速率 v_{R0} 随水头差 Δh 变化情况

Fig. 8 Variation of linear velocity v_{R0} with head difference Δh at initial stage of submergence erosion

3.3 冻土初始温度对水热侵蚀速率的影响

图 9 是 $\Delta h = 0.2 \text{ m}$, 冻土初始温度 T_0 分别为 -5°C , -15°C , -25°C 时潜蚀边界 R 和融化边界 S 随时间变化情况。可以看到, 3 种情况下潜蚀边界曲线基本一致, T_0 的影响并不明显; 而对于融化边界, T_0 的影响有一定规律性: T_0 从 -5°C 到 -25°C , $S(t)$ 曲线依次降低, 表明较低的冻土温度有利于阻止融化边界的发展。

3.4 冻土含冰量对水热侵蚀速率的影响

由于在冻结过程中无补给水源, 因此冻结前土样的含水率即认为是冻土的含冰量。如图 10 所示, 是水

头差 $\Delta h = 0.2 \text{ m}$, 冻土含冰量分别为 28.1%, 32.2%, 35.1%, 38.6% 时 $R(t)$ 随时间变化情况。可以看到, 土体饱和与否则对潜蚀边界移动有很大影响, 土体未饱和时潜蚀速率 0.18 mm/s 明显大于饱和时的潜蚀速率 0.07 mm/s 。其原因可能是在达到饱和之前, 土体含水率的增加一方面有利于土颗粒间黏聚力的增加, 另一方面则有利于冻土潜热的增加, 两方面都助于抵抗水热侵蚀。实际冻结工程中, 由于有水源补给, 冻土的含冰量往往要略微高于同一位置常温土, 从冻胀控制的角度来看, 含水率的增加当然是不利的, 然而对于冻土局部水热侵蚀问题, 由于冻结带来的适当含水率增加是有利于抵抗该侵蚀的。

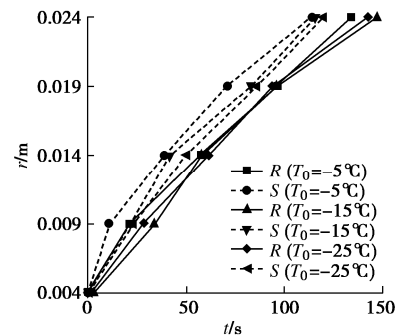


图 9 不同初始温度下双边界随时间变化情况

Fig. 9 Variation of double boundaries with time under different initial temperatures

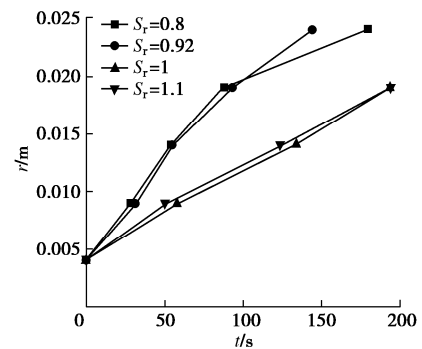


图 10 不同冻土含冰量下潜蚀边界(内孔边界)随时间移动情况

Fig. 10 Movement of sub-erosion boundary (inner hole boundary) with time under different ice contents of frozen soil

4 结 论

(1) 本文研发的冻土内孔冲刷装置能够较好模拟冻土局部水热侵蚀现象, 试验结果较为真实地反映了双移动边界随时间变化规律。

(2) 潜蚀速率 v_R 随水头差 Δh (流速 v_w) 呈现先快速增加后平稳趋势, 冻土的存在可大大减缓侵蚀速率。

(3) 冻土初始温度 T_0 对于潜蚀边界的移动的影响

响并不明显, 3种情况下潜蚀边界移动情况基本一致。

(4) 土体饱和与否对潜蚀边界移动有很大影响, 未饱和时的潜蚀速率明显大于饱和时的潜蚀速率。

参考文献:

- [1] 陈瑞杰, 程国栋, 李述训, 等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 40 - 44. (CHEN Rui-jie, CHENG Guo-dong, LI Shu-xun, et al. Development and prospect of research on application of artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(1): 40 - 44. (in Chinese))
- [2] 白云, 汤竞. 软土地下工程的风险管理[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(1): 21 - 27. (BAI Yun, TANG Jing. Risk management for underground project in soft soils[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(1): 21 - 27. (in Chinese))
- [3] 胡向东, 白楠, 李鸿博. 圣彼得堡地铁1号线区间隧道事故分析[J]. 隧道建设, 2008, **28**(4): 418 - 422. (HU Xiang-dong, BAI Nan, LI Hong-bo. Analysis on tunnel accident on line 1 of saint Petersburg metro[J]. Tunnel Construction, 2008, **28**(4): 418 - 422. (in Chinese))
- [4] HU X D, GUO W, ZHANG L Y, et al. Application of liquid nitrogen freezing to recovery of a collapsed shield tunnel[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, **28**(4): 04014002.
- [5] 李柱和. 临江地铁冻结工程事故机理及修复技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013. (LI Zhu-he. Research on the Mechanics About Accident of Subway Engineering with Refrigeration Construction Technology and Its Repairing Thechnology[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2013. (in Chinese))
- [6] HU X D, WU Y H, GUO W. Forensic investigation of a water inrush accident during ground freezing recovery work[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, **33**(2): 04019017.
- [7] 吴元昊, 胡向东. 柱坐标系下冻土内部热流侵蚀相变问题的求解[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(2): 660 - 666. (WU Yuan-hao, HU Xiang-dong. Solutions to phase change problem due to internal thermal erosion of frozen soil[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(2): 660 - 666. (in Chinese))
- [8] 李广信, 周晓杰. 土的渗透破坏及其工程问题[J]. 工程勘察, 2004, **32**(5): 10 - 13, 52. (LI Guang-xin, ZHOU Xiao-jie. Seepage failure of soil and its problems in engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004, **32**(5): 10 - 13, 52. (in Chinese))
- [9] 肖朝昀. 人工地层冻结冻土帷幕形成与解冻规律研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (XIAO Zhao-yun. Research on the Forming and Thawing of Frozen Soil Walls by Artificial Ground Freezing Method[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)