

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1009

水汽补给下砂土水分迁移规律及冻胀特性研究

雷华阳^{1,2,3}, 张文振¹, 冯双喜^{1,3}, 霍海峰⁴

(1. 天津大学 土木工程系, 天津 300354; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300354;
3. 中国地震局 地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350; 4. 中国民航大学 机场学院, 天津 300300)

摘 要: 利用自主研发的水分迁移和冻胀试验装备, 研究了不同初始含水率、冷端温度、干密度对砂土水分迁移规律的影响, 分析了三因素作用下砂土水平冻胀力和冻胀量的变化规律, 确定了冻结锋面位置。研究表明: 初始含水率和冷端温度对砂土的水分迁移和冻胀效果影响明显; 初始含水率从 0% 增加至 10%, 试样含水率峰值增大了 5.00 倍, 水平冻胀力和冻胀量不断增大, 冻结锋面位置上移至 2.5 cm 高度处。冷端温度从 -5 °C 降低至 -15 °C, 试样含水率峰值增大了 4.38 倍, 水平冻胀力和冻胀量不断增大, 冻结锋面位置上移至 2.6 cm 高度处。干密度对试样水分迁移和冻胀特性影响相对不明显, 整体呈现出在较小干密度下, 试样含水率、水平冻胀力和冻胀量增幅稍大的趋势, 冻结锋面集中在 2.2~2.5 cm 高度处。针对不同影响因素提出了水平冻胀力和冻胀量预测公式, 为认识水汽补给下砂土水分迁移规律及合理预防冻胀提供参考。

关 键 词: 砂土; 水分迁移; 冻胀特性; 水汽补给

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 01-0001-14

On water migration and frost heaving characteristics of sand under water vapor recharge

LEI Hua-yang^{1,2,3}, ZHANG Wen-zhen¹, FENG Shuang-xi^{1,3}, HUO Hai-feng⁴

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Education Ministry, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Simulation of Engineering Earthquake and Urban-Rural Seismic Resilience, China Earthquake Administration, Tianjin 300350, China; 4. School of Airport, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The influence of different initial water contents, cold end temperatures and dry densities on sand water migration was studied using the self-developed water migration and frost heaving testing equipment. The influence of these three factors on frost heaving force and frost heaving capacity and the position of ice peak were determined. The results show that the initial water content and cold end temperature have obvious influence on the soil water migration and frost heaving effect. The water content increases from 0% to 10%, the peak water content increases by 5.00 times. The lateral frost heaving force and the frost heaving amount are increasing, and the ice front position moves up to 2.5 cm in height. The cold end temperature reduces from -5 °C to -15 °C, the peak water content increases by 4.38 times. The lateral frost heaving force and the frost heaving amount are increasing, and the position of the ice peak moves up to 2.6 cm in height. Dry density has relatively insignificant influence on water migration and freezing characteristics of specimens. The results show an overall trend of slightly larger increases in specimen water content, lateral frost heaving force and frost heaving amount at smaller dry densities, and the position of the ice peak is concentrated in 2.2-2.5 cm in height. The prediction formulas of frost heaving force and frost heaving amount are put forward for different influencing factors, which can provide a reference for understanding the water migration law in sand under water vapor recharge and reasonably preventing frost heaving.

Keywords: sand; water migration; frost heaving characteristics; water vapor recharge

1 引 言

在“一带一路”、“交通强国”等国家倡议支撑下,

大规模高速铁路加速兴建。据调研, 75% 高速铁路线路施工和运营位于我国季节冻土区域 (季冻区), 如长吉高铁、盘营高铁及郑西高铁等^[1-4]。粗颗粒填

收稿日期: 2021-07-06

修回日期: 2021-11-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFC0805402); 土木工程防灾国家重点实验室开放基金项目 (No. SLDRCE17-01); 国家自然科学基金 (No. 52078334)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program (2017YFC0805402), the Open Fund Project of the State Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention (SLDRCE17-01) and the National Natural Science Foundation of China (52078334).

第一作者简介: 雷华阳, 女, 1974 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: lei.huayang74@163.com

通讯作者: 冯双喜, 男, 1988 年生, 博士后, 助理研究员, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: shuangxi@tju.edu.cn

料广泛应用于高铁路基基床底层。然而,已有季冻区高铁路基在降雨、地下水补给及温度等综合作用下,出现了多处因粗颗粒填料冻胀导致的路基上拱问题^[5]。研究发现,温度梯度引起的水汽不断向冷端汇集并相变,是诱发砂土冻胀的主要原因^[6-7]。因此,研究水汽补给条件下砂土水分迁移规律及冻胀具有重要意义,为减少工程事故和确保铁路安全运营提供必要的理论支撑。

关于水汽迁移引起土体工程性质变化方面的研究对象,主要集中为细砂^[8]、粉土^[9]和黏土^[10],重点考虑了温度梯度、初始含水率、干密度等因素对水汽迁移规律的影响。比如 Joshua 等^[11]指出,当存在纵向温度梯度时,细砂中水分主要以水蒸汽形式由高温端向低温端迁移;当水蒸汽冷凝成液态水时,会在温度梯度作用下由低温端向高温端迁移。Dobchuk 等^[12]通过试验发现干密度、孔隙率及扩散系数等是影响粉土中气态水迁移的主要因素。王铁行等^[13]认为,砂质粉土存在临界含水率,含水率过大或过小,水分迁移量均不明显。李彦龙等^[14]开展不同温度梯度下气态液态混合水迁移试验,提出气态水迁移量和液态水迁移量与温度梯度成正比,气态水迁移量增幅大于液态水迁移量增幅。通过分析发现,尽管已有文献对冻结土体水分迁移做了研究,但研究多集中在液态水和气态水共同作用,单纯气态水补给对粗粒土的水气迁移规律影响的成果较少。已有研究表明:粗粒土受水汽补给的影响较大,气态水迁移可造成试样较为明显的冻胀变形^[15]。

冻胀力和冻胀量是评价土体冻害的重要指标,冻胀力对揭示冻土与结构相互作用机制具有重要的理论意义,冻胀力(水平冻胀力、法向冻胀力和切向冻胀力)的研究集中在理论计算和试验分析两个

方面^[16]。如张正等^[17]以黄土为研究对象,发现最大水平冻胀力沿试样高度的降低呈现出先增大后减小趋势,最大值出现在试样相对高度为 0.6~0.8 处。高凤等^[18]针对 U 型沟渠,提出了法向和切向冻胀力的接触模型,并通过试验和数值模拟验证了接触模型的正确性。此外,冻胀量的研究集中在细粒含量、矿物成分和含盐量对土体冻胀特性的影响。如张玉芝等^[19]认为细粒含量对粗颗粒填料冻结深度的影响不显著。林超^[20]研究了黏土矿物对粉质黏土的冻胀量的影响,并认为蒙脱土含量为 20% 的试样的部分冻胀量来源于薄膜水迁移,其余冻胀量主要来源于土中水的原位冻结。吴亚平等^[21]对高含盐细粉土冻胀特性开展研究,发现含盐粉土冻胀量受含水率的影响较小,主要取决于含盐量。通过分析不难发现,目前针对水汽补给条件下土体的冻胀力和冻胀量的变化规律的研究较少,冻胀力和冻胀量的评价相对匮乏。

本文以高速铁路路基 B₃ 组填料(中砂)为研究对象,通过自主研发的水分迁移和冻胀试验装备进行冻结试验,分析了在水汽补给条件下冷端温度(表征温度梯度)、干密度及初始含水率对砂土水分迁移规律及冻胀特性的影响,获得了不同影响因素下试样温度、含水率及冻胀量的变化规律,确定了冻结锋面位置(冻结区域与未冻结区域分界面),提出了冻胀量和水平冻胀力的经验关系式。为后续理论及工程应用,提供了可借鉴的研究基础。

2 试验方案

2.1 试验试样

试验所用砂土试样取自丹大(丹东—大连)快速铁路某段路基工程,其基本物理力学参数指标如表 1 所示。

表 1 试验试样基本物理力学参数
Table 1 Basic mechanical properties of testing soil

天然密度/(g·cm ⁻³)	土体相对密度	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	压缩模量/MPa	颗粒分布/%		
				0.5~2.0 mm	0.25~0.50 mm	0.075~0.250 mm
1.76	2.66	5.3×10 ⁻²	44	26.2	54.6	19.2

2.2 试验装置

本文自主研发了水分迁移和冻胀试验装备,如图 1 所示。该装备由制冷装置、模型桶、监测系统和采样系统组成,工作原理如图 2 所示。压缩机、冷凝器、电磁阀、铜管和毛细铜管等连接构成一个微型冷冻装置,毛细铜管在冷冻盒内部密盘两层以加强制冷效果,冷冻盒套一层塑料薄膜放置于试样下部,作为冷端直接与砂土接触,冷冻盒与桶壁间隙用绝缘胶体堵塞,实现与外界水分和温度的隔绝。

模型桶采用有机玻璃制作,规格为 15 cm×10 cm×1 cm(高度×内径×厚度),外部用保温胶包裹,以减少试样和外界能量交换。沿高度每隔 2.0 cm 钻细孔,用于安装传感器监测试样温度和压力。

2.3 监测系统与传感器标定

监测系统包括温度、压力和位移的监测。

2.3.1 温度监测

采用的 PT100 温度传感器(尺寸为φ4 mm×30 mm)插入砂土试样中,传感器为 A 级精度等级,

温度监测范围为 $-200\sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$, 精度为 $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与温度显示器(CH702型数显智能温控仪表)连接, 可实时监测并记录温度变化。

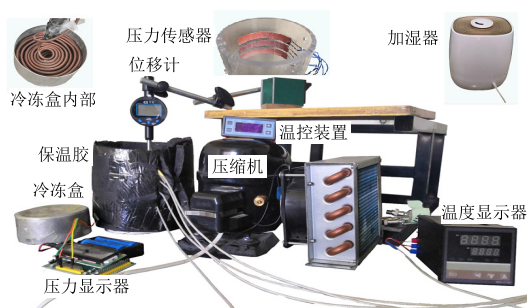


图1 自主研发的水分迁移和冻胀试验装置实物图
Fig.1 Independently developed water migration and frost heaving testing equipment

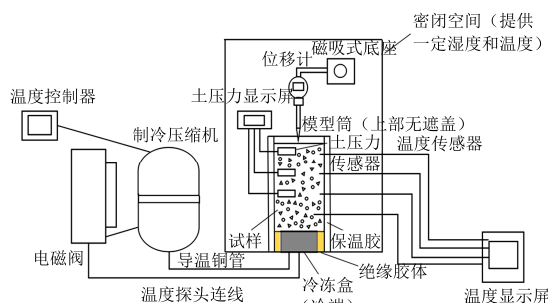


图2 温控装备原理图
Fig.2 Schematic diagram of temperature controlling equipment

2.3.2 冷端温度控制

冻结过程中底板温度由制冷设备自带温度探头进行控制, 温控探头埋置于铝盒与砂土接触面上 0.5 cm 高度中间。温度设定时首先预设冷端温度。当探头感知的试样温度高于设定温度时, 压缩机会持续制冷; 当探头感知的试样温度达到设定值时, 压缩机暂停工作; 待温度回升, 压缩机将继续制冷, 每启停一次的时间约 4 min 。其冷端温度误差始终控制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 如图3所示。

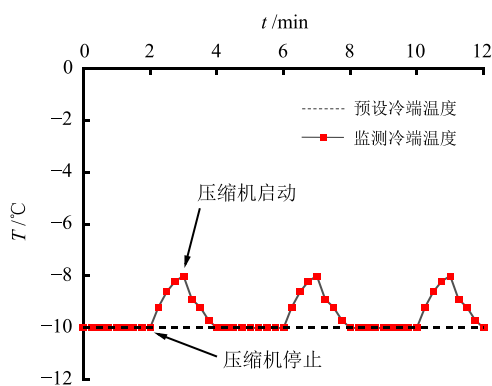
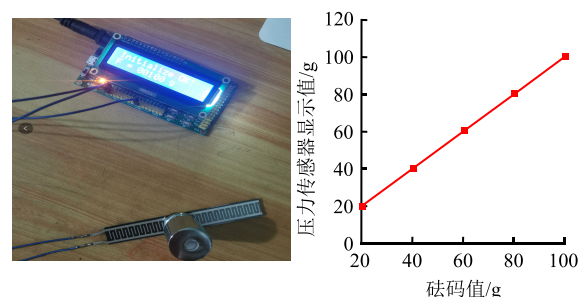


图3 冷端温度控制示意图($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.3 Schematic diagram of cold end temperature control ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

2.3.3 水平冻胀力监测

将RP-L柔性薄膜压敏传感器贴在模型内壁上, 与压力显示器(压力显示器由51单片机及LCD1602显示屏组成)连接, 可实时监测水平冻胀力的变化。压力感应范围为 $20\text{ g}\sim 10\text{ kg}$, 分辨率为 $\pm 5\%$ 。通过施加 $20\sim 100\text{ g}$ 砝码后(加载间隔为 20 g)对比砝码质量和显示值的方法标定传感器, 如图4所示。可以看出, 砝码质量和显示值吻合, 能够满足测量精度要求。



(a) 压力标定实物图 (b) 压力传感器显示值与砝码值关系曲线图

图4 压力传感器标定
Fig.4 Pressure sensor calibration

2.3.4 冻胀量监测

将直径为 0.5 cm 、厚度为 0.2 mm 硬铝片放置在试样上表面中央, 通过电子位移计(SHSIWI数显千分表)测量试样的冻胀量。位移计量程为 $0\sim 10\text{ mm}$, 精度为 0.001 mm 。

2.3.5 室内温度和湿度控制

利用空调维持室内温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 使用温度计实测浮动范围在 $\pm 3\%$ 以内; 利用加湿器维持室内湿度为 70% , 将湿度计置于模型桶旁, 每 2 h 人工调控一次, 控制湿度误差在 $\pm 5\%$ 以内。试验过程中, 试样上部开放于实验室内环境中, 能够保障水蒸气有效补给试样。

2.4 试验方案

试验取样地区冬季地表温度为 $-5\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地下常温层温度约为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此, 利用实验室内空调控制试样上部温度恒定为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (补湿端温度), 利用加湿装置控制室内湿度为 70% , 采用制冷装置控制试样下端温度分别为 -5 、 -10 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (冷端温度), 模拟自然条件下季冻区路基填料水汽补给的温度梯度。

考虑试样最大干密度为 1.60 g/cm^3 , 最优含水率为 10% 。结合《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016) [22], 填料选用B₃组中砂, 实验室内人工制备不同初始含水率(0% 、 5% 、 10%)、不同初始干密度(1.60 、 1.55 、 1.50 、 1.45 、 1.40 g/cm^3)的试样, 对比研究冷端温度、初始含水率和干密度对水汽迁

移规律和冻胀特性的影响。试验方案如表 2 所示, 每种工况每次做 7 个平行试验。

表 2 试验方案
Table 2 Experimental programme

工况	冷端温度 /°C	补湿端温度 /°C	初始含水率 w_0 /%	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	试验时间 t /d
1	-10	20	0	1.50	1~7
2	-10	20	5	1.50	1~7
3	-10	20	10	1.50	1~7
4	-10	20	5	1.40	1~7
5	-10	20	5	1.45	1~7
6	-10	20	5	1.55	1~7
7	-10	20	5	1.60	1~7
8	-5	20	5	1.50	1~7
9	-15	20	5	1.50	1~7

2.5 试验步骤

试验包含试样制备及安装, 设置暖端温度和冷冻处理含水率、冻胀力、冻胀量测量等关键步骤。

(1) 在模型桶底部安装冷冻盒并密封。在模型桶内部高度 s 分别为 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 cm 处布置压力传感器。采用分层击实法制备 10 cm×10 cm (高度×直径) 的圆柱试样, 具体操作是: 将试样按质量三等分, 模型桶沿高度亦三等分, 并做刻度线记号。考虑振捣上部土体对下部土体密实度有影响, 下部、中部土体击实后要稍高于模型桶分刻度线, 并将表层土体划痕扰动, 继续填入上部土体, 以保证土体均匀性。在模型筒预留细孔内布置温度传感器并密封。

(2) 在试样顶部安装电子位移计, 用于测量冻胀量。压缩机开始工作前将位移计示数调零。密闭实验室, 设置室内温度为 20 °C、湿度为 70%。通过微型制冷系统在试样底部制冷, 控制器将试样底部温度分别设置为-5、-10、-15 °C。

(3) 冻结过程中对温度、水平冻胀力、冻胀量进行监测。运行后, 每隔 1 h 测读一次温度、水平冻胀力和冻胀量数据, 当各个孔洞位置处的试样温度趋于稳定后, 将测读时间间隔调整为 8 h/次, 冻胀力和冻胀量数据测读频率与温度相同。对于同一工况, 利用 7 个试样测量含水率, 每隔 1 d 拆除 1 个试样, 在每隔 1.0~2.0 cm 高度处获取 2 个土样, 通过烘干法分别测量 2 个土样含水率, 取算术平均值作为该高度处试样含水率最终结果。

3 试验结果分析

3.1 温度场变化规律

选取工况 2、8、9, 开展不同冷端温度下试样温度随时间变化规律研究, 如图 5 所示。可以看出,

试样温度从底部到顶部呈增加趋势; 随冻结时间增加, 顶部温度呈减小趋势, 且温度梯度越大 (或冷端温度越低), 温度场零度线位置越高, 温度场稳定所需时间越长。从图 5(a) (工况 8) 可以看出, 冻结 1 d 后试样温度场尚未稳定, 上部 (5.0~10.0 cm 高度处) 温度为 20 °C; 冻结 2 d 后试样下部 (1.0~5.0 cm 高度处) 温度场基本稳定, 8.0~10.0 cm 高度处温度恒定为 20 °C, 冷端和补湿端温差达到 25 °C 左右。从图 5(b)、5(c) (工况 2、9) 可以看出, 冻结 2~3 d 后试样下部温度场趋于稳定, 上部温度均低于 20 °C。3 种工况在冻结 7 d 后, 温度场均达到基本稳定, 试样下端 (0 cm 高度处) 温度基本接近试验预设冷端温度。

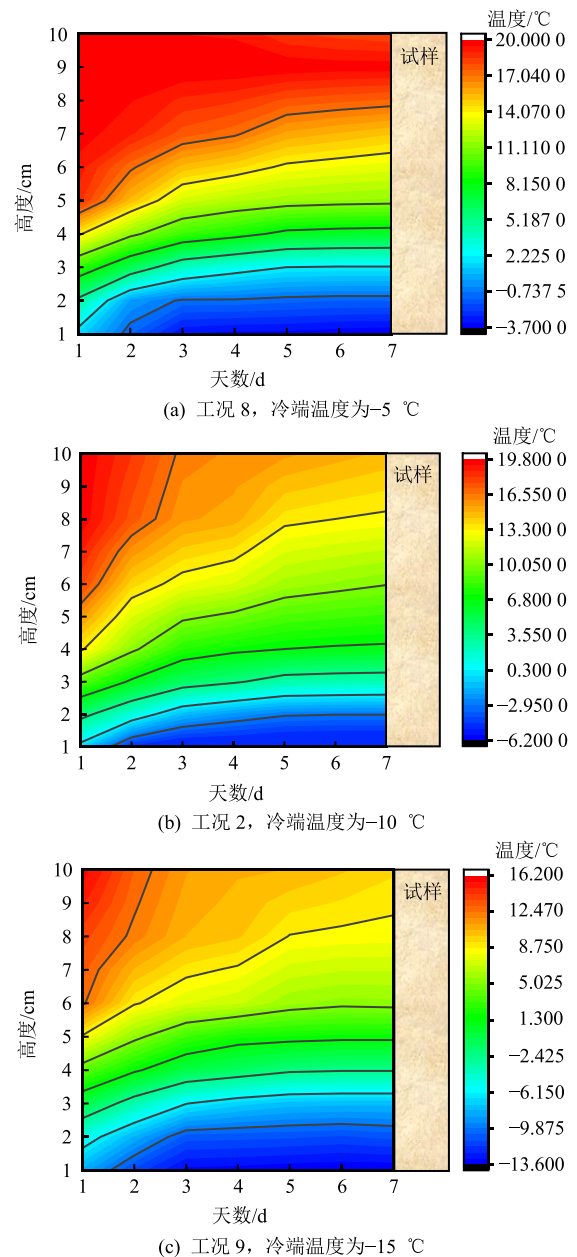


图 5 不同冷端温度下试样温度分布图
Fig.5 Temperature distribution under different cold end temperatures

3.2 水分迁移规律

3.2.1 高度对含水率变化影响规律

选取工况 9, 开展不同高度 s 处试样含水率随时间变化规律研究, 如图 6 所示。可以看出, $s = 10.0$ cm 处为暖端, 含水率基本不变。随着试样高度的下降, 含水率不断增加, 在 $s = 2.0$ cm 处达到最高, 且含水率随冻结时间的增加而增大, 最大增至 27.5%。这表明, 在低温作用下外界补给水汽运移至试样 $s = 2.0$ cm 左右处聚集。

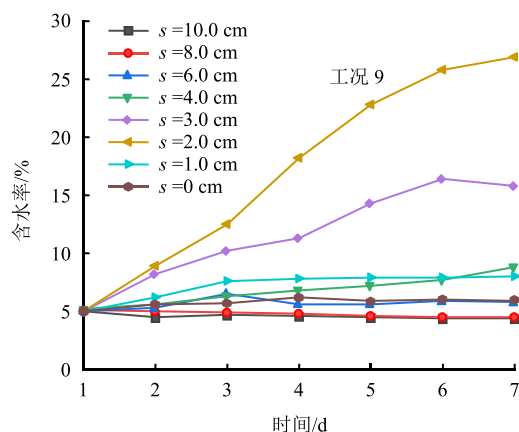


图 6 不同高度处试样含水率变化曲线
Fig.6 Water content distribution at different heights

水汽补给条件下, 部分水汽会凝结成液相, 此时气态水和液态水同时向冷端迁移, 并在冷端冻结成冰。由试验结果发现, 在距冷端 2.0~3.0 cm 高度处易产生冰透镜体(图 7), 水分在此聚集相变成冰,

将阻断水分向冷端的迁移, 故 0 cm 和 1.0 cm 高度处在透镜体形成后, 含水率变化较小; 冰相的不断生成, 使得吸力加强, 促使水分向该处迁移, 冰透镜体不断变厚的同时, 其上部将产生更多的碎冰, 可以看出 3.0 cm 高度处的含水率较大; 其他上部位置, 含水率增量有限。

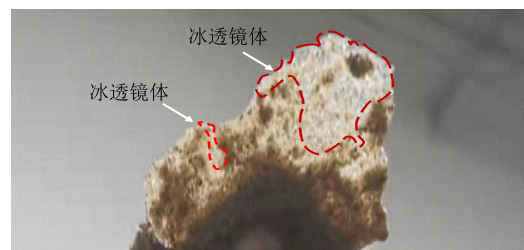


图 7 生成的冰透镜体
Fig.7 Ice lens generated

3.2.2 冷端温度对含水率变化影响规律

选取工况 2、8、9, 开展不同冷端温度下试样含水率随时间变化规律研究, 如图 8 所示。可以看出, 随着冻结时间的增加, 含水率峰值逐渐增大, 水分迁移现象越明显。在冻结 3 d 时, 3 种工况试样含水率均出现明显峰值, 含水率峰值形成后, 峰值位置以下(靠近冷端)试样含水率随时间增长基本停滞。这是因为在试样含水率峰值附近形成了冰透镜体, 阻碍了土中水汽继续向下迁移, 并且使水分不断集聚, 一定程度上加剧了含水率峰值快速增长。

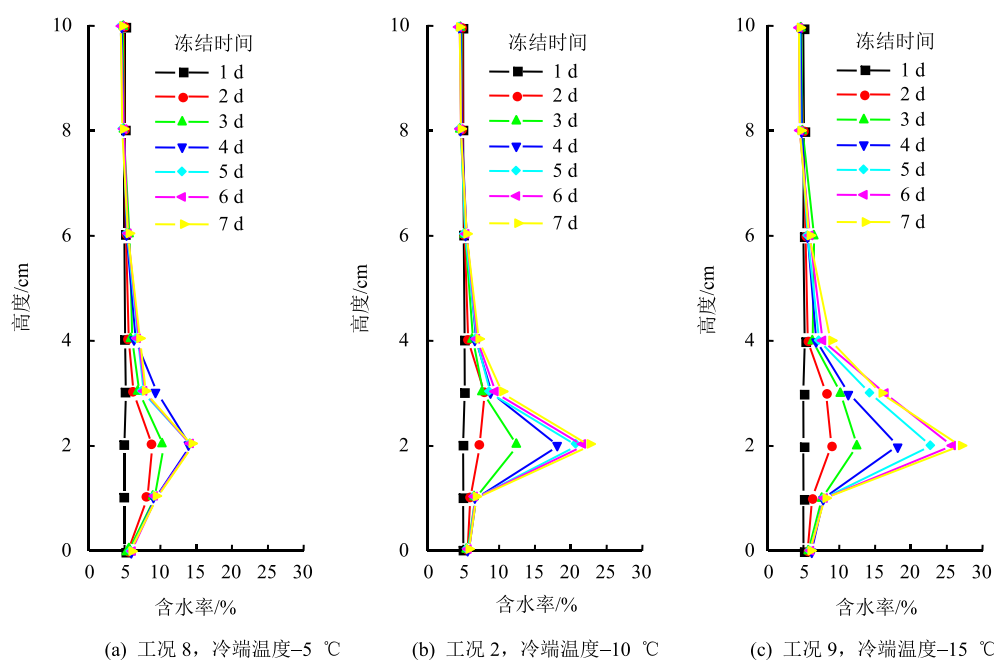


图 8 不同冷端温度下试样水分迁移规律
Fig.8 Water migration law under different cold end temperatures

图 9 为工况 2、8、9 在冻结 7 d 时试样含水率分布曲线。可以看出,随着试样高度的增加,含水率呈现出先增后减趋势。当冷端温度为 -5°C 时(工况 8),在距离冷端约 1.0 cm 高度处出现明显含水率峰值,由 5.0%增至 14.5%,增加了 1.90 倍。当冷端温度为 -10 、 -15°C 时,在距离冷端约 2.0 cm 高度处出现明显含水率峰值,含水率由 5.0%分别增至 22.7%、26.9%,增加了 3.54、4.38 倍。试验表明,随着冷端温度减小,含水率峰值明显增加,水汽迁移现象越明显。这是由于随着冷端温度的降低,相同时间内吸收的试样热量较多,试样内部温度降低迅速,加速了冰相的生成,从而增大吸力,水分迁移和相变的速率加快。从图 9 中可以看出,冷端温度为 -15°C 工况下含水率增量相对较高。

3.2.3 初始含水率对试样含水率变化影响规律

选取工况 1、2、3,开展不同初始含水率试样的含水率随冻结时间变化规律研究,如图 10 所示。可以看出,随着试样高度增加,含水率呈现出先增后减趋势,初始含水率为 0%的试样在 1.0 cm 高度处出现峰值,初始含水率为 5%、10%的试样在 2.0 cm 高度处出现峰值。初始含水率越大,冻结 7 d 后

试样总体含水率越大。当试样初始含水率为 0%时,冻结 7 d 后 1.0 cm 高度处峰值含水率约为 5%;初始含水率为 5%时,冻结 7 d 后 2.0 cm 高度处峰值含水率约为 23%;初始含水率为 10%时,冻结 7 d 后 2.0 cm 高度处含水率约为 30%。与初始含水率 0%试样相比,初始含水率为 5%、10%试样的峰值含水率提高了 3.60、5.00 倍,呈现出峰值含水率增加幅度随初始含水率增加而增加。

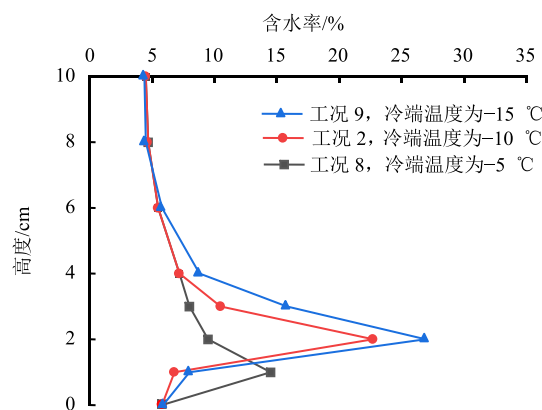


图 9 不同冷端温度下试样含水率分布曲线
Fig.9 Water content distribution curves under different cold end temperatures

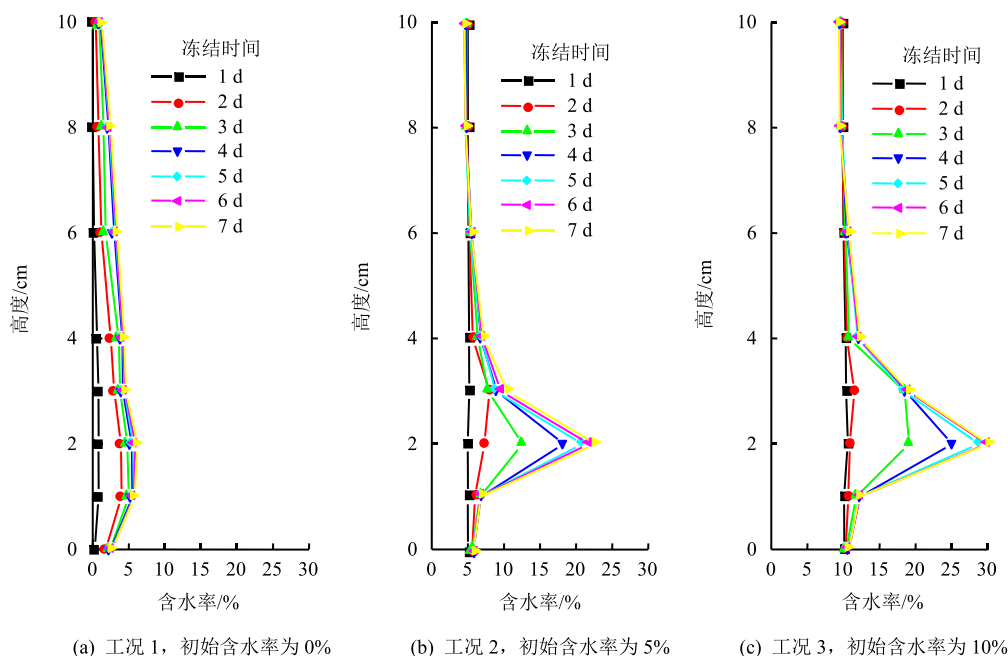


图 10 不同初始含水率试样水分迁移规律
Fig.10 Water migration law under different initial water content of specimens

图 11 为工况 1、2、3 试样 2.0 cm 高度处的含水率随冻结时间变化曲线。可以看出,随冻结时间增加,含水率曲线呈现出非线性增加趋势。初始含水率 w_0 为 0%试样的含水率约在冻结 2~3 d 时出现

峰值,初始含水率为 5%和 10%试样的含水率约在 4~6 d 时出现峰值。

3.2.4 干密度对试样含水率变化影响规律

选取工况 2、4、5、7,开展不同干密度试样含

水率随时间变化规律研究,如图12所示。可以看出,4种工况试样均在冻结2 d后出现含水率峰值,冻结时间越长,含水率峰值越大。试样干密度从 1.40 g/cm^3 增加至 1.60 g/cm^3 ,冻结7 d后含水率峰值稳定在 $22.5\% \sim 25.5\%$ 区间。

图13为工况2、4、5、6、7试样冻结7 d时含水率随高度变化曲线。可以看出,不同干密度试样含水率变化趋势基本一致,均在试样 2.0 cm 高度处出现含水率峰值。不同干密度对水汽迁移的影响较小,但在较小干密度下,试样含水率增长稍大。这可能与试样孔隙率有关,粗颗粒土比表面积较小,

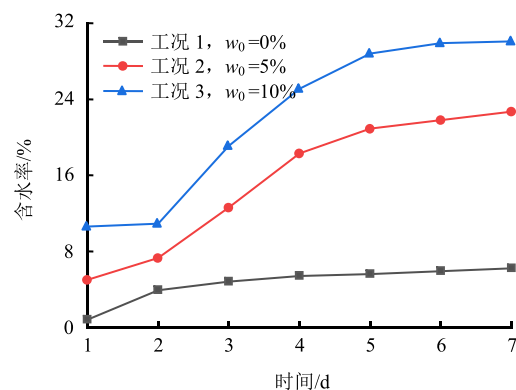


图11 不同初始含水率试样 2.0 cm 高度处含水率变化曲线
Fig.11 Water content distribution curves at 2.0 cm height of soil specimens with different initial water content

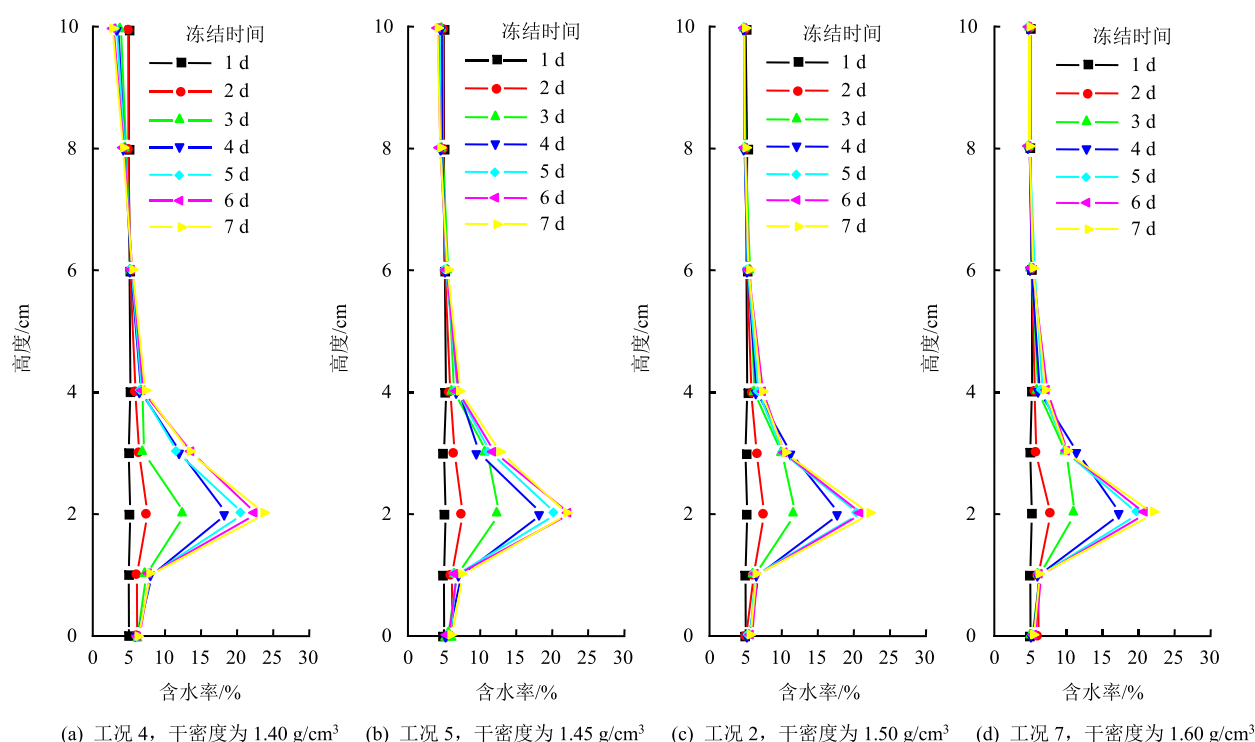


图12 不同干密度试样水分迁移规律

Fig.12 Water migration law under different dry densities and freezing time

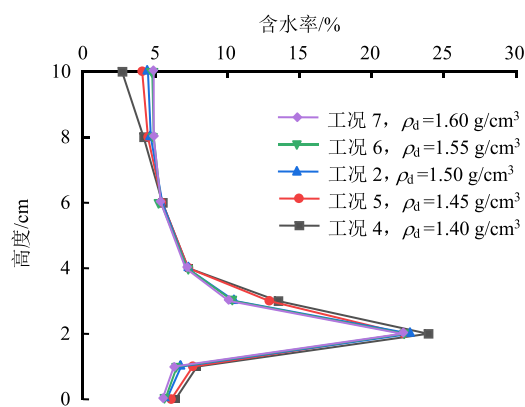


图13 不同干密度试样含水率变化曲线

Fig.13 Water content distribution curves under different dry densities

表面干密度下,较大孔隙率为水汽补给提供通道,水分吸力低于细颗粒土,其通气通水能力较高。在较小增长较多。相反,较大干密度下,较小孔隙率不利于水汽的迁移和富集。

从图8、10、12可以看出,试样下部靠近冷端的含水率明显增加,上部暖端的含水率几乎不随着冻结时间发生变化。从图11可以看出,当初始含水率为0时, 2.0 cm 高度处含水率随冻结时间有所增加,7 d时含水率可达 6.2% 。试样冷端冻结7 d时效果如图14所示。这证明了试样中的水分重分布是环境中水汽迁移补给的结果。



图 14 冷端土体冻结图

Fig.14 Photo of freezing soil at cold end

3.3 水平冻胀力变化特性

3.3.1 初始含水率对水平冻胀力变化影响规律

水平冻胀力 F 定义为冻胀过程中土体在水平方向对于单位面积边界的力^[17]。选取工况 1、2、3，开展不同初始含水率的试样不同位置处水平冻胀力随冻结时间 t 变化规律研究，如图 15 所示。可以看出，随着冻结时间增加，水平冻胀力呈现出逐渐增长趋势。初始含水率越大，则冻胀力越大。2.0 cm 高度处，初始含水率为 10% 的试样 7 d 冻胀力达到 5.94 kPa；初始含水率为 0% 的试样冻胀力为 1.19 kPa（图 15(a)）。4.0 cm 高度处，初始含水率为 10% 的试样冻胀力达到 5.05 kPa，初始含水率为 0% 的试样冻胀力为 2.01 kPa（图 15(b)）。10.0 cm 高度处，初始含水率为 10% 的试样冻胀力达到 3.09 kPa，初始含水率为 0% 的试样冻胀力为 1.19 kPa（图 15(c)）。土体冻结实质上是热量-水迁移的耦合过程，水平冻胀力大小取决于冰量生成大小，且与温度场息息相关，不同初始含水率的试样含冰量有所差异。一方面，随着初始含水率升高，土体比热容增大，相同外部环境下降温速度越慢；另一方面，水的导热系数大于土，当初始含水率增大时，土体整体导热系数也会增大，土体温度场稳定速度越快。矛盾的两方面因素相互制约，从结果来看，导热系数的增大对温度场和冰量的产生影响更大，即初始含水率高的试样水平冻胀力大。

3.3.2 冷端温度对水平冻胀力变化影响规律

选取工况 2、8、9，开展不同冷端温度作用下试样不同位置处的水平冻胀力随冻结时间变化规律研究，如图 16 所示。可以看出，冷端温度越低，试样冻结 7 d 时水平冻胀力越大。2.0 cm 高度处，冻结 7 d 时，冷端温度分别为 -5、-10、-15 °C 的试样，冻胀力分别为 3.37、4.25、4.50 kPa（图 16(a)）。4.0 cm

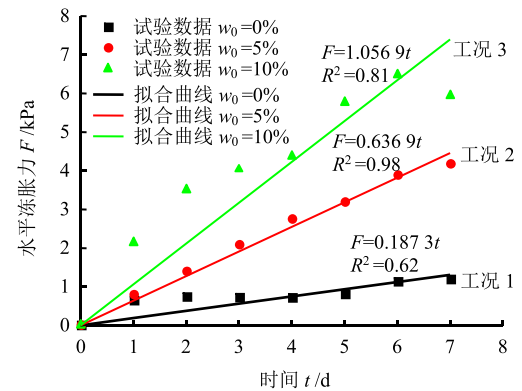
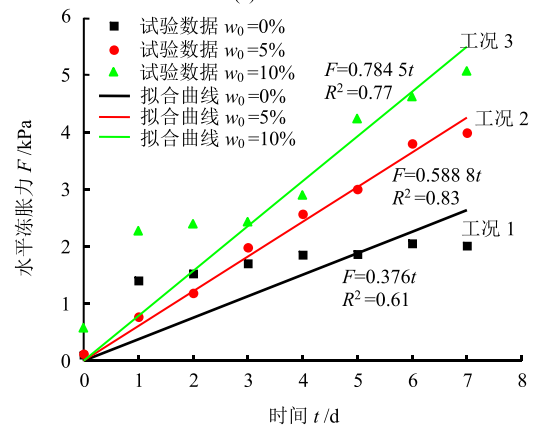
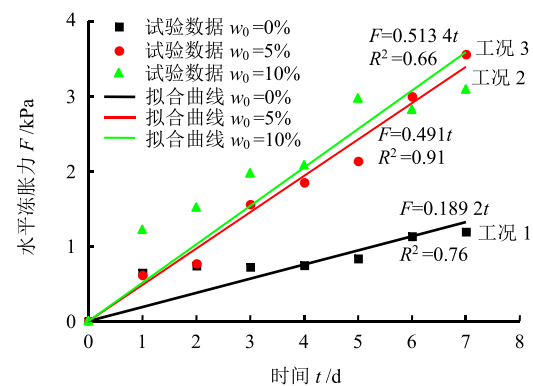
(a) $s=2.0$ cm(b) $s=4.0$ cm(c) $s=10.0$ cm

图 15 初始含水率对水平冻胀力变化影响曲线

Fig.15 Lateral frost heaving force-time curves under different initial water contents

高度处，冷端温度分别为 -5、-10、-15 °C 且试样冻结 7 d 时，水平冻胀力分别为 2.36、4.04、4.26 kPa（图 16(b)）。10.0 cm 高度处，冷端温度分别为 -5、-10、-15 °C 且试样冻结 7 d 时，冻胀力分别为 2.04、3.56、4.06 kPa（图 16(c)）。冷端温度越低，冻结缘随着温度的向上传导越快，冻结层厚度越大，整个冻结区域越大、冰透镜体含量越多，导致试样膨胀量及冻胀力增大。

3.3.3 干密度对冻胀力变化影响规律

选取工况 2、4、5、6、7，开展不同干密度试样、不同位置处的水平冻胀力随冻结时间变化规律研

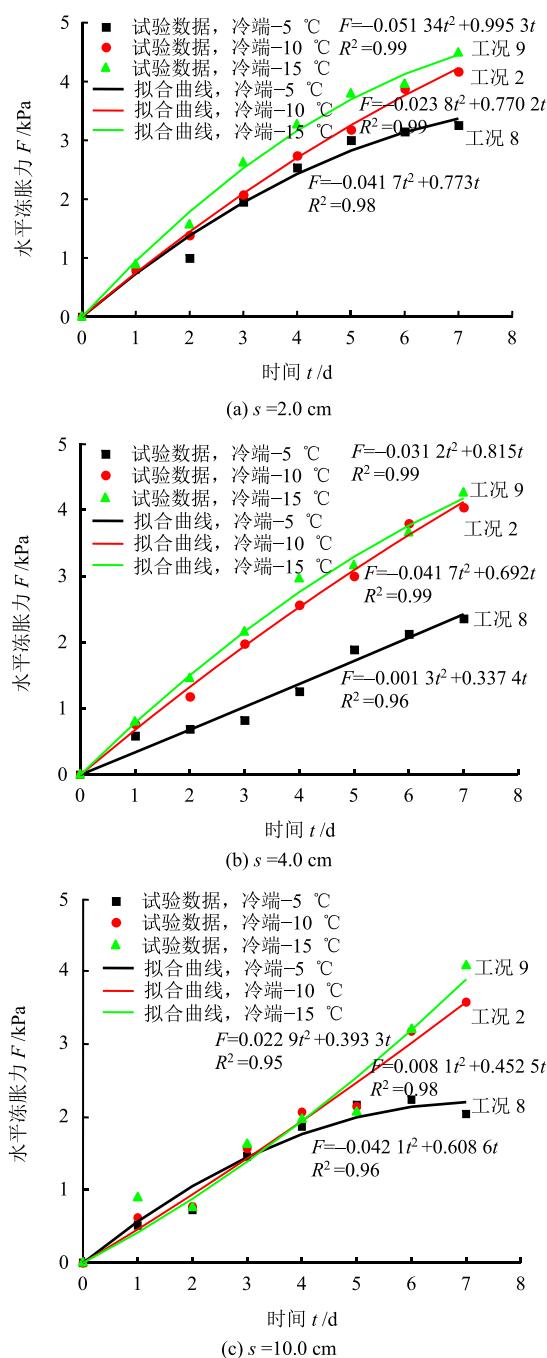


图 16 冷端温度对水平冻胀力影响曲线

Fig.16 Influence curves of cold end temperature on lateral frost heaving force

究,如图 17 所示。通过对水平冻胀力与冻结时间关系进行拟合可知,当干密度从 1.40 g/cm^3 升高至 1.60 g/cm^3 ,试样高度分别为 2.0、4.0、10.0 cm 处的冻胀力变化范围分别为 $[0.55t, 0.75t]$ 、 $[0.51t, 0.72t]$ 、 $[0.28t, 0.63t]$ 。随着干密度升高,试样冻胀力降低,是因为气态水迁移为试样冻结过程中的唯一补给源,补给主要通过试样孔隙传递,干密度高的试样孔隙率小,水汽迁移通路少、阻力大,相同时间内生成冰量少、冻胀力小。考虑工程实践,增大路基填料干密度,能一定程度上阻碍水汽迁移现

象,有效降低路基水平冻胀力。

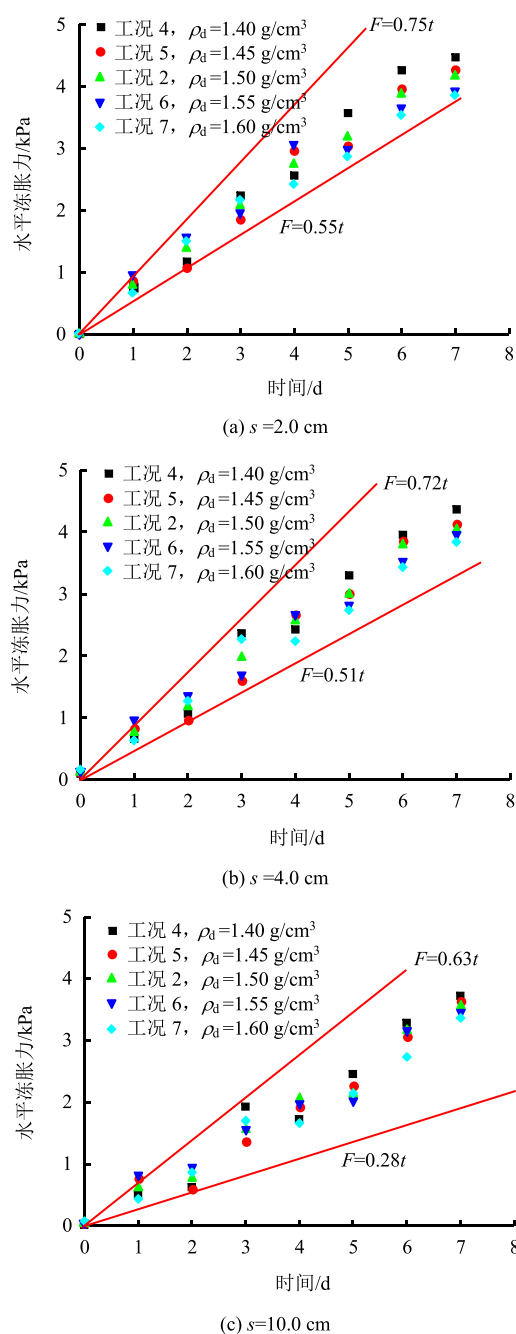


图 17 干密度对水平冻胀力影响曲线

Fig.17 Influence curve of dry density on lateral frost heaving force

3.4 冻胀量变化特性

3.4.1 初始含水率对冻胀量影响规律

选取工况 1、2、3,开展不同初始含水率试样在不同位置处的冻胀量随冻结时间变化规律研究,如图 18(a)所示。可以看出,相同冻结时间,初始含水率越大,试样冻胀量越大。初始含水率为 10%时,试样冻结 7 d 时冻胀量达到 3.50 mm;初始含水率为 0%时,冻结 7 d 时冻胀量为 0.42 mm,冻胀量减

小了 88.0%。试样冻胀量与水分相变的程度紧密相关, 初始含水率高的试样会有更多水分原位冻结, 且初始含水率高的试样导热系数大, 容易形成冻结缘进而形成冰透镜体, 冰透镜体的产生又加速了对水分的吸附, 导致含水率高的试样冻胀量较大。

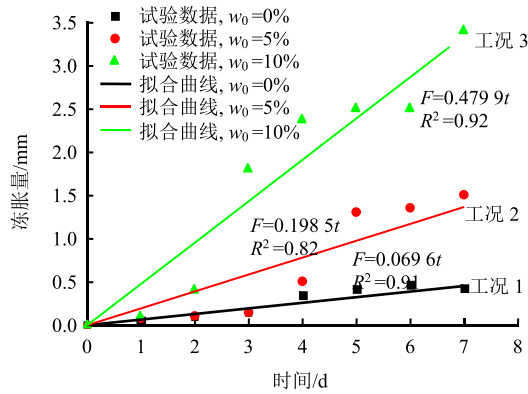
为了说明不同含水率对冻胀量的影响, 首先采用线性拟合法获得冻胀量-时间经验关系 (图 18(a)):

$$V = at \quad (1)$$

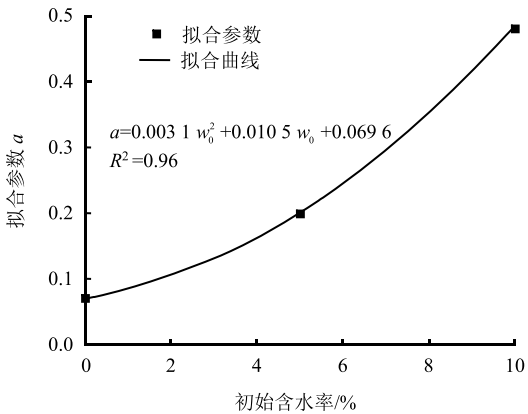
式中: V 为冻胀量; a 为拟合参数。

拟合参数 a 与初始含水率 w_0 的关系, 如图 18(b) 所示, 故初始含水率 w_0 与冻胀量 V 的时间经验公式为

$$V = (0.0031w_0^2 + 0.0105w_0 + 0.0696)t \quad (2)$$



(a) 冻胀量与时间关系



(b) 拟合参数与含水率的关系

图 18 初始含水率对冻胀量影响曲线

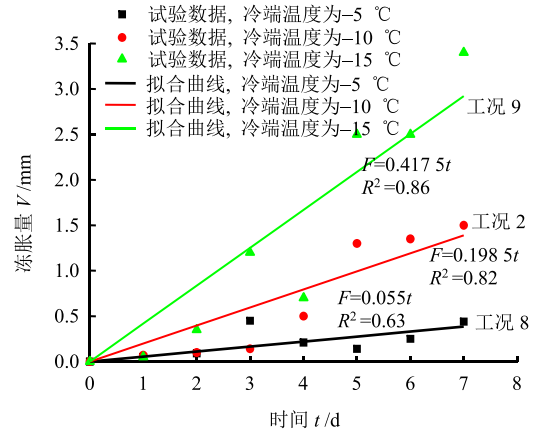
Fig.18 Influence curves of initial water content on frost heaving volume

3.4.2 冷端温度对冻胀量影响规律

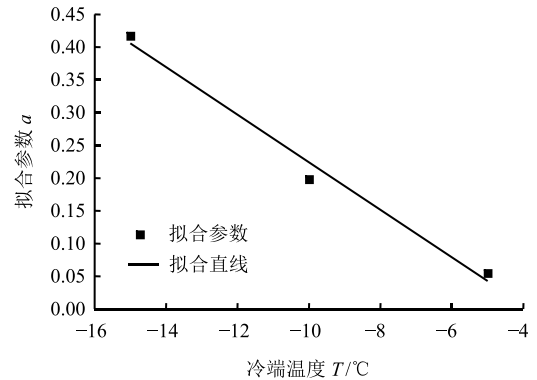
选取工况 2、8、9, 开展不同冷端温度作用下试样的冻胀量随冻结时间变化规律研究, 如图 19 所示。可以看出, 对于相同冻结时间, 试样冷端温

度越低, 冻胀量越大。冷端温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且试样冻结 7 d 时, 冻胀量为 3.41 mm; 冷端温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 冻结 7 d 的冻胀量为 0.44 mm。结合曲线特征, 先对冻胀量与时间关系进行拟合, 如图 19(a) 所示; 其次拟合参数与冷端温度的关系, 如图 19(b) 所示, 故冷端温度 T 与冻胀量 V 的经验表达式为

$$V = (-0.0363T - 0.1388)t \quad (3)$$



(a) 冻胀量与时间关系



(b) 拟合参数与温度的关系

图 19 冷端温度对冻胀量影响曲线

Fig.19 Influence curves of cold end temperature on frost heaving volume

3.4.3 干密度对冻胀量影响规律

选取工况 2、4、5、6、7, 开展不同干密度试样的冻胀量随冻结时间变化规律研究, 如图 20 所示。可以看出, 对于相同冻结时间, 试样干密度越低, 冻胀量越大。干密度为 1.40 g/cm^3 时, 试样冻结 7 d 时, 冻胀量达到 2.78 mm; 干密度为 1.60 g/cm^3 时, 冻胀量为 0.87 mm, 减小了 68.71%。同样, 结合图 20(a) 和 20(b) 可建立冻胀量与干密度的经验表达式为

$$V = (1.3584\rho_d - 1.8116)t \quad (4)$$

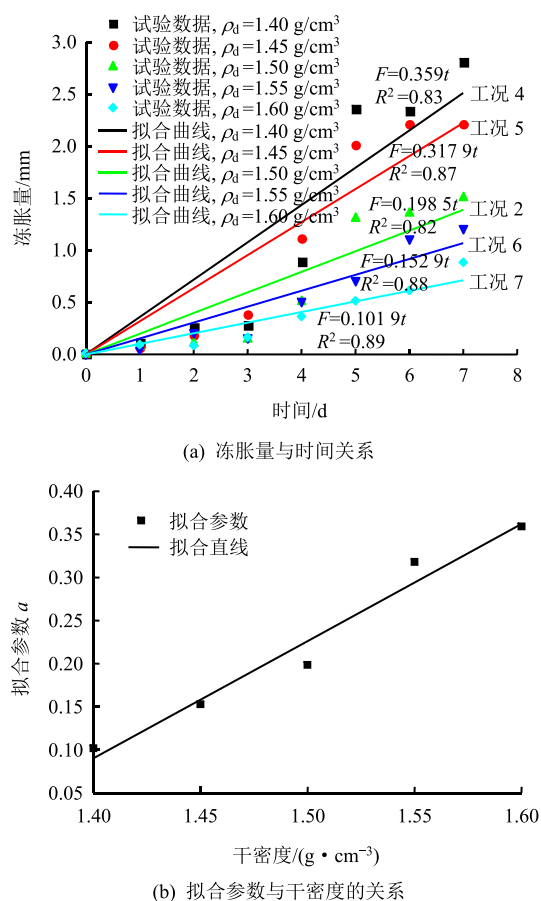


图 20 干密度对冻胀量影响曲线
Fig.20 Influence curves of dry density on frost heaving volume

3.5 冻结锋面位置变化规律

冻结区域与未冻结区域的分界面即冻结锋面, 掌握其变化规律有利于了解砂土冻胀边界的位置 (图 21(a)), 指导工程设计和施工。选取工况 2, 开展温度零度线和冻结锋面位置变化研究。从图 21(b)中可以看出, 温度零度线与冻结锋面位置均随冻结时间的增加而逐步上移, 但冻结锋面位置一直位于零度线下, 即冻结锋面更靠近试样冷端。随冻结时间增加, 试样温度趋于稳定, 温度零度线处于 2.5 cm 高度处; 冻结 3 d 时试样开始出现冻结锋面, 冻结 7 d 时冻结锋面位于 2.3 cm 高度处。随冻结时间增加, 在冰透镜体暖端与冻结锋面之间的区域, 冰粒子开始生长、逐渐联接, 未冻水含量和渗透系数逐渐降低, 水分向冰透镜体暖边迁移的难度越来越大, 冻结锋面向零度线推进难度越来越大, 并最终稳定在平衡位置。

选取工况 2 和工况 3 开展初始含水率对冻结锋面位置变化研究, 选取工况 2、8、9 开展冷端温度对冻结锋面位置变化研究, 选取工况 2、4、5、6、7 开展干密度对冻结锋面位置变化研究, 如图 22 所示。

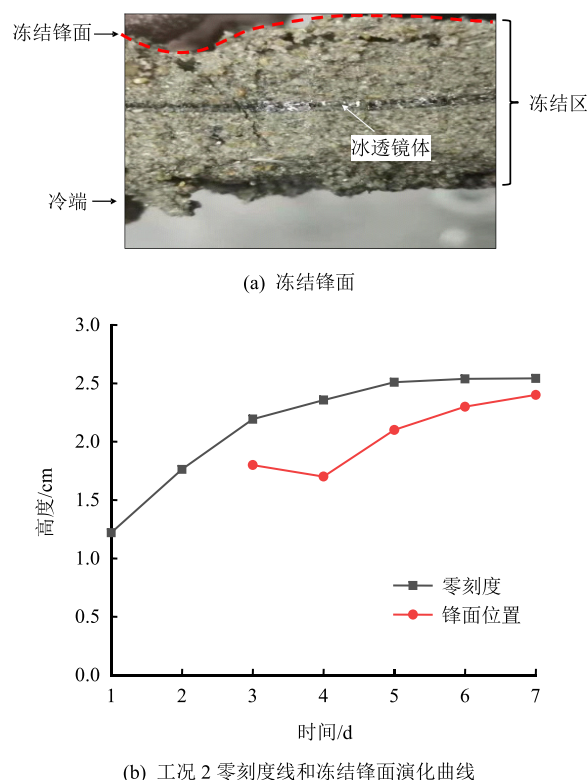


图 21 温度零度线与冻结锋面位置图
Fig.21 Zero temperature lines and ice peak location

从图 22(a)可以看, 对于相同冻结时间, 初始含水率越大, 则试样的冻结锋面位置越靠上。冻结 7 d 时, 初始含水率为 0% 的试样, 未出现冻结锋面; 初始含水率为 5% 的试样, 冻结 7 d 时冻结锋面处于 2.4 cm 高度; 初始含水率为 10% 的试样, 冻结 7 d 时冻结锋面处于 2.5 cm 高度。相比初始含水率 5% 的试样, 初始含水率为 10% 的试样中液态水占比较高, 先形成冻结锋面, 其位置在水汽迁移作用下先行上移, 导致冻结锋面位置较高。

从图 22(b)可以看出, 冻结锋面位置随着冷端温度降低呈现出上升趋势。在冻结 7 d 时, 冷端温度 -15°C 试样的冻结锋面处于 2.6 cm 高度, 冷端温度 -5°C 试样的冻结锋面处于 1.8 cm 高度。这是由于在导热系数相同的试样中, 随冻结时间增加, 冷端温度低的试样零度线位置高于冷端温度高的试样, 其冻结锋面位置随零度线上移。

从图 22(c)可以看出, 在冻结前期试样冻结锋面位置随着干密度变化规律不明显, 冻结后期冻结锋面位置随干密度增加呈现上升趋势, 冻结 7 d 时集中在 2.2~2.5 cm 高度范围区间。随着冻结时间增加, 水汽迁移不断向试样冻结缘补充水分, 冻结缘逐渐加厚、冻结锋面位置逐步上移, 直到冷端温度、上覆压力、冰压及水流处于平衡状态, 冻结锋面位置上升速度趋于平缓。

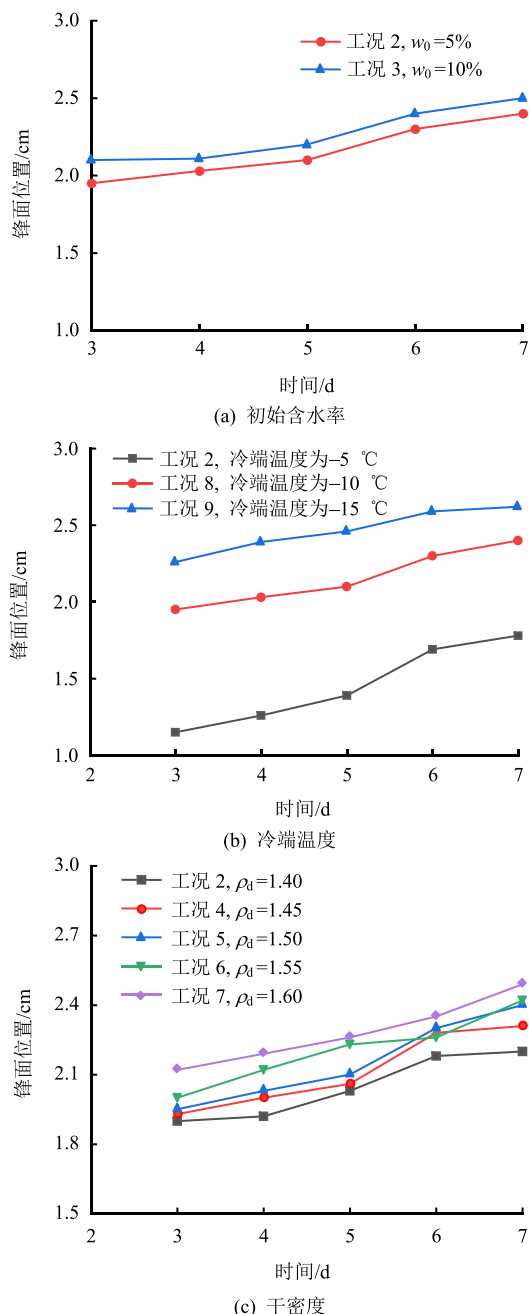


图 22 不同影响因素对冻结锋面位置的影响曲线
Fig.22 Influence curves of different factors on the position of ice peak

4 结 论

利用自主研发的水分迁移和冻胀试验装置,研究了初始含水率、冷端温度和干密度对砂土水分迁移规律及冻胀特性的影响规律,得出如下结论:

(1) 初始含水率对试样水分迁移规律和冻胀特性影响较为明显。与初始含水率为 0% 的试样相比,初始含水率分别为 5%、10% 的试样在 2.0 cm 高度处的峰值含水率分别提高了 3.6、5.0 倍;水平冻胀力和冻胀量不断提高,冻结锋面位置上移至 2.5 cm 高度处。在高含水率下,试样内部水分更容易成冰,吸附更多的水分向冰透镜体迁移,并继续产生相变,

导致含水率增长迅速。

(2) 冷端温度越低,试样含水率峰值越高,水平冻胀力和冻胀量越大。冷端为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、试样冻结 7 d 时含水率峰值出现在 1.0 cm 高度处,增加了 1.9 倍;冷端分别为 -10 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且试样冻结 7 d 时含水率峰值出现在 2.0 cm 高度处,分别增加了 3.54、4.38 倍。与冷端温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试样相比,冷端为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试样的水平冻胀力和冻胀量均有增大,冻结锋面位置上移至 2.6 cm 的高度。随着冷端温度的降低,试样内部温度降低较快,加速了冰相的生成,造成水分迁移和相变的速率明显提高。

(3) 与初始含水率和冷端温度相比,干密度对试样水分迁移和冻胀特性影响相对不明显,整体呈现出在较小干密度下,试样含水率、水平冻胀力和冻胀量增幅稍大的趋势。冻结 7 d 时,峰值含水率稳定在 22.5~25.5% 区间,冻结锋面集中在 2.2~2.5 cm 高度范围区间。

本文开展了 7 d 的冻结试验,砂土在水汽补给条件下长时间冻结的特性需要试验进一步探索;水汽、毛细水双重补给作用下,各自对冻胀的贡献比例需要试验探索。

参 考 文 献

- [1] 王淼, 孟上九, 袁晓铭, 等. 季冻区典型土类抗剪强度冻融修正系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 1): 3756-3764.
WANG Miao, MENG Shang-jiu, YUAN Xiao-ming, et al. Research on freezing-thawing correction coefficients of shear strength parameters of seasonal frozen soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Suppl. 1): 3756-3764.
- [2] 沈宇鹏, 王笃礼, 林园榕, 等. 越冬基坑水平冻胀的防治措施效果分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1434-1442.
SHEN Yu-peng, WANG Du-li, LIN Yuan-rong, et al. On the effect of prevention measures against horizontal frost heave of foundation pits over winter[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(5): 1434-1442.
- [3] WU X Y, NIU F J, LIN Z J, et al. Delamination frost heave in embankment of high speed railway in high altitude and seasonal frozen region[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 153: 25-32.
- [4] 蔡汉成, 孟进宝, 赵相卿, 等. 基于热量收支平衡原理的多年冻土区热棒路基设计计算方法[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3769-3776.
CAI Han-cheng, MENG Jin-bao, ZHAO Xiang-qiang, et al. Design method of the thermosyphon embankment in permafrost region based on principle of heat balance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3769-3776.
- [5] 杨有海, 沈鑫, 朱生宪, 等. 兰新高铁粗颗粒土填料冻

- 胀性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(3): 1-7.
- YANG You-hai, SHEN Xin, ZHU Sheng-xian, et al. Experimental study on frost heaving of coarse-grained filling material for Lanzhou-Xinjiang high speed railway[J]. **China Railway Science**, 2018, 39(3): 1-7.
- [6] 宋宏芳, 岳祖润, 李佰林, 等. 季节冻土区高速铁路防冻胀路基保温强化特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4041-4048.
- SONG Hong-fang, YUE Zu-run, LI Bai-lin, et al. Thermal insulation and strengthening properties of anti-frost heaving subgrade structure of the high-speed railway in seasonally frozen soil region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 4041-4048.
- [7] 贺佐跃, 张升, 滕继东, 等. 冻土中气态水迁移及其对土体含水率的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1190-1197.
- HE Zuo-yue, ZHANG Sheng, TENG Ji-dong, et al. Vapour transfer and its effects on water content in freezing soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(7): 1190-1197.
- [8] SHARMA R S, MOHAMED M H A. An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated/saturated sand[J]. **Engineering Geology**, 2003, 70(3-4): 305-313.
- [9] TANG T, SHEN Y, LIU X, et al. The effect of horizontal freezing on the characteristics of water migration and matric suction in unsaturated silt[J]. **Engineering Geology**, 2021, 288: 106166.
- [10] 张如如, 赵云, 徐文杰, 等. 温度作用下机场跑道土基中水气运移规律分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 50(5): 822-830.
- ZHANG Ru-ru, ZHAO Yun, XU Wen-jie, et al. Water-gas migration analysis in runway subgrade soil under influence of temperature[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2017, 50(5): 822-830.
- [11] JOSHUA W D, JONG E D. Soil moisture movement under temperature gradients[J]. **Canadian Journal of Soil Science**, 1973, 53(1): 49-57.
- [12] DOBCHUK B S, BARBOUR S L, ZHOU J. Prediction of water vapor movement through waste rock[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130(3): 293-302.
- [13] 王铁行, 贺再球, 赵树德, 等. 非饱和土体气态水迁移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3271-3275.
- WANG Tie-xing, HE Zai-qiu, ZHAO Shu-de, et al. Experimental study on vaporious water transference in loess and sandy soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3271-3275.
- [14] 李彦龙, 王俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2839-2844.
- LI Yan-long, WANG Jun, WANG Tie-xing. Moisture migration of unsaturated soil due to thermal gradients[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2839-2844.
- [15] 刘建龙, 滕继东, 张升, 等. 气态水迁移诱发非饱和粗粒土冻胀的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1297-1305.
- LIU Jian-long, TENG Ji-dong, ZHANG Sheng, et al. Experimental study on frost heave in unsaturated coarse-grained soil caused by vapour transfer [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(7): 1297-1305.
- [16] 崔宏环, 王伟浩, 闫子麟, 等. 季冻区路基填土冻胀特性试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 21-25.
- CUI Hong-huan, WANG Wei-hao, YAN Zi-lin, et al. Experimental study on frost heaving characteristics of railway subgrade in seasonal frozen area[J]. **Journal of China and Foreign Highway**, 2021, 41(1): 21-25.
- [17] 张正, 马学宁, 朱启有. 兰州地区黄土水平冻胀力分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 102-107.
- ZHANG Zheng, MA Xue-ning, ZHU Qi-you. Experimental analysis of horizontal frost heaving force of loess in Lanzhou City of Gansu Province Area[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2021, 32(1): 102-107.
- [18] 高凤, 娄宗科, 肖旻. 考虑接触行为的U型渠道冻胀数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(1): 161-165.
- GAO Feng, LOU Zong-ke, XIAO Min. Numerical simulation of frost heave damage of U-shaped canal considering interaction between concrete lining board and soil[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2020, 37(1): 161-165.
- [19] 张玉芝, 王天亮, 张飞, 等. 不同细粒含量下高速铁路基粗颗粒填料水气迁移特征与冻胀特性[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(4): 1-8.
- ZHANG Yu-zhi, WANG Tian-liang, ZHANG Fei, et al. Water vapor migration characteristics and frost heave characteristics of coarse-grained filler in high-speed railway subgrade under different fine particle contents[J]. **China Railway Science**, 2021, 42(4): 1-8.
- [20] 林超. 粉质黏土中黏土矿物对冻胀影响试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- LIN Chao. Experimental study on the effect of frost heave of clay minerals in silty clays[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [21] 吴亚平, 潘高峰, 李帅, 等. 高含盐饱和细砂土的蠕变特性[J]. 公路交通科技, 2017, 34(7): 29-36.
- WU Ya-ping, PAN Gao-feng, LI Shuai, et al. Creep property of saturated fine sand with high salinity[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and**

Development, 2017, 34(7): 29-36.

[22] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. TB 10001—2016
铁路路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.

China Railway First Survey and Design Institute Group
Co., Ltd. TB 10001—2016 Code for design of railway
earth structure[S]. Beijing: China Railway Press, 2016.

致谢审稿专家

尊敬的审稿专家: 新年好!

《岩土力学》编辑部谨向一年来为我刊审稿的 427 位专家表示衷心的感谢!

在过去的 2021 年,《岩土力学》顺利地完成了编辑、出版工作。据中国科学技术信息研究所 2021 版中国科技期刊引证报告(核心版)显示,《岩土力学》核心影响因子为 1.662,核心总被引频次为 10 394,位居土木工程学科第 2 位,并再次入选“百种中国杰出学术期刊”。共有 2 篇论文入选“中国百篇最具影响国内学术论文”,分别是(1)《大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析》(侯振坤、杨春和、王磊等, 2016, 37(2): 407-414);(2)《基于分数阶导数的非定常蠕变本构模型》(何志磊、朱珍德、朱明礼等, 2016, 37(3): 737-744)。另据同期公布的 CNKI 中国学术期刊影响因子年报显示,《岩土力学》第 9 次入选“中国最具国际影响力学术期刊”,学科影响力指数(CI)为 947.80,位居土木建筑类第 2 位。而 Web of Science JCR 的数据显示,《岩土力学》在 Engineering Geological 学科的 JCI(期刊引文指数)排名第 51 位。这些成绩和荣誉的取得,无疑有众多审稿专家的功劳,是专家们的严谨把关,保证了论文的高质量。

在此,编辑部全体员工恭祝各位专家身体健康,工作顺利,阖家欢乐,万事如意!

2021 年为本刊审稿的专家名单如下(按审稿量排名):

张先伟	张玉军	曹文贵	张 弥	邓华锋	张常光	郑俊杰	柴寿喜	陈善雄	王学滨	朱珍德	侯公羽
李树忱	刘恩龙	罗晓辉	文畅平	杨爱武	余伟健	俞 缙	周翠英	白冰(北京)	吴梦喜	湛文武	高 玮
勾攀峰	孔纲强	李 琦	李顺群	刘忠玉	徐松林	张建海	崔 臻	谈云志	张治国	周红波	党发宁
郭印同	韩 煊	江 权	刘 磊	梅国雄	史 吏	王东星	吴秋红	夏才初	徐 超	袁俊平	张 嘎
陈昌富	陈 盼	丁梧秀	董世明	费 康	吴顺川	杨新安	尹小涛	张子新	周 辉	朱长歧	白晓宇
蔡国庆	孔 亮	雷华阳	李江山	李荣建	李正伟	刘红岩	孟庆山	余成学	王 宝	许 江	张强勇
章荣军	周顺华	邹维列	左宇军	白晓红	蔡燕燕	陈保国	陈晓平	贺建清	胡敏云	胡其志	卢 正
鹿 群	沈 扬	苏永华	谢 强	薛亚东	杨典森	禹海涛	张陈蓉	张传庆	张 飞	张黎明	张 盛
赵 奎	赵晓东	崔光耀	傅旭东	龚壁卫	何思明	介玉新	李 宁	李银平	刘溪鸽	宋义敏	苏承东
谭贤君	王明年	肖晓春	徐长节	徐金明	张冬梅	张仪萍	赵明华	陈海兵	单仁亮	邓建辉	方祥位
侯振坤	胡卸文	简文彬	蒋水华	康永水	李桂臣	李 林	李庶林	李伟华	梁 冰	梁荣柱	刘长武
荣 冠	孙德安	孙吉主	谭晓慧	唐志成	滕继东	汪明元	王洪新	王培涛	王元战	吴益平	肖世国
许家林	薛世峰	杨建平	杨雪强	姚海林	叶 飞	张季如	张家发	周凤玺	朱鸿鹄	高 盟	韩立军
何蕴龙	李建春	刘 润	柳厚祥	卢应发	马天寿	阮永芬	盛金昌	孙书伟	万旭升	王川婴	王 刚
王 胤	严成增	晏鄂川	晏 飞	杨圣奇	叶观宝	张虎元	张文杰	张亚国	张艳博	赵延林	左建平
查甫生	丁洲祥	龚卫兵	胡明鉴	胡再强	金爱兵	雷国辉	李 驰	李大勇	李丽华	梁 波	刘红军
吕亚茹	尚彦军	邵龙潭	谭云亮	陶高梁	汪 磊	王保田	王 浩	王铁行	王 勇	夏 祥	肖衡林
谢全敏	谢新宇	阳军生	杨 贵	张昀青	章为民	周 航	艾智勇	白冰(武汉)	陈国兴	陈 明	陈仁朋
陈正汉	邓守春	邓友生	狄宏规	丁选明	范留明	冯世进	宫凤强	黄 曼	黄雪峰	李利平	李 亮
吕 庆	石 崇	魏 纲	肖 明	徐前卫	杨维好	章定文	郑 允	朱大勇	庄艳峰	曹 洪	陈 健
陈育民	杜延军	房营光	冯大阔	冯忠居	高广运	蒋中明	冷先伦	李传勋	刘成禹	刘秀敏	骆亚生
聂庆科	齐吉琳	钱建固	王宏图	王柳江	王占江	肖诗荣	徐 涛	徐文杰	徐杨青	许成顺	姚仰平
叶剑红	张春会	张东明	张庆松	张社荣	张 升	郑 宏	郑 俊	朱其志	邹新军	巴振宁	曹胜根
陈炳瑞	陈建功	陈文胜	高 谦	顾晓强	郭明伟	胡国忠	黄 诚	李典庆	李邵军	刘传正	刘观仕
刘金龙	刘维宁	吕玺琳	年廷凯	彭守建	蒲诃夫	钱德玲	秦 冰	邵生俊	石 露	史旦达	唐朝生
王连国	王小琼	魏作安	吴 刚	肖军华	徐龙飞	徐能雄	徐文杰	杨文东	尹振宇	应宏伟	俞建霖
袁 维	袁晓铭	曾超峰	张建红	张 明	张奇华	张友良	赵兴东	周 洁	周小平	周跃峰	庄心善
蔡永昌	邓喀中	董金玉	方新秋	高明仕	高彦斌	胡黎明	黄 博	黄茂松	黄生根	姜忻良	蒋斌松
焦玉勇	金 磊	雷文杰	李俊如	李元辉	刘华北	卢萌盟	穆朝民	牛富俊	秦小军	田慧会	田 威
王大雁	王水林	王新志	王正义	韦昌富	魏厚振	吴 杨	许宏发	闫高明	姚志华	叶冠林	于庆磊
詹良通	张 超	张勇慧	张 昭	周 建	周小文	朱泽奇	朱志铎	蔡国军	蔡袁强	陈福全	陈光波
陈四利	陈卫忠	陈益峰	董晓强	董 毅	段伦良	樊恒辉	方志明	郭红仙	何金平	黄波林	黄 达
贾宝新	姜谔男	金 衍	康红普	孔令伟	李春光	李 涛	梁发云	刘东甲	刘汉龙	刘萌成	刘善军
刘 晓	裴华富	秦爱芳	任 松	石荣剑	宋克志	孙文静	唐旭海	汪 洋	王 斌	王 建	王 媛
魏焕卫	魏新江	吴庆华	谢文兵	信春雷	徐林荣	徐则民	颜荣涛	杨明辉	杨志全	尤明庆	袁大军
詹美礼	张登飞	张可霓	张稳军	赵永贵	朱国甫	朱俊高					