

DOI: 10.11779/CJGE20221102

基于冻胀量与时间平方根之比确定冻胀分级的探讨

何浩松¹, 滕继东^{*1,2}, 张升^{1,2}, 盛岱超^{1,2,3}

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410075;
3. 悉尼科技大学土木与环境工程学院, 悉尼 2007)

摘要: 冻胀分级指标是寒区基础工程设计和冻胀防治的关键指标, 目前既有方法多认为冻胀分级是材料的一种基本属性, 常使用经验或半经验的分级指标表示土体冻胀能力, 但缺乏理论支撑。而冻胀试验复杂、耗时长, 不利于指标测试。为提出合理简单的冻胀分级指标, 首先从冻胀机制角度出发, 建立非饱和土冻胀解析模型, 并对模型进行了验证。基于该模型提出了以冻胀量和时间平方根之比作为确定冻胀分级的新指标 R ($\text{mm}/\text{h}^{0.5}$), 并以大量冻胀试验结果为依据, 提出当 $R < 0.21$ 时, 对应低冻胀等级, 当 $0.21 \leq R \leq 1.18$ 时, 对应中等冻胀等级, 而当 $R > 1.18$ 时, 对应强冻胀等级。此外利用统计概率分析了冻胀过程中各指标数值的概率密度分布, 发现新指标 R 在冻胀过程的集中程度和稳定性是最高的。新指标 R 具有理论基础, 同时耦合了土性参数和冻结环境因素, 突破了既有冻胀分级指标的局限性, 完善了现有冻胀分级体系, 为寒区工程设计和冻胀防治提供理论依据。

关键词: 冻胀; 分级; 机制; 土性参数; 冻结环境因素; 新指标 R

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)12-2519-10

作者简介: 何浩松(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和冻土等方面的科研工作。E-mail: haosonghe@csu.edu.cn。

Determining frost heave classification by using ratio of frost heave to square root of time

HE Haosong¹, TENG Jidong^{1, 2}, ZHANG Sheng^{1, 2}, SHENG Daichao^{1, 2, 3}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Changsha 410075, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Technology Sydney, Sydney 2007, Australia)

Abstract: The frost heave classification is the critical index for the design of foundation engineering in cold regions. At present, it is considered as a basic property of materials. Many criteria belong to empirical or semi-empirical methods and lack theoretical support. The frost heave tests are tedious and long time-consuming, and are not easily operated. To propose a rational and simple frost heave classification index, from the frost heave mechanism, an analytical model for unsaturated frozen soil is established and validated. Then a new frost heave classification index R ($\text{mm}/\text{h}^{0.5}$), which is the ratio of frost heave to square root of time, is identified based on the proposed model. Through comparison with the large number of frost heave results, the value of R less than 0.21 indicates the low frost heave classification, that between 0.21 and 1.18 represents the medium heave classification, and that greater than 1.18 means the high frost heave classification. From a statistical probability perspective, the probability density distribution of the values of each classification index is analyzed, and their trends are also compared. It is found that the concentration and stability of the new index R are the highest during freezing process. The new index R has theoretical support and simultaneously couples the basic soil properties and freezing environmental factors. It breaks through the limitation of the existing indexes, and enriches the frost heave classification system, and provides theoretical support for the engineering design in cold regions.

Key words: frost heave; classification; mechanism; soil property parameter; freezing environmental factor; new index R

0 引言

冻胀分级指标是寒区基础工程设计和冻胀防治的关键指标, 表征土体发生冻胀的能力。目前已有百

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178376, 51878665, U1834206); 湖南省杰出青年基金项目(2022JJ10076); 湖南省湖湘青年英才项目(2020RC3008); 中南大学创新驱动项目(2020CX034); 湖南省研究生科研创新项目(CX20210126); 中南大学研究生自主探索创新项目(2021zzts0215)

收稿日期: 2022-09-06

*通信作者(E-mail: jdteng@csu.edu.cn)

余种划分标准,但大多数标准仅在特定条件或者特定国家、区域有效,尚未形成一种全面性的判别标准^[1]。按照判别标准的获取方式可将其分为试验类和经验类标准。冻胀试验是研究土性材料冻胀分级最常用的方法,但该方法操作复杂、耗时长^[2]。而经验性判别指标,譬如以细粒含量为主控因素的判别指标,已受到室内试验和现场监测结果的严峻挑战,此类标准划分的非冻胀等级填料发生了显著冻胀^[3-5]。因此亟需提出能够合理确定土体冻胀分级的评判指标。

实际上,目前更常用冻害敏感性表征土体对冻胀的敏感程度,常被视为土体的固有属性。但冻害敏感性跟细粒含量、矿物成分、上附压力、冻结温度及冻结方式等土性参数和边界条件密切相关^[6-8]。只要冻结条件适合,所有土体都能发生冻胀,都可以是敏感性的,取决于土性因素、环境和补水条件等。Sheng^[9]充分讨论了冻害敏感性的定义,认为应该摒弃冻害敏感性指标,建立全面考虑环境、土性共同影响的冻胀分级方法。因此在探讨土体是否敏感,不具有意义。而冻胀分级可以预测土体发生冻胀的大小,能够考虑土性参数、环境因素等条件。因此,建议用冻胀分级概念,替换冻害敏感性。但目前并没有这种全面的分级方法,那么该如何建立冻胀分级指标与土性参数及冻结环境因素的关系呢?

经过近 100 a 的研究发展,现有超过 100 种冻胀分级方法,大致归为以下 4 类:①以细粒含量或土体级配为主要划分指标^[1],附以土体液塑限、毛细上升高度、非饱和土渗透系数等,此类方法简单且易于操作,备受推广,但该方法属于经验或半经验性总结,有较强的局限性,不同国家或地区的控制指标差异较大,并且冻胀土和非冻胀土之间没有明确的界限^[10],此外该类方法在预测土体是否会发生冻胀时可靠度偏低^[1, 11]。②以土-水-冰相互作用关系为主要划分依据,如平均土体基质吸力大小,进气值或饱和渗透系数等,该类方法没有理论基础且缺乏合理性,并缺乏进一步研究和验证,目前关于此类方法的研究并不多见^[1]。③以冻胀试验结果确定土体冻胀分级,分类指标主要有冻胀率^[12]、冻胀速率^[13]、冻胀量或冻胀量与冻结指数平方根的比值等^[1],此类方法是确定冻胀分级最直接、最具体的方式,但室内冻胀试验对设备要求高,操作繁琐、周期长且成本高。此外不同的冻结方式、降温模式和冷端冻结温度对冻胀试验结果都有显著的影响,试验条件尚未标准化,对于同一试样很有可能出现不同的冻胀分级。而现场冻胀试验体量大,周期更长,冻结条件难以控制,可行性低。④Konrad^[14]提出根据分凝势(SP)确定土体冻胀分级,分凝势为末冰透镜体形成稳态时,水通量与冻结缘的温度梯度的比

值。分凝势是经过理论推导得到的数学表达式,但关键参数水通量和冻结缘温度梯度仍需在冻胀试验中测量,同时在非稳定热条件下,分凝势并不是常数,因此难以准确表达土体冻胀特性^[15]。Konrad^[10, 16]和Loranger 等^[2]建立了分凝势和基本土性参数的经验表达式,根据细粒平均粒径、比表面积、液限和初始含水率可计算土体分凝势,但仍缺乏对冻胀机理的考虑。

目前最常用的细粒含量判别指标仍未能准确划分冻胀土和不冻胀土,在判别粗粒土是否会发发生冻胀时,可靠度低至 30%~70%,表明仅依靠单一主控因素确定冻胀分级是不合理的^[11]。Rieke^[17]曾提出利用细粒因子这一综合土性参数表征冻胀分级,Cwiakała 等^[18]提出利用砂当量这一指标来评价路基碎石土冻胀分级,但这些指标均为得到有效验证。在数值方面,Zhang 等^[19]提出了新的冻土水热迁移模型,Teng 等^[20]建立了粗粒土成冰冻胀模型,为研究土体冻胀提供了新视角。总体而言,既有冻胀分级方法缺乏对冻胀机理的考虑,忽略了冻胀分级是土体和冻结环境以及土性参数共同作用的结果^[5, 21-22],大多是经验或半经验性总结,难以准确表述冻胀分级。

为完善冻胀分级指标,本研究联立求解冻结区和未冻区的水分场和温度场的控制方程,建立土体冻胀解析数学模型,并以此提出新的冻胀分级指标,进一步验证和分析新判别指标的合理性。新冻胀分级指标综合考虑了环境因素和土性的影响,参数简洁明确、易于求得,是对既有冻胀分级指标的补充和完善。

1 土体冻胀数学解析模型

1.1 模型基本假设

负温条件使得土中自由液态水相变成冰,并伴随着冻结锋面逐渐向下迁移,冻结锋面处是水分迁移-相变最剧烈的位置,未冻区液态水经冻结锋面迁移至冰透镜底部,促进冰透镜体的萌发和生长,为简化计算模型,将温度低于冻结锋面处温度 T_f 的区域定义为冻结区,温度高于 T_f 的区域为未冻区,土体模型如图 1 所示。为简化模型计算,作如下 4 点假设。

- (1) 土体是均质的半无限空间体。
- (2) 冻结锋面将土体划分为冻结区和未冻区,与未冻区相比,冻结区的水分迁移对冻胀影响较小,因此可以忽略。冻结区与未冻区的温度 (T_1 和 T_2) 均为时间 t 和位置 x 的函数。
- (3) 对于未冻区,土体内部的基质势为水分迁移的驱动力,冻结锋面处的相变吸力是一个边界抽吸力;正温条件下温度梯度对水分迁移的影响不大,此处可以忽略。
- (4) 冻胀量等于迁移至冻结区的水所形成的冰透

镜体的厚度。

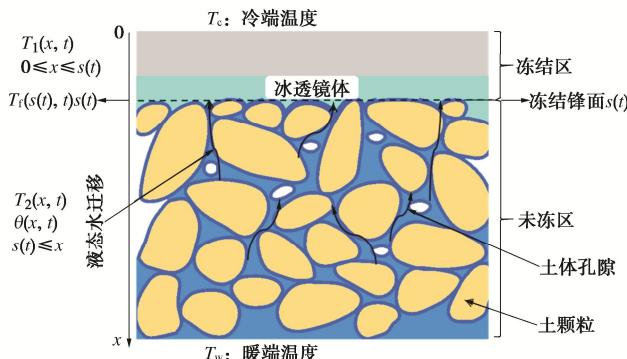


图1 冻胀模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frost heave model

1.2 模型控制方程

冻结锋面将土体分为冻结区 ($0 < x < s(t)$) 和未冻区 ($x > s(t)$)，冻胀模型求解过程如下。对于冻结区，冻土温度场主要受热传导影响，在不考虑相变潜热的前提下，温度场控制方程为

$$\frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1(x, t)}{\partial x^2} \quad (0 < x < s(t)) \quad (1)$$

式中： λ_1 为冻土热扩散系数 (m^2/s)。

未冻区土体的温度场控制方程表示为

$$\frac{\partial T_2(x, t)}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2(x, t)}{\partial x^2} \quad (x > s(t)) \quad (2)$$

式中： λ_2 为正温下土体热扩散系数 (m^2/s)。

在非饱和土中，Richards 方程控制水分迁移，由于涉及不同形式的积分和级数，Richards 方程的解析表达式难以获取。为简化 Richards 方程，引入单参数非饱和土渗透系数指数方程和单参数土水特征曲线指数方程，方程表达式如下：

$$k(\psi) = k_s e^{-\alpha\psi}, \quad (3)$$

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{-\alpha\psi}. \quad (4)$$

式中： k_s 为饱和渗透系数 (m/s)； ψ 为土体基质吸力 (kPa)； α 为土水特征曲线指数模型的拟合参数 (kPa^{-1})； θ_s 、 θ_r 分别为土体饱和体积含水量和残余体积含水量。通过简化计算可将 Richards 方程化简为

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} \quad (x > s(t)) \quad (5)$$

式中： D 为非饱和土水力扩散系数 (m^2/s)， $D = k_s / (\alpha g (\theta_s - \theta_r))$ ，在式(5)中，非饱和冻土水分迁移驱动力中，如冻结锋面的基质势梯度或土体毛细吸力远大于重力势梯度，因此忽略了重力项对水分迁移的影响。

式(1)，(2)，(5)中有 T_1 ， T_2 ， θ ， s 共 4 个未知数，因此仍需建立第 4 个方程。在冻结锋面处发生冰水相变，原位孔隙水与迁移至冻结锋面处的水相变释放的潜热与经热传导传输的能量平衡，建立能量平

衡方程表达式为

$$k_1 \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} - k_2 \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial x} = \rho_w v(t)L + \rho_w \theta_o L \frac{ds(t)}{dt} \quad (6)$$

式中： k_1 ， k_2 分别为冻土和未冻土的导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)； ρ_w 为水的密度 (kg/m^3)； $v(t)$ 为冻结锋面处水分迁移速度 (m/s)，根据达西定律，流速 $v(t)$ 等于冻土渗透系数 k_f (m/s) 与水力梯度 $\partial h / \partial x$ 的乘积； L 为水成冰时的相变潜热 (J/kg)； θ_o 为原位水体积含水量。

为求解式(1)，(2)，(5)，(6)，各方程边界条件如下：冷端边界温度为 $T_1(0, t) = T_c$ ，冻结锋面处的温度为 $T_1(s, t) = T_f = T_2(s, t)$ ，暖端边界温度为 $T_2(\infty, t) = T_w$ ，冻结锋面处未冻水含水率为 $\theta(s, t) = \theta_u$ ，暖端含水率为 $\theta(\infty, t) = \theta_s$ 。

1.3 模型求解

首先求解冻结区 ($0 < x < s(t)$) 温度控制方程(1)，要同时满足冷端边界条件 $T_1(0, t) = T_c$ 和冻结锋面的温度 $T_1(s, t) = T_f$ ，冻结锋面处的温度表达式常被写为

$$T_1 = T_1(s, t) = T + m \operatorname{erf}\left(\frac{s}{2\sqrt{\lambda_1 t}}\right) \quad (7)$$

式中： m ， T_f ， T_c 均为常数； $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数，因此式(7)中的误差函数项必然也是常数，

$$\frac{s}{2\sqrt{\lambda_1 t}} = \beta \quad (8)$$

式中： β 为常数。

将方程(8)带入方程(7)消除 m ，即可求解冻结区温度 $T_1(x, t)$ 分布函数：

$$T_1(x, t) = T_c + \frac{T_f - T_c}{\operatorname{erf}(\beta)} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\lambda_1 t}}\right) \quad (9)$$

对于未冻区 ($s(t) < x < \infty$) 的温度控制方程(2)，要同时满足冻结锋面温度条件 $T_2(s, t) = T_f$ 及暖端边界温度为 $T_2(\infty, t) = T_w$ ，式(2)的解常被写为

$$T_2(x, t) = T_w - \frac{T_w - T_f}{\operatorname{erfc}(\beta\sqrt{\lambda_1} / \sqrt{\lambda_2})} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\lambda_2 t}}\right) \quad (10)$$

同理可求得未冻区的含水率控制方程(5)的表达式为

$$\theta(x, t) = \theta_s - \frac{\theta_s - \theta_u}{\operatorname{erfc}(\beta\sqrt{\lambda_1} / \sqrt{D})} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (11)$$

采用土水特征曲线单参数指数模型，在冻结锋面处沿用该模型，如式(4)所示，将未冻水含量 θ_u 带入此模型，则未冻水体积含水量和基质吸力的关系为

$$\theta_u(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{-\alpha\psi} \quad (12)$$

联立式(11)，(12)可求解：

$$\psi = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\theta_s - \theta_u}{\theta_s - \theta_r} \frac{\operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt})}{\operatorname{erfc}(\beta\sqrt{\lambda_1} / \sqrt{D})} \right) \quad (13)$$

将式(13)两端对 x 求偏导, 可求得冻结锋面处的水力梯度为

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\alpha g} \left(\frac{\theta_s - \theta_u}{\theta_u - \theta_r} \right) \left[\frac{e^{-\beta^2 \lambda_1 / D}}{\operatorname{erfc}(\beta \sqrt{\lambda_1} / \sqrt{D})} \right] \frac{1}{\sqrt{\pi D t}}。 \quad (14)$$

将式(8)~(10), (14) 带入界面能量平衡方程(6), 可求解常数 β , 则完成所有方程的求解, 界面能量平衡方程表达式为

$$k_1 \frac{T_f - T_c}{\operatorname{erf}(\beta)} \frac{e^{-\beta^2}}{\sqrt{\pi \lambda_1}} - k_2 \frac{T_w - T_f}{\operatorname{erfc}(\beta \sqrt{\lambda_1} / \sqrt{\lambda_2})} \frac{e^{-\lambda_2 \beta^2}}{\sqrt{\pi \lambda_2}} \\ = \theta_o \rho_w L \beta \sqrt{\lambda_1} + \rho_w L k_f \frac{\partial h}{\partial x}。 \quad (15)$$

冻胀主要是由于水分迁移集聚形成冰透镜体引起的, 本模型假设迁移至冻结区的水分都生成冰透镜体, 冻胀量等价于水分迁移总量, 由达西定律可知, 冻胀数学解析模型的形式可以表示为

$$H = 1.09 \times \int_0^t v(t) dt = 1.09 \times \int_0^t k_f \frac{\partial h}{\partial x} dt \\ = 2.18 k_f \left[\frac{1}{\alpha g} \left(\frac{\theta_s - \theta_u}{\theta_u - \theta_r} \right) \frac{e^{-\lambda_1 \beta^2}}{\operatorname{erfc}(\beta \sqrt{\lambda_1} / \sqrt{D})} \frac{1}{\sqrt{\pi D}} \right] \sqrt{t}。 \quad (16)$$

由冻胀模型解析解方程(16)可知, 冻胀量是根号时间的正比例函数, 因此将方程(16)简化为

$$R = \frac{H}{\sqrt{t}} = 2.18 \frac{k_f}{\alpha g} \left(\frac{\theta_s - \theta_u}{\theta_u - \theta_r} \right) \frac{e^{-\lambda_1 \beta^2}}{\operatorname{erfc}(\beta \sqrt{\lambda_1} / \sqrt{D})} \frac{1}{\sqrt{\pi D}}。 \quad (17)$$

方程(17)定义 R 为冻胀量与时间平方根的比值($\text{mm}/\text{h}^{0.5}$), 对于不同的土性参数和边界条件, R 则对应不同的斜率, 能体现冻结状态下土体冻胀能力的大小, 因此 R 可作为确定土体冻胀分级的新指标, 对 R 命名为冻胀等级指数。

2 结果与分析

2.1 模型验证

选取德文郡粉土^[23]和粗粒土^[24]一维冻胀试验结果验证模型, 3 组试验的基本条件如表 1 所示。

表 1 冻胀试验基本条件

Table 1 Basic conditions for frost heave tests

序号	土体类型	试样尺寸 (D/H) / mm	边界温度 (T_c/T_w) / °C	初始含水量 /($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
1	粉土	97/104	-3.4/1.1	0.420
2	粉土	97/76	-2.5/1.1	0.420
3	粗粒土	198/200	-12/2	0.155

粉土冻胀试验中, 模型输入参数 T_c , T_w , T_f , θ_0 , k_1 , k_2 , k_s , k_f 均为已知, 土水特征曲线参考 Azmat et al.^[25], 土体热力学参数参考 Mitchell 等^[26], 冻结锋面

处未冻水含量取 $\theta_u=0.10$ 。对于粗粒土, 其细粒含量为 15%, 土水特征曲线及饱和渗透系数参考 SoilVision^[27]数据库编号为 10702 且细粒含量为 15.1% 的粗粒土, 土体热力学参数参考 Mitchell 等^[26], 取 $\theta_u=0.05$, $T_f=-0.5^\circ\text{C}$, 冻土渗透系数以 Teng 等^[28]提出的模型计算。具体参数值如表 2 所示。

表 2 模型验证的输入参数

Table 2 Input parameters for model validation

物理指标	文献[23]		文献[24]
	试验 1	试验 2	试验 3
$T_c / ^\circ\text{C}$	-3.4	-2.5	-12
$T_w / ^\circ\text{C}$	1.1	1.1	2
$T_f / ^\circ\text{C}$	-0.1	-0.1	-0.5
$\theta_o / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0.42	0.42	0.155
$\theta_\infty / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0.42	0.42	0.44
$k_1 / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	1.76	1.76	1.56
$k_2 / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	1.47	1.47	1.27
$\lambda_1 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	8.6×10^{-7}	8.6×10^{-7}	7.63×10^{-7}
$\lambda_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	4.9×10^{-7}	4.9×10^{-7}	4.22×10^{-7}
$D / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.5×10^{-7}	1.5×10^{-7}	1.7×10^{-5}
$L / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	334000	334000	334000
β	0.1394	0.1150	0.3958
$k_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1×10^{-9}	1×10^{-9}	2.4×10^{-5}
$k_f / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	7.34×10^{-12}	8.47×10^{-12}	2.29×10^{-9}
$\alpha / (\text{kPa}^{-1})$	0.002	0.002	0.36
$\theta_s / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0.42	0.42	0.44
$\theta_r / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0.08	0.08	0.035
$\theta_u / (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0.10	0.10	0.05

图 2 所示为模型预测值与试验结果的对比, 可以发现模型的计算结果与试验结果吻合较好, 验证了冻胀解析模型的可靠性。冻结初期冻胀量快速增长, 随着土体持续冻结, 后期冻胀量增长趋势逐渐变缓, 冻胀量增长趋势与时间呈幂函数关系。在水分补给充足条件下, 粉土的冻胀量增长趋势明显大于粗粒土的。冻结初期, 土体内部产生的水分迁移驱动力大, 水分迁移量显著, 所以冻结初期冻胀量增长速率更为明显^[23]。冻结后期温度梯度较小, 此时冻结缘厚度增加, 导致水分迁移受阻, 这也是前期冻胀量快速增长, 后期越来越缓慢的原因之一^[21]。

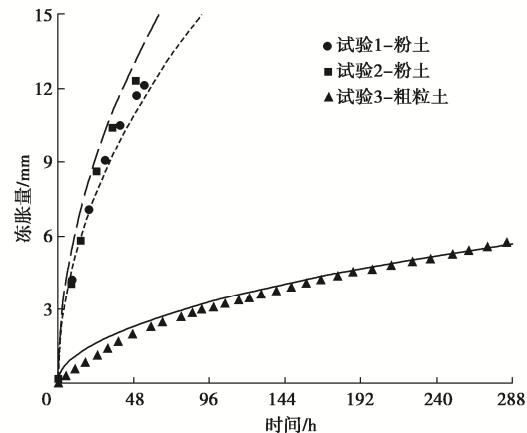


图 2 试验冻胀量与模型计算值比较

Fig. 2 Comparison of test and calculated results

2.2 新冻胀分级阈值确定方法

理论模型表明了 R 能够成为确定土体冻胀分级的新指标, 但指标 R 的阈值需要用冻胀试验结果确定。因此收集了一维恒温冻胀试验数据, 为新冻胀分级指标阈值的确定提供依据, 所收集的试验土样包括粗粒土、黏土和粉土, 冻胀试验数据来源以及基本试验条件如表 3 所示^[11, 23-24, 29-34]。

表 3 一维冻胀试验基本条件

Table 3 Basic conditions in one-dimensional frost heave tests

序号	冻结条件 (T_f/T_w) ^{0.5} /°C	土性类别	冻结时间/h	冻胀量/mm	参考文献
1	-7.7/12.2	粗粒土	120.0	1.4	文献[11]
	-10.9/10.3		48.0	0.8	
2	-3.4/1.1	德文郡 粉土	55.2	12.1	文献[23]
	-4.8/1.1		75.9	16.9	
	-2.5/1.1		70.4	14.3	
	-6.2/1.1		49.2	12.3	
3	-12/2	粗粒土	284.0	5.7	文献[24]
			281.1	3.7	
			286.0	2.6	
			284.8	1.7	
			287.0	1.0	
4	-3/2	黏土	286.4	0.8	文献[29]
			48.0	7.6	
5	-17/4	高液限 土 砂土	120.8	7.7	文献[30]
			121.6	14.0	
			126.6	16.3	
6	-5/2 -5/1 -10/2	膨胀土	68.9	11.3	文献[31]
			68.7	11.4	
			70.2	14.2	
7	-5/绝热 -10/绝热 -15/绝热	粗粒土	56.1	0.8	文献[32]
			32.0	0.9	
			20.0	0.7	
8	-3/1 -5/1 -7/1	级配 碎石土	48.0	0.8	文献[33]
			48.2	1.9	
			48.1	2.2	
9	-5/2	粉土	121.5	32.0	文献[34]

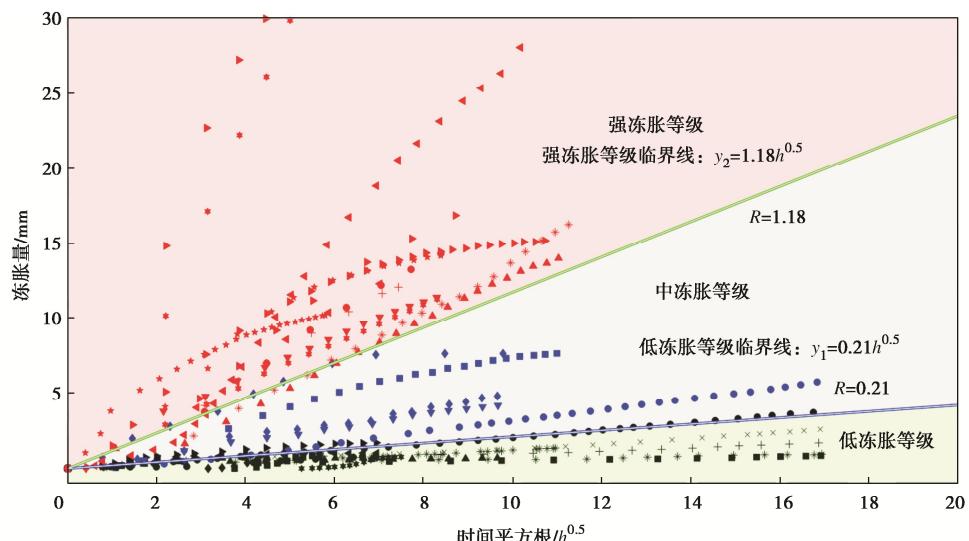


图 3 新冻胀分级指标

Fig. 3 Indexes of new frost heave classification

将 26 组冻胀试验数据点绘于图 3 中, 其中以时间平方根 ($h^{0.5}$) 为横坐标, 以冻胀量 (mm) 为纵坐标, 可以发现冻胀量与时间平方根基本呈正比例关系。数据统计分析表明, 不同初始冻结条件的土体, 冻胀斜率是不同的, 斜率越大, 冻胀增长趋势就越大, 反之则越小。当细粒土的初始含水率较低时 (k_f 减小), 斜率 R 值较小, 对冻胀并不敏感。当粗粒土持水能力提高时 (α 减小), 斜率 R 值变大, 冻胀量的增长趋势明显加快。由图 3 可知, 图中主要存在 3 个区域: ①冻胀量缓慢增长的浅绿色密集区, 对应于斜率 R 值较小, 定义该区域为低冻胀等级, 该区域的 $R < 0.21$; ②冻胀量快速增长的淡红色密集区, 该区域的 R 值明显增大, 定义为强冻胀等级, 其中 $R > 1.18$; ③两者之间的浅灰色稀疏区域, $0.21 \leq R \leq 1.18$, 定为中等冻胀等级。ASTM D5918 标准定义冻胀速率 “ $< 1 \text{ mm/d}$ ” 和 “ $> 8 \text{ mm/d}$ ” 的冻胀等级为 “Negligible” 和 “High”, 将 ASTM 指标对应的数值与量纲转化为新指标 R 的形式, 发现 “Negligible” 冻胀等级所对应的新指标 R 值为 $0.204 \text{ mm}/h^{0.5}$, 与本文所确定的阈值是相同的。而 “High” 冻胀等级对应 R 值为 $1.633 \text{ mm}/h^{0.5}$, 大于本文所确定的强冻胀等级阈值, 本文所划分的中等冻胀等级偏安全。新指标 R 综合考虑各土性参数和初始冻结条件对冻胀的影响, 表明只要条件合适, 所有土体都能发生冻胀。

2.3 冻胀分级指标稳定性分析

已有冻胀分级指标大多以土体冻结过程中某一时间点的物理量表示, 如特定时间段内的冻胀量、冻胀率或冻胀速率, 或特定时间节点的分凝势, 这些指标均为随时间波动的过程量, 不同的时间点会造成冻胀分级的差异, 不利于确定冻胀分级。为定量分析各指

标的稳定性, 选用 Loranger^[35]冻胀试验数据, 对各判别指标的稳定性进行分析。试验材料来自挪威 Hellvik 采石场, 粒径范围为 0~4 mm, 细粒含量(小于 0.063 mm)为 22.4%, 试样尺寸为 $D/H=150/200$ mm, 先将试样饱和, 再进行补水冻胀试验, 顶部温度为 -3.3 °C, 底部温度为 2.2 °C, 持续时间为 96 h。采用统计学方法表征冻胀量、冻胀率、冻胀速率、分凝势和新指标 R 的概率密度分布, 函数定义为

$$f(i) = \frac{\Delta n}{n \Delta i} \quad . \quad (18)$$

式中: i 为冻胀分级指标对应的数值; n 为指标 i 对应数值的总个数; Δn 为指标 i 对应的数值落在区间 Δi 的个数。根据冻胀量和冻深变化, 每隔 1 h 选取冻胀过程试验数据点, 计算各指标数值。本研究中冻胀量、冻胀率、冻胀速率、分凝势和新指标 R 对应的 Δi 分别为 3.5 mm, 3%, 0.14 mm/h, 1.2 mm²/(°Ch), 0.37 mm/h^{0.5}, 分别取最大数值的 10%, 各指标概率密度分布如图 4 所示。

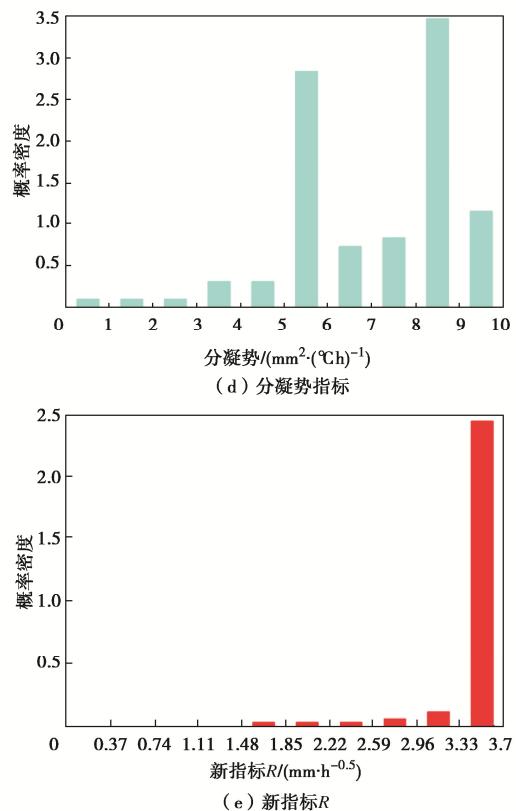
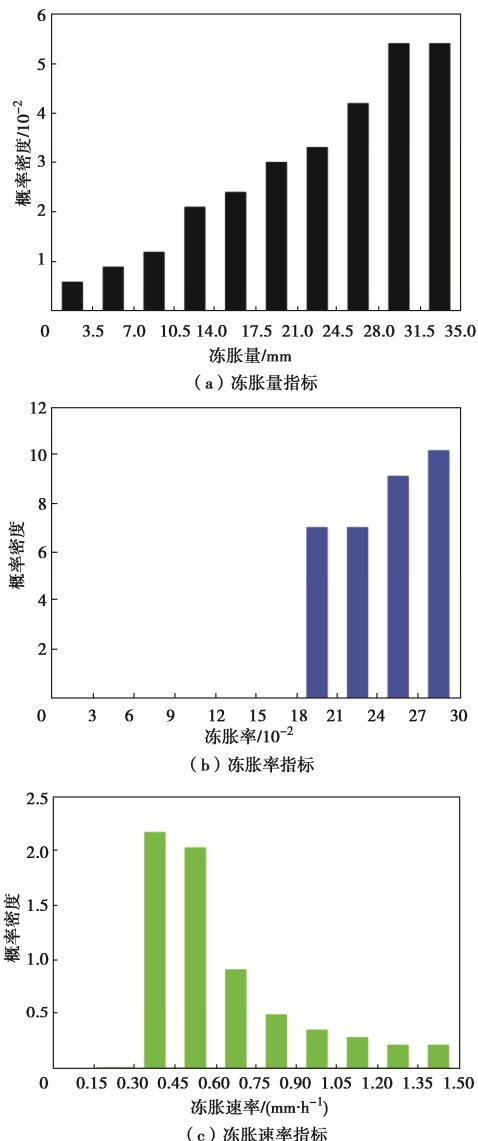


图 4 各冻胀分级指标概率密度分布

Fig. 4 Probability density distribution of indexes

图 4 (a) 表示冻胀量指标的概率密度分布随冻胀量的增长而增加, 冻胀量<10.5 mm 区间概率密度较小, 在 10.5~28 mm, 概率密度明显变大, 而在 28~31.5 mm 和 31.5~33 mm, 两者概率密度相等且为最大。由图 4 (b) 可知, 冻胀率概率密度集中分布在 0.18~0.30 跨度的 4 个小区间, 且概率密度差别不是很大, 分布较为均匀, 而小于 0.18 区间概率密度分布为 0。冻胀速率概率密度主要集中在 0.3~0.45 mm/h 和 0.45~0.6 mm/h, 该两区间概率占比分别为 32.6% 和 30.5%, 随着冻胀速率的增大, 概率密度首先呈现快速下降趋势, 随后缓慢减小, 具体如图 4 (c) 所示。分凝势的最大概率密度落在 8~9 mm²/(°Ch), 概率占比仅为 34.7%, 5~6 mm²/(°Ch) 区间概率密度较高, 其余各区间概率密度由 1.1%~11.6%, 总体上分凝势指标概率密度分布较为分散, 如图 4 (d) 所示。图 4 (e) 显示新指标 R 存在明显的集中分布的特征, 最大概率高达 90.5%, 落在 3.33~3.7 mm/h^{0.5}。通过对比分析可以发现, 冻胀量和冻胀速率指标分布呈现出阶梯式变化, 冻胀率指标集中分布在大跨度区间, 另外分凝势指标分布较为分散, 只有新指标 R 的分布最集中, 波动最小。

为明确冻胀过程中各判别指标的变化趋势, 选取 3 组冻胀试验结果进行讨论分析, 包含粗粒土^[35]、粉土^[14]和黏土试样^[29], 利用冻胀量和冻深试验结果, 分

别计算冻胀过程中各指标的波动特征, 具体结果如图 5 所示。在图 5 中, 无论是细粒土还是粗粒土, 新指标 R 先快速增大, 然后稳定在某一范围内。粗粒土冻结 12 h 后, 指标 R 趋于稳定。对于粉土和黏土试样, 大概分别需要 36, 12 h, 指标 R 趋于稳定时所需时间差异较大, 可能是土性和式样尺寸不同造成的。冻胀量和冻胀率指标随时间增大而增大, 而冻胀速率指标总体上呈现出随时间增大而减小的趋势。对于分凝势指标, 冻结开始阶段分凝势急剧增加, 随后总体上呈现出下降的趋势。可见冻胀量、冻胀率、冻胀率以及分凝势指标在土体冻结过程中均不稳定, 随时间变化出现较大的波动, 虽然新指标 R 前期也存在波动, 但较快就能趋于稳定。因此新指标 R 具有分布集中和稳定的特点, 是确定土体冻胀分级的良好指标。

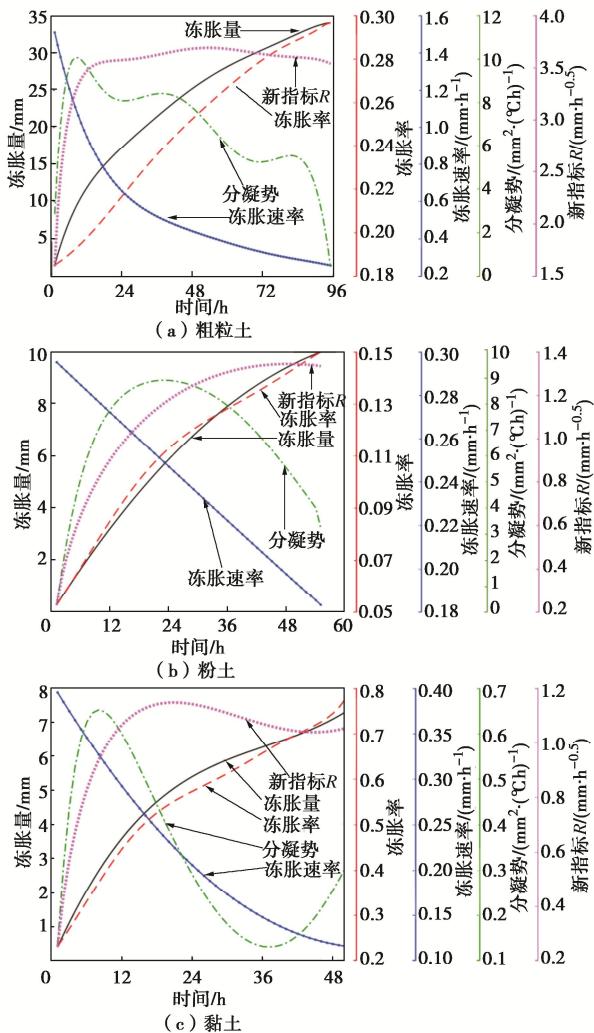


图 5 各指标随时间的变化趋势

Fig. 5 Trend of each index over time

2.4 细粒指标与新指标 R 的比较

为对比细粒含量指标和新指标 R 的相关性, 采用 Nurmikolu^[36]冻胀试验数据进行分析。试验结果来自百余组粗粒土 ($\leq 0.063 \text{ mm}$ 的细粒含量少于 15%) 冻

胀试验, 试样尺寸为 $D/H=150/150 \text{ mm}$, 先将试样饱和, 再进行补水冻胀试验, 顶部温度为 -3°C , 底部温度为 1°C 。将 96 h 的冻胀量增长趋势转化为新指标 R 的形式, 新指标 R 与细粒含量关系如图 6 所示。新指标 R 与细粒含量的关系并不明显, 试验结果较为分散, 两者不存在稳定的关系。但图 6 中的离散数据点存在集中分布的形式, 根据数据分布特点, 将数据点划分为四个集中分布的区域, 分别为浅绿色区、灰色区、淡红色区和淡紫色区。图 6 表明, 相同冻结条件下细粒含量相同的土体的冻胀分级存在较大的差异, 难以找到明确的对应关系, 具体冻胀分级需开展冻胀试验才能确定。

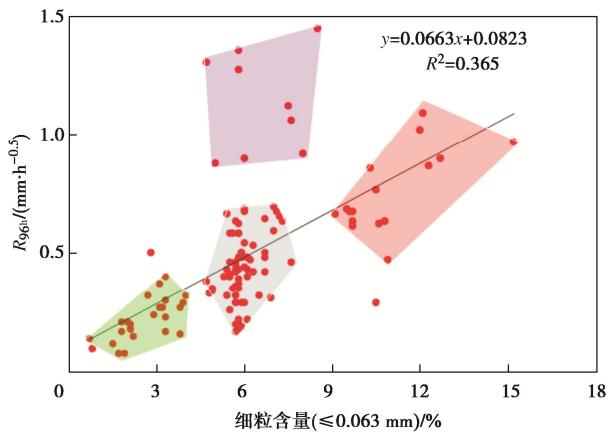


图 6 新指标 R 与细粒含量的关系

Fig. 6 Relationship between new index R and fines content

3 讨论

细粒比表面积大, 冻结状态下细粒表面存在大量的未冻水膜, 为冻土水分迁移提供有利通道, 因此细粒含量指标能够表征土体冻胀分级, 但这种表征关系并不具体。文献[37]提出以细粒含量 ($< 0.02 \text{ mm}$) 作为确定土体冻胀分级指标, 当碎石土的细粒含量为 $3\% \sim 10\%$, 其冻胀分级由非常低到高, 造成冻胀分级跨度大的原因可能是土体级配差异、干密度或是矿物成分不同等, 但该标准未能考虑在内。Kaplar^[38]通过开展大量冻胀试验, 发现冻胀分级和细粒含量没有明显的规律, 而是存在区域对应的关系, 其中有相当大的重叠区域, 冻胀分级和细粒含量的关系并不具体。可以发现, 此类标准主要有 3 个特点: ①冻胀分级不明确, 跨度大; ②冻胀分级存在区域性分布; ③冻胀分级存在重叠, 仍需要开展冻胀试验才能确定土体冻胀分级。因此以细粒含量为主控因素的冻胀分级指标有待完善。实际上, 细粒改变土体的亲水特性、吸附作用和孔隙分布特征, 从而增强或减弱土体持水特性^[39-40]

和渗透特性^[41], 很大程度上影响了冻土水分迁移量, 但既有冻胀分级指标尚未考虑。

新指标 R 建立在宏观水-热控制方程基础上, 涵盖了土体持水特性 ($\theta_s, \theta_r, \alpha, D$), 渗透特性 (k_f, θ_u), 材料热力学参数 λ_i 及界面平衡常数 β 的关系, 不仅能将细粒含量的影响具体化, 同时融合了冻土水分迁移机制和土性参数、冻结环境因素的关系, 明确了影响冻胀分级的土性因素和边界条件, 突破了传统分级指标的经验表达, 丰富和完善了冻胀分级体系。虽然新指标 R 涉及参数较多, 但参数均可由土工试验测得, 且有明确的物理意义。与新指标 R 关系密切的参数主要集中在持水和冻土渗透特性两方面, SWCC 数据库 SoilVision^[27]、UNSOADA^[42] 和 SFCC 数据库^[43] 为新指标 R 参数的确定提供了参考。

4 结 论

针对既有冻胀分级指标未能考虑土性参数和冻结环境因素这一问题, 推导建立了土体冻胀解析模型, 提出了具有理论基础、包含土性参数和冻结环境因素的新冻胀分级指标 R , 突破了既有分级指标的局限性, 得到 6 点结论。

(1) 通过联立求解冻结区和未冻区的水分场、温度场控制方程和冻结锋面能量平衡方程, 获得了土体冻胀解析模型, 该模型能较好的预测土体冻胀量变化趋势。

(2) 基于冻胀解析模型, 提出利用冻胀量与时间平方根的比值 R 作为新的冻胀分级指标。以大量冻胀试验结果为参考, 提出当 $R < 0.21$ 时, 对应低冻胀等级, 当 $0.21 \leq R \leq 1.18$ 时, 对应中等冻胀等级, 而当 $R > 1.18$ 时, 对应强冻胀等级。

(3) 冻胀量、冻胀率、冻胀速率、分凝势和新指标 R 均属于冻胀过程的物理量, 其中新指标 R 在冻胀过程中波动最小、离散程度最低、分布最集中, 体现了新指标 R 在冻胀过程中具有稳定性和集中性的特点, 表明新指标 R 在确定冻胀分级时更合适。

(4) 细粒含量指标跟冻胀分级存在区域分布的对应关系, 具体冻胀等级需开展冻胀试验才能确定。

(5) 与既有判别指标相比, 新指标 R 具有 3 个优点: ①建立了冻胀机制与土性和冻结环境因素的数学关系; ②各参数有明确的物理意义且易于测量; ③具有明确的理论依据且计算稳定性强。揭示了冻胀分级与土性参数、冻结环境因素的具体关系, 完善了冻胀分级体系, 为寒区基础工程建设提供理论支撑。

(6) 针对冻胀分级指标的后续研究, 提出 3 点建议: ①冻胀等级划分一直是寒区工程建设和维护的关

键指标, 各指标的阈值差异、适用条件、可靠性及可操作性, 在未来研究和设计中需认真考虑。②目前各冻胀试验条件差别较大, 需进一步完善以满足试验结果与新指标 R 的匹配, 如何对试样制作、试验步骤和冻胀等级划分等等进行标准化。③气态水成冰的冻胀试验和理论模型亟需完善, 试验中如何控制气态水湿度、冻结时间等, 理论模型包括冰透镜体萌发判据是什么、能否形成周期性冰透镜体等等。

参 考 文 献:

- [1] CHAMBERLAIN E J. Frost Susceptibility of Soil, Review of Index Tests[M]. Hanover: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.
- [2] LORANGER B, DORÉ G, HOFF I, et al. Assessing soil index parameters to determine the frost susceptibility of crushed rock aggregates[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 197: 103489.
- [3] 卢春房. 路基工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 191-274. (LU Chunfang. Subgrade Construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015: 191-274. (in Chinese))
- [4] NIU F J, LI A Y, LUO J, et al. Soil moisture, ground temperatures, and deformation of a high-speed railway embankment in Northeast China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 133: 7-14.
- [5] LUND M S M, HANSEN K K, ANDERSEN I B. Frost susceptibility of sub-base gravel used in Pearl-Chain Bridges: an experimental investigation [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(11): 986-998.
- [6] KONRAD J M, LEMIEUX N. Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 515-527.
- [7] KONRAD J M, MORGENSEN N R. Effects of applied pressure on freezing soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(4): 494-505.
- [8] KONRAD J M. Influence of freezing mode on frost heave characteristics[J]. Cold Regions Science and Technology, 1988, 15(2): 161-175.
- [9] SHENG D C. Frost susceptibility of soils—A confusing concept that can misguide geotechnical design in cold regions [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2021, 13(2): 87-94.
- [10] KONRAD J M. Frost susceptibility related to soil index properties[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(3):

- 403-417.
- [11] 何浩松, 滕继东, 张升, 等. 试论冻害敏感性的合理性[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 224-234. (HE Haosong, TENG Jidong, ZHANG Sheng, et al. Rationality of frost susceptibility of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 224-234. (in Chinese))
- [12] 铁路特殊路基设计规范: TB 10035—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018. (Code for Design on Special Railway Earth Structure: TB 10035—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018. (in Chinese))
- [13] Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils: ASTM D5918-13[S]. 2013 .
- [14] KONRAD J M. Frost Heave Mechanics[D]. Edmonton: University of Alberta, 1980.
- [15] HENDRY M T, ONWUDE L U, SEGO D C. A laboratory investigation of the frost heave susceptibility of fine-grained soil generated from the abrasion of a diorite aggregate[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 123: 91-98.
- [16] KONRAD J M. Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(1): 38-50.
- [17] RIEKE R D. The Role of Specific Surface Area and Related Index Properties in the Frost Susceptibility of Soils [D]. Corvallis: Oregon State University, 1982: 71-78.
- [18] ĆWIĄKAŁA M, GAJEWSKA B, KRASZEWSKI C, et al. Laboratory investigations of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 3476-3484.
- [19] ZHANG S, TENG J, HE Z, et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils[J]. Géotechnique, 2016, 66(11): 927-940.
- [20] TENG J D, LIU J L, ZHANG S, et al. Frost heave in coarse-grained soils: experimental evidence and numerical modelling[J]. Géotechnique, 2022: 1-12.
- [21] SHENG D C, ZHANG S, YU Z W, et al. Assessing frost susceptibility of soils using PCHeave[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 95: 27-38.
- [22] TENG J, SHAN F, HE Z, et al. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand[J]. Géotechnique, 2019, 69(3): 251-259.
- [23] KONRAD J M, MORGENSEN N R. A mechanistic theory of ice formation in fine grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(4): 473-486.
- [24] 高建强. 季节冻土区高速铁路路基冻胀机理及防治技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 19-39. (GAO Jianqiang. Study on Frost Heave Mechanism and Prevention Technology of High-Speed Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Area[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 19-39. (in Chinese))
- [25] AZMATCH T F, SEGO D C, ARENSEN L U, et al. Using soil freezing characteristic curve to estimate the hydraulic conductivity function of partially frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83-84: 103-109.
- [26] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [27] SOILVISION. SoilVision Version 3 (Computer Program) [R]. Sask :SoilVision Systems Limited, 2002.
- [28] TENG J D, YAN H, LIANG S H, et al. Generalising the Kozeny-Carman equation to frozen soils[J]. Journal of Hydrology, 2021, 594: 125885.
- [29] 薛珂. 正冻土水分迁移和冰晶生长过程研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 91-104. (XUE Ke. Study on Water Migration and Ice Crystal Growth Process in Permafrost[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 91-104. (in Chinese))
- [30] ASKAR Z, ZHANBOLAT S. Experimental investigations of freezing soils at ground conditions of Astana, Kazakhstan[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2018, 7: 399-406.
- [31] 程旭东. 饱和膨胀土冻胀特性及冻胀模型[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 22-32. (CHENG Xudong. Frost Heave Characteristics and Model for Saturated Expansive Clay[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 22-32. (in Chinese))
- [32] 赵世晨. 哈牡客专铁路路基冻胀特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019: 41-59. (ZHAO Shichen. Study on Frost Heave Characteristics of Harbin-Mudanjiang High-Speed Line Subgrade[D]. Xi'an: Changan University, 2019: 41-59. (in Chinese))
- [33] 王青志. 寒区高铁路基粗颗粒填料冻胀变形与强度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 44-53. (WANG Qingzhi. Study on the Frost Heave Behavior and Strength of Coarse-Grained Fillings From High-Speed Railway Subgrade in Cold Region[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,

- 2017: 44-53). (in Chinese))
- [34] DAGLI D. Laboratory Investigations of Frost Action Mechanisms in Soils[D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2017.
- [35] LORANGER B. Laboratory Investigation of Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates and Field Assessment of Frost Heave and Frost Depth[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2020.
- [36] NURMIKOLU A. Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track[D]. Tampere: Tampere University of Technology, 2005.
- [37] US Army Corps of Engineers. Soils and Geology-Pavement Design for Frost Conditions[S]: 5-818-2. 1965.
- [38] KAPLAR C W. Freezing Test for Evaluating Relative Frost Susceptibility of Various Soils[M]. Hanover: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1974.
- [39] JIANG X G, WU L, WEI Y W. Influence of fine content on the soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(2): 1371-1378.
- [40] SHEN J H, HU M J, WANG X, et al. SWCC of calcareous silty sand under different fines contents and dry densities[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9: 682907.
- [41] 胡明鉴, 崔翔, 王新志, 等. 细颗粒对钙质砂渗透性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2925-2930. (HU Mingjian, CUI Xiang, WANG Xinzhi, et al. Experimental study of the effect of fine particles on permeability of the calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2925-2930. (in Chinese))
- [42] NEMES A, SCHAAP M G, LEIJ F J, et al. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(3/4): 151-162.
- [43] DEVOIE É G, GRUBER S, MCKENZIE J M. A repository of measured soil freezing characteristic curves: 1921 to 2021[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(7): 3365-3377.

2024 年第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术研讨会征文通知（一号通知）

第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会以“长大隧道工程挑战与技术创新”为主题，将于2024年8月在新疆乌鲁木齐举行，会议将围绕水利、交通、矿山、市政等行业的热点问题进行交流，旨在继续为海峡两岸隧道与地下工程领域的学者和工程师搭建一个高品质的学术交流平台，推动隧道与地下工程领域重要问题进行深入研究，分享最新的观点和最前沿的研究成果，欢迎各界同仁积极投稿。

一、会议时间、地点

时间：2024年8月，地点：新疆乌鲁木齐。

二、会议主题

长大隧道工程挑战与技术创新

三、会议内容

①长大隧道掘进机施工信息化与智能化技术；②隧道岩爆、大变形与突水突泥等重大地质灾害防控技术；③强震区隧道工程抗减震技术；④超长跨海隧道建设与数字化管养关键技术；⑤城市更新与地下空间开发利用；⑥国内外典型地下工程案例分析。

四、组织机构

主办单位：中国岩石力学与工程学会地下工程分会，中国土木工程学会隧道及地下工程分会；台湾隧道协会。

五、会议征文

①应征论文须是原创的、尚未公开发表的论文，中英文均可，请作者分别参照《岩土力学》和《隧道与地下工程灾害防治》论文的格式撰写投稿。②拟投稿论文请以“题目-单位-姓名”为主题投稿至《岩土力学》或《隧道与地下工程灾害防治》编辑部，并标注“2024 年第二十二届海峡两岸隧道与地下工程学术及技术研讨会投稿”。③投稿截止日期：2024 年 2 月 29 日。

六、联系方式

袁敬强 13871173207，杨云 13545026200。邮箱：dxgcfh2023@163.com。《岩土力学》投稿网址：<http://ytlx.whrsm.ac.cn/CN/1000-7598/home.shtml>。《隧道与地下工程灾害防治》投稿网址：<http://tunnel.sdujournals.com/CN/column/column2.shtml>。

（中国岩石力学与工程学会地下工程分会 供稿）