

文章编号:1673-2049(2019)02-0101-15

## 冻土导热系数测试和计算现状分析

陈之祥<sup>1,2</sup>, 李顺群<sup>2</sup>, 夏锦红<sup>3</sup>, 冯彦芳<sup>2</sup>, 刘志锋<sup>2,4</sup>

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024; 2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 3. 新乡学院 土木工程与建筑学院, 河南 新乡 453003; 4. 天津城建大学 材料科学与工程学院, 天津 300384)

**摘要:**为认知冻土导热系数测试和计算方法的研究现状,从而服务于冻土温度场的计算,介绍了冻土导热系数的研究背景和导热系数对冻土温度场的贡献,并对冻土的组成和导热系数随不同负温变化的原因进行了分析。阐述了目前冻土导热系数的测试技术、计算方法、理论计算模型及土中固相矿物导热系数的确定方法,并分析了其优缺点和误差存在的原因。对冻土导热系数随温度、干密度、含水率等因素变化的研究成果进行了整理,分析了基于测温法确定冻土导热系数存在的误差及其原因,并初步提出了一种修正冻土导热系数测试结果的方法。在此基础上,提出了对冻土导热系数测试和计算的建议和展望。结果表明:温控环境和测试过程中的相变热对导热系数实测值均存在影响,从未冻水含量的角度修正相变潜热对导热系数测试过程的影响具有理论可行性;线性回归预估模型应考虑土质对测试值的初始影响,从相间热量平衡的角度建立导热系数的理论模型,对于温度场解析问题的研究具有重要作用;考虑土颗粒的多孔特性,推演不随密度变化的土中固相物质导热系数的确定方法,对于提升冻土导热系数计算模型的预测精度具有基础作用;从微观角度出发,建立能够反映土体冻结速率的导热系数模型应是冻土导热系数研究区别于常规土体的重要方向;统筹考虑导热系数、比热和潜热对温度场的影响,从温度场的角度验证导热系数计算模型的可靠度是必要的;所得到的结论可为冻土温度场解析解问题的研究和冻结法施工中的温度场预测提供借鉴。

**关键词:**岩土工程;冻土;导热系数;未冻水含量;计算模型;测温法

**中图分类号:**P642.14 **文献标志码:**A

## Test and Calculation Situation Analysis of Thermal Conductivity of Frozen Soil

CHEN Zhi-xiang<sup>1,2</sup>, LI Shun-qun<sup>2</sup>, XIA Jin-hong<sup>3</sup>, FENG Yan-fang<sup>2</sup>, LIU Zhi-feng<sup>2,4</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang 453003, Henan, China; 4. School of Materials and Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** In order to cognize the current situation of the test and calculation methods of frozen soil thermal conductivity, thus to serve the calculation of temperature field of frozen soil. The

收稿日期:2018-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41472253);天津市自然科学基金重点项目(16JCZDJC39000);

天津市建设系统科学技术发展计划项目(2016-25)

作者简介:陈之祥(1990-),男,河南濮阳人,大连理工大学工学博士研究生,E-mail:chen\_zhixiang@126.com。

通信作者:李顺群(1971-),男,河南卫辉人,教授,工学博士,博士后,E-mail:lishunqun@yeah.net。

research background of frozen soil thermal conductivity and the contribution of thermal conductivity to the temperature field of frozen soil were summarized, the reasons of the composition and thermal conductivity of frozen soil vary with negative temperatures were analyzed. The contents, advantages, disadvantages and errors of the testing technology, calculation method, theoretical calculation model of frozen soil thermal conductivity were introduced, and determination method of solid minerals thermal conductivity were described. The existing research results of frozen soil thermal conductivity with temperature, dry density, moisture content and other factors were summarized. The error and its reasons for the frozen soil thermal conductivity based on the temperature measurement method were analyzed, and a preliminary correction method for the thermal conductivity of frozen soil test was proposed. On the basis, the suggestions and prospects for the test technology and calculation methods of frozen soil thermal conductivity were put forward. The result shows that both temperature control environment and latent heat of phase change have effects on the testing process of thermal conductivity, it is theoretically feasible to modify the effect of latent heat on the thermal conductivity testing process from the view of frozen water content. The linear regression model should consider the initial effect of soil mineral on the thermal conductivity values, the theoretical model of thermal conductivity established from the point of heat balance between phases plays an important role in the studying of temperature field analytical problem. Considering the porous characteristics of soils, deducing the method for determining the thermal conductivity of soil mineral with being independent of densities, which plays a fundamental role in improving the prediction accuracy of the calculation model of frozen soil thermal conductivity. From the view of microcosmic point and considering the difference between frozen soil and conventional soil, it is an important direction to establishing the thermal conductivity model reflecting the freezing rate of soil. Considering the influence of thermal conductivity, specific heat, and latent heat on temperature field, it is necessary to verify the reliability of the calculation model of thermal conductivity from the point of temperature field. The conclusions can be used as reference for the study of analytical solution of frozen soil temperature field and the prediction of temperature field in freezing construction.

**Key words:** geotechnical engineering; frozen soil; thermal conductivity; unfrozen water content; calculation model; temperature measurement method

## 0 引言

导热系数是指单位厚度的介质在单位温度差作用下,在单位时间内通过单位面积土体传递的热量<sup>[1]</sup>。相较于常温土体,冻土导热系数测试与计算需要考量更多的影响因素。在寒区工程和人工冻结法施工过程中,导热系数决定着冻土中热流的传播速度和温度场分布,是冻结温度场预测的关键参数<sup>[2-3]</sup>。对冻土导热系数测试技术、计算方法进行研究对于提升冻土温度场的预测精度具有重要意义。

土是松散的多相体,其结构排列决定了不同方向上土体导热系数的差异,即为土体导热系数的各向异性<sup>[2]</sup>。冻土是由土颗粒、水、冰体、气体组成的

多相体<sup>[3]</sup>,受土体矿物组成、外荷载、含盐量、土颗粒表面张力等因素的影响,土中水的冻结发生在 0℃ 以下相当大的温度区间而非 0℃ 点<sup>[4-5]</sup>。与常温土体不同,不同负温下土体中的含冰量和分布状况不同<sup>[6]</sup>,因此,同一时刻的冻土在不同方向的导热系数存在差异,在不同冻结时刻同一方向的冻土导热系数也存在明显差异。

在冻土导热系数测试试验中,外热源施加给土样的热量并不全部反映在冻土温度的增加上,还有一部分热量被冰的融化所吸收。因此,测温法确定的冻土导热系数未考虑冰体融化所吸收的潜热。同时,受土体特性和测试仪器影响,通过导热系数和比热容反演出的平行土样在同一温度下的未冻水含量

也不相同<sup>[7]</sup>。冻土温度场计算方法主要有解析法、模拟法、数值计算法,该类方法均需基于冻土的导热系数、比热容等热参数进行<sup>[8]</sup>。采用存在误差的热参数进行冻土温度场的预测,其预测精度是欠佳的。在冻土模型试验设计过程中,也需要依据导热系数等物理量或者导热系数描述的热方程进行相似准则的推导<sup>[9-10]</sup>。因此,导热系数测试和预测方程的精度直接影响土体工程的温度场分布和温度场影响下的结构稳定性。

国内外诸多文献报道了冻土导热系数的获取方法,主要分为实测法、基于统计学的计算方法、计算模型等<sup>[1-2]</sup>。本文对冻土导热系数测试和计算的常规方法进行总结和评价,以便于工程实践应用和理论研究。同时,对冻土导热系数的获取方法和研究成果进行阐述,分析基于测温法确定冻土导热系数存在的误差。在此基础上,探讨冻土导热系数获取方法对冻土温度场计算的影响,给出基于未冻水含量的导热系数修正思路,提出冻土导热系数测试和计算研究的建议和展望。

## 1 冻土导热系数测试技术

不同于常规多孔介质的导热系数测试方法,冻

土的导热系数测试对于试样环境温度具有较高要求。温度是表示介质冷热状态的基本物理量<sup>[11]</sup>,目前的测温装置是依据水银、酒精等材料的热学性质或热电特性,通过接触、辐射的方法来间接量测的<sup>[12]</sup>。同时,受土样尺寸和冻结过程中水分迁移及冷源稳定性等因素的影响,实现待测土样的温度均一性存在较大难度,基于此的冻土导热系数研究也不圆满。冻土导热系数测试方法主要分为三大类,即稳态法、瞬态法和正规状态法<sup>[13-14]</sup>(表 1),各方法在操作及测试精度等方面存在一定差别。

表 1 冻土导热系数常用测试方法  
Tab. 1 Common Test Methods for Thermal Conductivity of Frozen Soil

类别	测试方法
稳态法	热流计法
	比较法
瞬态法	平板热脉冲法
	热线法
	球形探针法
正规状态法	正规状态法

不同冻土导热系数测试方法的原理和操作不同,适用范围也存在一定差别,不同的冻土导热系数测试方法技术原理及特点如表 2 所示。

表 2 不同导热系数测试方法的技术原理及特点

Tab. 2 Technical Principles and Characteristics of Different Thermal Conductivity Test Methods

测试方法	应用原理和应用范围	测试技术评价	测试特征
热流计法	单向热传导;土温恒定;热流垂直测试土样 <sup>[15]</sup> ;无内热源;原状土或重塑土均适用	仅需 1 个试样盒 <sup>[16]</sup> ;测试时间长;一次仅能得到一个结果;不用测温	测试时间较长;适用于室内,试验环境要求高 <sup>[17-18]</sup> ;测试理论及测试方法相对成熟,可同时测定导温系数、体积热容量 <sup>[4,14]</sup> ;采用恒温的热/冷端装置,可降低热融导致的潜热发生概率 <sup>[15]</sup>
比较法	比较土样与导热系数已知试样的热流传播速度,得出待测土样的导热系数 <sup>[4]</sup> ;便于应用于重塑土样	需要 2 个试样盒;热流传播距离长;对冷端要求高;有具体的测试技术标准 <sup>[17]</sup>	
平板热脉冲法	适用温度在-20℃以上,粒径 $r\leq 20$ mm 的粒状砂质土等粗粒土 <sup>[14]</sup> ;根据土样与加热器接触处,以及与加热面一定距离处土样温度变化来计算 <sup>[14]</sup>	通过获取冻土的导温系数来确定导热系数,引入了测试变量;因试样较大,原状的完整土样取样困难 <sup>[17]</sup>	测试时间短;计算较复杂,测试误差大 <sup>[21]</sup> ;存在线热源、点热源、面热源等形式;无法避免加热引起冰体融化,须结合未冻水含量测试结果或经验值进行修正 <sup>[13]</sup>
热线法	适用于粉状、颗粒状材料 <sup>[19]</sup> ;探针自身热容量小,加热功率稳定 <sup>[13]</sup>	比热流计法和正规状态法的测试结果平均偏大 1.1 倍~1.6 倍 <sup>[20]</sup> ;误差可能超过真实值 10 倍 <sup>[13]</sup>	
正规状态法	适用于粒径 5 mm 以下的砂性和黏性含水融土 <sup>[14]</sup> ;适用于原状土,土样尺寸要求较低 <sup>[17]</sup>	同样可以测定冻土比热容 <sup>[14]</sup> ;中国现行规范采用该方法 <sup>[20,22-23]</sup>	可同时测定土体的导温系数、体积热容量 <sup>[24]</sup>

## 2 冻土导热系数计算模型

基于统计学和仿真方法在岩土工程中的应用,冻土导热系数研究逐步从仪器改进转入了对测试数据的规律总结。通过研究得到了冻土导热系数随一

些因素的变化规律,并逐步用于实践。目前的冻土导热系数计算方法有经验模型法、理论模型法。

### 2.1 经验模型法

利用冻土导热系数实测数据进行统计分析,并进行拟合,可建立基于含水率、干密度等参数的冻土

导热系数模型。

2.1.1 线性回归模型

线性回归方法是进行导热系数变化规律总结的重要手段。戚家忠等<sup>[25-26]</sup>对冻土导热系数 $\lambda$ 与温度 $T$ 、含水率 $w$ 、饱和度 $S_r$ 及干密度 $\rho_d$ 之间的关系进行了回归分析,提出了应用于某区域土质的导热系数评价模型。文献<sup>[27]</sup>,<sup>[28]</sup>均记录了高温冻结粉质黏土的导热系数经验公式,如式(1),(2)所示

$$\lambda = (24.25\rho_d - 9.83\rho_d^2 - 15.81)wT + (4.75\rho_d - 2.44)w \tag{1}$$

$$\lambda = (-0.0587T + 1.034)(\rho_d - 0.7) \cdot (1.083 + 0.0706S_r + 0.2481S_r^2) \tag{2}$$

依据式(1),(2)对某饱和冻土的导热系数进行预估,其结果如图1所示。由图1可知,文献<sup>[27]</sup>,<sup>[28]</sup>预估的饱和冻土的导热系数存在明显差异。整体呈现出:随着负温的降低,两者之间的预测误差逐渐减小;随着干密度的增大,两者之间的误差逐渐增大,两者之间的最大相对误差为34%~51%。可见,地域性土质、样本数量等因素影响了导热系数线性回归模型的预测精度,这也表明了基于常规统计方法所建立的冻土导热系数模型的适用范围有限。

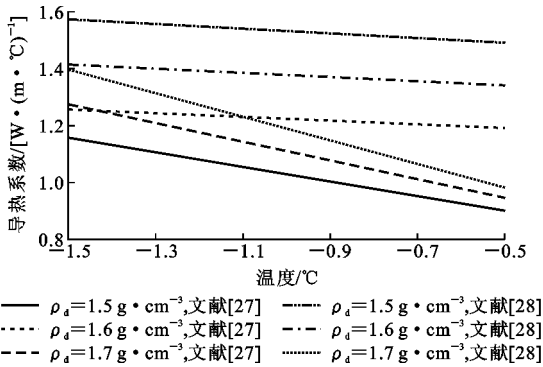


图1 经验法预估的饱和冻土导热系数  
Fig. 1 Thermal Conductivity of Saturated Frozen Soil Estimated by Empirical Methods

2.1.2 神经网络模型

李国玉等<sup>[29]</sup>利用神经网络方法建立了青藏高原高含冰冻土的导热系数预估模型;同时利用回归分析方法对导热系数与干密度、含冰量之间的关系进行了分析。基于线性回归方法和神经网络方法,对青藏高原高含冰冻土的导热系数进行了预测,预测值与实测值对比如图2所示。

由图2可知:在低含冰量阶段,回归模型和神经网络模型均能较好预估导热系数值;在高含冰量阶段,神经网络方法较回归模型能更好地预测冻土导热系数,但其与实测值仍存在约30%的相对误差。

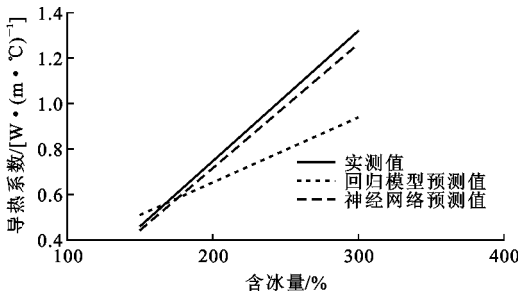


图2 高含冰冻土导热系数  
Fig. 2 Thermal Conductivity of Frozen Soil with High Ice Content

2.1.3 归一化的经验模型

归一化方法建立了特殊问题与一般问题之间的桥梁,考虑到冻土中土矿物骨架对导热系数的初始影响,Johansen<sup>[30]</sup>利用归一化方法对经验模型进行了修正,提出的归一化计算式为

$$\lambda = (\lambda_w' \lambda_s^{1-n'} - \frac{0.137\rho_d + 64.7}{2\,650 - 0.947\rho_d})\lambda_r + \frac{0.137\rho_d + 64.7}{2\,650 - 0.947\rho_d} \tag{3}$$

式中: $\lambda_r$ 为归一化系数; $\lambda_w$ , $\lambda_s$ 分别为土中水和土骨架的导热系数; $n'$ 为土中水占土体总体积的比例。

显然式(3)是基于经验获取的,对特殊问题的预测精度还需进一步验证。原喜忠等<sup>[31]</sup>将干密度、含水率作为主导因子,建立了非饱和(冻)土导热系数预估的归一化模型,如式(4)所示

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry})\lambda_r + \lambda_{dry} \tag{4}$$

式中: $\lambda_{sat}$ , $\lambda_{dry}$ 分别为土体在饱和及干燥状态下的导热系数。

归一化模型解决了因土骨架导热系数不同导致的导热系数无法预估的问题。不妨将图1中的预测数据进行归一化处理,以文献<sup>[27]</sup>,<sup>[28]</sup>的 $\lambda_{sat}$ , $\lambda_{dry}$ 对预估的冻土导热系数进行修正,得到归一化后的导热系数如图3所示。

由图3可知,归一化后的经验模型修正了土质因素引起的导热系数预估误差,提升了冻土导热系数的预测精度,两者之间的最大相对误差由34%~51%缩小为5%~5.75%。2类方法预估的导热系数仍有一定误差,表明经验法所依据的导热系数数据可能存在样本数据失真、样本不全等问题。采用线性回归分析难以预估土体非线性冻结引起的导热系数变化。

2.2 理论模型法

基于冻土的各相组成,一些学者建立了若干冻土导热系数的理论模型。该类模型为热传导解析问

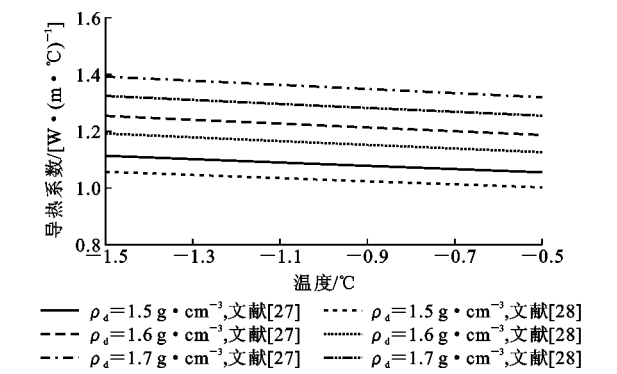


图 3 归一化后的饱和冻土导热系数

Fig. 3 Normalized Thermal Conductivity of Saturated Frozen Soil

题和模型试验相似问题的研究奠定了基础。

### 2.2.1 热阻模型

文献[32]提出了一种计算冻土导热系数的综合热阻方法,可表示为

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{y_4^2 R} \tag{5}$$

式中: $R$  为包含冻土中各相的综合热阻,可通过各相含量计算得到; $\lambda_1$  为土颗粒的导热系数; $y_4$  为孔隙率的确定函数。

De Vries<sup>[33]</sup> 在 Maxwell 方程的基础上提出了土体导热系数计算模型,Farouki<sup>[34]</sup> 发展了 De Vries 模型,形成了可用于冻土的导热系数 Farouki-De Vries 模型,即

$$\lambda = \frac{p_w \lambda_w + k_i p_i \lambda_i + k_a p_a (\lambda_a + \lambda_v) + k_s p_s \lambda_s}{p_w + k_i p_i + k_a p_a + k_s p_s} \tag{6}$$

式中: $p_s, p_w, p_i, p_a$  分别为土矿物、未冻水、冰体和气体的体积占冻土总体积的比重; $\lambda_i, \lambda_a, \lambda_v$  分别为冰、气体和蒸汽的导热系数; $k_i, k_a, k_s$  分别为冰体、气体和土矿物的加权因子。

$k_i, k_a, k_s$  可依式(7)计算,具体为

$$k_n = \frac{2}{3} [1 + (\frac{\lambda_n}{\lambda_0} - 1) g_a]^{-1} + \frac{1}{3} [1 + (\frac{\lambda_n}{\lambda_0} - 1) (1 - 2g_a)]^{-1} \tag{7}$$

式中: $g_a$  为土颗粒的形状因子; $\lambda_0$  为土中连续介质的导热系数; $k_n, \lambda_n$  分别为  $n$  种组分的加权因子和导热系数。

Tian 等<sup>[35]</sup> 基于热脉冲法测试特点提出了简化的 De Vries 模型,具体为

$$\lambda = \frac{p_w \lambda_w + k_i p_i \lambda_i + k_a p_a \lambda_a + k_s p_s \lambda_s}{p_w + k_i p_i + k_a p_a + k_s p_s} \tag{8}$$

研究表明,不同地域及成因的土体矿物导热性能差别较大<sup>[4]</sup>,表 3 列举了部分土体组成矿物的导

表 3 土体组成矿物的导热系数			
Tab. 3 Thermal Conductivity of Soil Composition Mineral			
土体组成矿物	常规矿物	干苔藓	干泥炭
导热系数/ [W/(m·°C) <sup>-1</sup> ]	1.256~7.536	0.070~0.080	0.050~0.060

热系数。不同矿物含量的土体骨架导热性能不同,这也决定了冻土导热系数的变化区间。依据式(8)对不同土体矿物取值情况下的冻土导热系数进行预测,结果如图 4 所示。

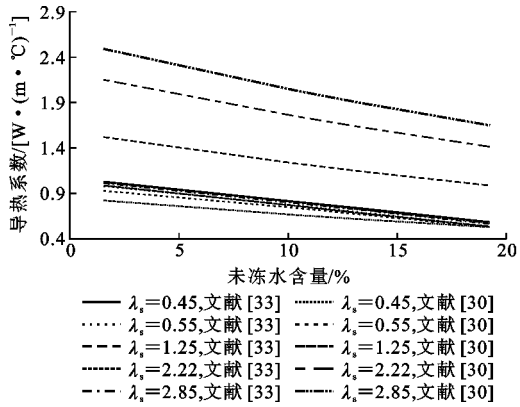


图 4 土体矿物对冻土导热系数影响

Fig. 4 Effect of Soil Minerals on Thermal Conductivity of Frozen Soil

### 2.2.2 几何平均法模型

Johansen<sup>[30]</sup> 首次提出了土体导热系数的几何平均模型,而后相关学者对其适用性和应用条件进行了研究并指出:当土中各相的导热系数差别在一个数量级别以内时,可应用几何平均法对导热系数进行预估<sup>[36]</sup>。徐数祖等<sup>[4]</sup> 在相关研究中应用了几何平均法对冻土导热系数进行了预测,并给出了计算式

$$\lambda = \lambda_s^{p_s} \lambda_w^{p_w} \lambda_i^{p_i} \lambda_a^{p_a} \tag{9}$$

同样,依据式(9)列举了土体矿物导热系数取值对饱和和冻土导热系数的影响,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,式(8)预测的冻土导热系数随未冻水含量的变化趋势一致,但冻土导热系数与土体矿物导热系数关联度不大,这与实际情况存在一定差别<sup>[1-2]</sup>。式(9)的预测结果表明,矿物组成极大程度上影响了冻土导热系数的取值范围,冻结温度及其未冻水含量影响了导热系数变化趋势;当  $\lambda_s$  相差 0.1 时,冻土的导热系数相对误差在 11.7%~13.1% 之间,且随着  $\lambda_s$  与  $\lambda_w$  取值差别的扩大而急剧扩大。考虑土体矿物组成前提下,对土体冻结发展及导热系数随负温的变化趋势进行有效归纳,得出能够反映冻土导热系数随负温变化的一般关系,

这对于指导实践具有重要意义。

2.2.3 介质类比模型

将冻土的土、水、冰、气四相组成转化为 4 种材料的固定排列形式,依据热电(热阻)比拟方法,建立冻土导热系数类比模型。Zhu<sup>[37]</sup>将 Wiener<sup>[38]</sup>的最大最小导热系数理论引入了冻土导热系数计算领域,总结出串联、并联这 2 类较常用的类比模型,如图 5 所示。将冻土中各相按照并联[图 5(a)]或串联[图 5(b)]的形式进行冻土导热系数的预估。给出串联、并联导热系数预估公式<sup>[37]</sup>。

串联时

$$\lambda = (\sum \frac{p_j}{\lambda_j})^{-1} \tag{10}$$

并联时

$$\lambda = \sum p_j \lambda_j \tag{11}$$

式中: $p_j$  为第  $j$  相体积分数; $\lambda_j$  为第  $j$  相导热系数。

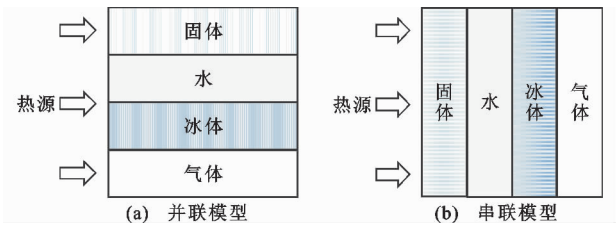


图 5 介质类比模型  
Fig. 5 Media Analogy Models

夏锦红等<sup>[39]</sup>考虑冻土热流传递过程中并联与串联同时进行的耦合特性,将未冻水体积含量按照土和冰体积比例分配给土颗粒和冰体,依据热量平衡原理,建立了考虑固-液界面的导热系数计算模型(图 6,  $V_s, V_w, V_i$  分别为冻土中土颗粒、未冻水和冰体的体积),并给出考虑固-液界面一次传递情况下的导热系数计算式,即

$$\lambda = p_s (\lambda_s + \lambda_w) (0.25 + 0.75 \frac{\lambda_w}{\lambda_s}) + V_s \lambda_s - p_s \lambda_w + p_i (\lambda_i + \lambda_w) (0.25 + 0.75 \frac{\lambda_w}{\lambda_i}) + V_i \lambda_i - p_i \lambda_w \tag{12}$$

由此可见,图 6 所示的模型考虑了复合介质热传导过程中的方向性,赋予了冻土各相明确的物理意义。

2.2.4 仿真分析模型

随着数值仿真分析软件和土体微结构观测手段的应用,谭贤君等<sup>[40]</sup>考虑冻土各相的随机分布,提出应用计算机软件对冻土导热系数进行预估的方法。建立含  $d^N$  ( $d$  为每边切割份数,  $N$  为空间维数) 个立方体的土体模型,如图 7 所示。

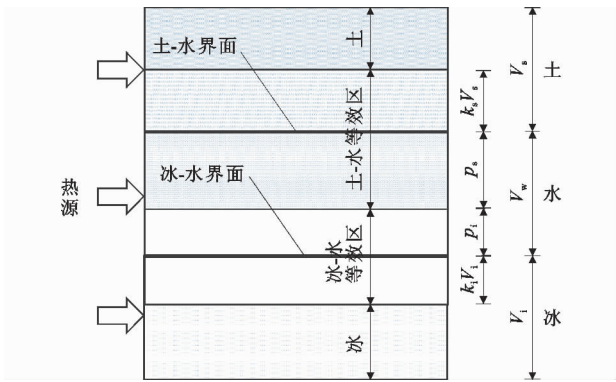


图 6 考虑固-液界面的计算模型

Fig. 6 Computation Model Considering Interface of Solid-liquid

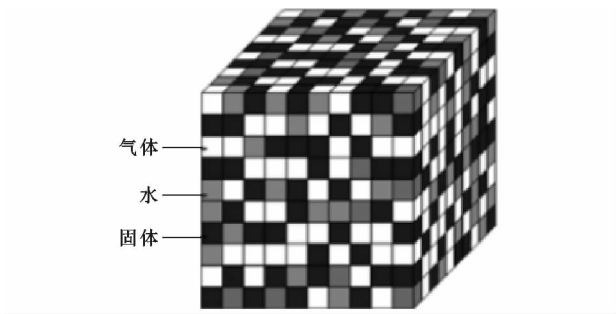


图 7 导热系数计算模型

Fig. 7 Thermal Conductivity Calculation Model

图 7 中通过赋予土中各相的导热系数及其随机分布情况,获取冻土模型的温度场计算云图。结合式(13)可计算冻土在某方向的导热系数<sup>[40]</sup>。

$$\lambda = \frac{Ql}{T_1 - T_0} \tag{13}$$

式中: $Q$  为总热流; $l$  为土样长度; $T_1, T_0$  分别为模型热传导两侧在同时刻的温度。

结合图 7 模型的试验结果,给出了冻土导热系数预测平均相对误差为 2.3%<sup>[40]</sup>。

3 土中固体矿物的导热系数

冻土的导热系数预测均需依据其各相的导热系数进行计算<sup>[30,35,38-39]</sup>,水、冰和气体是连续性介质,其导热系数可依据物理化学方法测试获取<sup>[41]</sup>。常规的土中固体矿物是以骨架形式存在且带有一定结构的固体,松散和孔隙特性导致其不能形成连续体<sup>[42-43]</sup>。因此,依据常规方法测定的土体矿物的导热系数实际上为土骨架的导热系数,即含有结构性且被杂质(气体或水)填充的混合物导热系数<sup>[44-45]</sup>。展现出来的重要问题是,该用何种状态下土中固体矿物的导热系数预测土体的导热系数。

冻土广义上是由固体颗粒、未冻水、冰和气组成



的多相体<sup>[3]</sup>,固体颗粒是由多种矿物质、有机质等构成的复合体<sup>[46]</sup>,如图 8 所示。在微观上,冻土中固相颗粒的种类繁多、结构排列形式复杂,欲研究宏观冻土的导热系数,还需认知冻土中固相颗粒的导热系数。

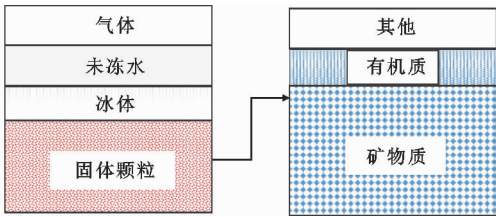


图 8 冻土的组成

Fig. 8 Composition of Frozen Soil

部分学者将土中固体矿物的导热系数称为干土的导热系数。该理解存在一定的不足:土中孔隙全部由气体填充时就是干土<sup>[46]</sup>,干土导热系数是不含水情况下土颗粒的导热系数,并非无孔隙情况下物质的导热系数。不同堆积形态下的干土导热系数必然不同,应用何种干密度下干土的导热系数值进行冻土导热系数的预测?既然应用的水、冰、气的导热系数均为连续状态下情形,是否也应用该种状态下的土中固体矿物的导热系数?

为便于认知并与干土导热系数相区分,本文将土中固体矿物的导热系数解释为土中固相物质在无孔隙状态下的导热系数。目前,土中固体矿物导热系数确定方法主要是矿物分析法和数据推演法。

3.1 矿物分析法

Johansen<sup>[30]</sup>将土中矿物成分广义划分为石英和其他矿物 2 类,进而提出了土体矿物导热系数的计算方法;谈志云等<sup>[47]</sup>依据矿物组成,按照比例加权计算的方法得到土体矿物的导热系数。

将土体烘干碾碎,随后采用矿物分析设备确定土中矿物的组成和含量,采用理想模型确定土体矿物的导热系数,参考式(10),(11)<sup>[34-35]</sup>。该公式确定的导热系数为土中不同种类矿物在理想排列下的导热系数,并非其实际值。应用矿物分析设备,基于 Wiener 法确定土中固体矿物的导热系数,而后将之应用于 Johansen 模型来预测冻土导热系数,其前后的矛盾不能解决。土中固体矿物包括有机矿物、无机的原生和次生矿物、有机质等,其组成复杂、地域性鲜明<sup>[48]</sup>,通过测定土中矿物元素含量间接进行矿物分析很难反映土体的微观构成。

3.2 数据推演法

通过将土的干密度或含水率与土体导热系数的

曲线进行正向延长或者反向延长<sup>[31]</sup>,可推演出无孔隙或无液态水填充下的土体导热系数,即为土体矿物的导热系数。土体导热系数随干密度或含水率的变化曲线是强非线性的,即依据不同干密度或者含水率推演的同一土体导热系数并不满足彼此对应。

通过拟合饱和土体的干密度与导热系数之间的关系,将导热系数随干密度变化曲线向右延伸,可以预估无孔隙下土体的导热系数,即为土中固相物质的导热系数,如图 9 所示。将导热系数随含水率变化曲线向左延伸,当饱和土体的含水率为 0% 时,对应的土体导热系数即为土中固相物质的导热系数,如图 10 所示。

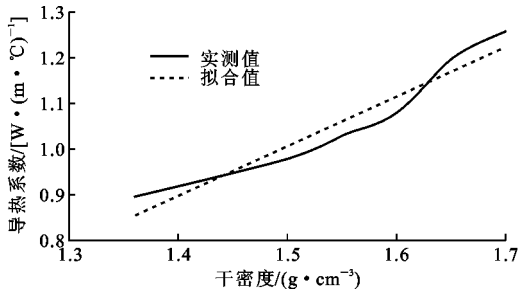


图 9 导热系数随干密度变化曲线向右延伸

Fig. 9 Thermal Conductivity Changing Curve to Right with Change of Dry Density

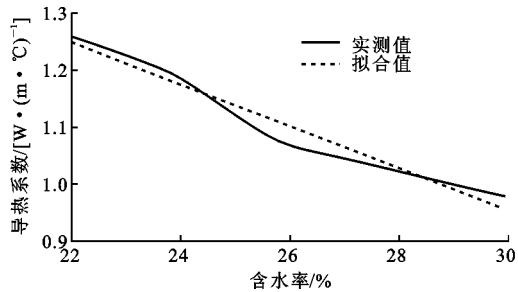


图 10 导热系数随含水率变化曲线向左延伸

Fig. 10 Thermal Conductivity Change Curve to Left Elongation with Water Content

由图 9,10 拟合结果可知,实测同一粉质黏土导热系数,分别依据导热系数随干密度变化曲线向右延伸、导热系数随含水率变化曲线向左延伸的方法,获取土中固体矿物的导热系数分别为 1.73,2.06  $W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$ ,二者并不相等且存在 19% 的相对误差。

由此可见,矿物分析法和数据推演法在预测土中固相物质的导热系数方面存在不足。建立在土中固相物质导热系数基础之上的冻土导热系数理论模型还需进一步完善。

4 冻土导热系数影响因素研究

自温度场计算理论和导热系数(热导率)概念诞生以来,围绕冻土工程温度场预测问题,先后报道了一系列冻土导热系数研究成果。

4.1 导热系数随负温的变化

早期的冻土导热系数主要是以冻土、融土分别进行导热系数的测试,如 Penner 等<sup>[49]</sup>以正负温的形式对石炭土的导热系数进行了实测。有学者对导热系数随负温的变化关系进行了试验研究<sup>[6]</sup>,如图 11 所示。

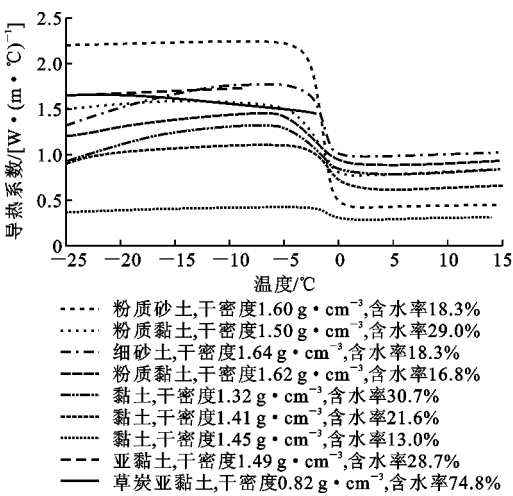


图 11 冻土导热系数与负温关系

Fig. 11 Relationship Between Thermal Conductivity and Negative Temperature of Frozen Soil

由图 11 可知,导热系数在高温冻土阶段的变化较为迅速,随着负温的降低其变化趋势趋缓。砂土的导热系数随温度的变化较黏土敏感,含水率是影响冻土导热系数变化率的重要因素。图 11 中草炭亚黏土的含水率较大,但其导热系数随负温的变化较为平缓,验证了土体结构性是影响材料导热性能的重要因素。正温阶段的土体导热系数变化较为平缓,表明土中各相组成及含量同样是影响冻土导热系数变化的重要因素。

4.2 导热系数随干密度、含水率的变化

在考虑冻土导热系数随负温变化的前提下,已有若干反映土体构成与导热系数之间关系的研究成果。干密度和含水率是评估土体构成的基本参数,干密度决定了土体中矿物骨架的含量,含水率间接表明了土中孔隙被液态水填充的程度。依据文献[4]整理的 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻土导热系数与含水率及干密度之间的关系如图 12 所示。

由图 12 可知,冻土导热系数随着干密度或含水

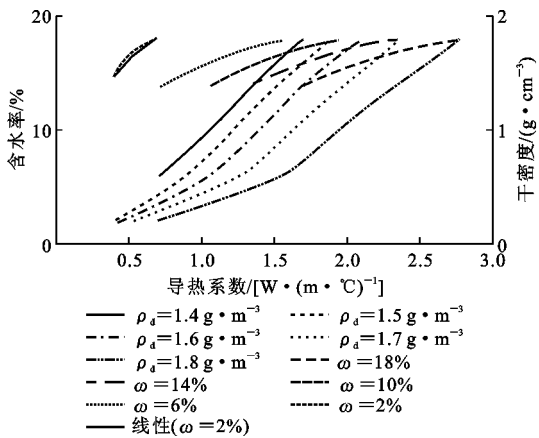


图 12 冻土导热系数与干密度及含水率的关系

Fig. 12 Relationship Between Thermal Conductivity and Dry Density and Water Content of Frozen Soil

率的增大而增大。冰的导热系数约为水的 4 倍,因此,干密度相同的土样随着含水率的增大,土体冻实后的导热系数终值也较大,但并不意味着其导热系数增长速率大。这与报道的不同土质冻结温度试验结果是吻合的<sup>[50]</sup>,即不同土质土体的冻结发展速率不同。

4.3 含盐量与冻土导热系数的关系

构成土体骨架的原生矿物和次生矿物中富含一些固体盐离子,另外土中水富含的一些盐离子使得土中存在一定含盐量。土中水的盐分使得土体冻结温度显著降低<sup>[51]</sup>,纯净水对含盐土样的干湿循环具有一定的洗盐作用<sup>[4,50]</sup>。因此,初始含盐量及干湿循环对冻土导热系数具有重要影响。图 13 给出了干密度和含水率相同的冻土导热系数与含盐量  $s$  之间的关系<sup>[50,52]</sup>。

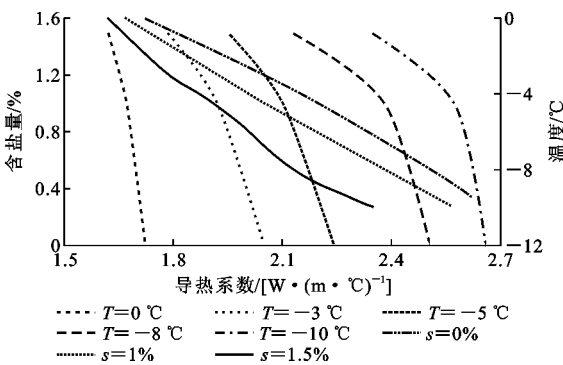


图 13 冻土导热系数与含盐量关系

Fig. 13 Relationship Between Thermal Conductivity and Salt Content of Frozen Soil

由图 13 可知,同一负温冻土的导热系数随着含盐量的增大而降低,含盐冻土仍具备随冻结温度降低而导热系数呈上升趋势的一般特性。



4.4 结构性对冻土导热系数的影响

结构性表示土体各部分之间的排列分布特征,是评价原状土与重塑土的重要指标。在土体内外宏观微观力的作用下,颗粒排布结构会有一定程度的变化<sup>[53]</sup>,进而改变土体的导热系数。结构性对冻土导热系数的影响体现在 2 个方面:①改变土颗粒之间的接触面积,从而改变基质之间的传导性能;②使得土中水重分布,依据水相变成冰相对位置的变化改变土体热传导性能。图 14 示意了原状土颗粒周围团聚有胶体对冻土导热系数的影响。

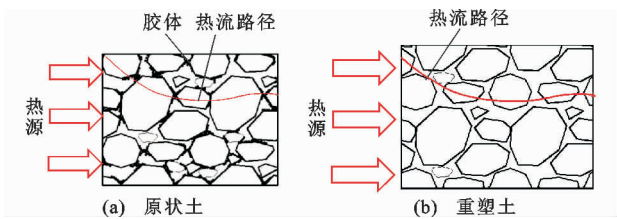


图 14 土体组成结构

Fig. 14 Soil Composition Structure

一般情况下,原状土的土颗粒周围团聚有一定的胶体矿物(接触),胶体矿物降低了基质之间的接触热阻,重塑造成胶体流失。因此,原状土的基质传导性能优于重塑土,土体结构变化会使得土体导热系数降低 10%~30%<sup>[6]</sup>。受土中水相变的影响,土体整体的导热系数变化速率因土质而异。图 15 给出的结构性原状土与重塑土导热系数差异<sup>[27]</sup>进一步验证了土体结构性对冻土导热系数具有一定影响。因此,在预测冻土导热系数的过程中,原状土与重塑土之间的结构性差异如土颗粒的咬合、接触等性质应予以考虑。

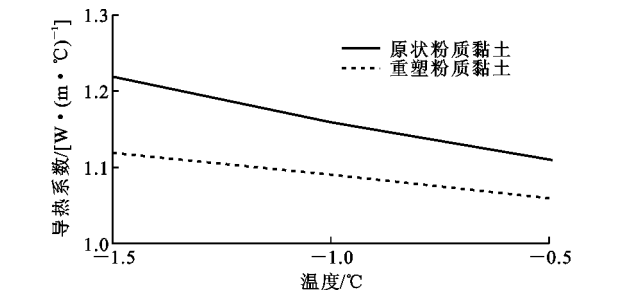


图 15 原状和重塑冻土导热系数

Fig. 15 Thermal Conductivity of Undisturbed Soil and Remolded Frozen Soil

4.5 土体类型对冻土导热系数的影响

依据土颗粒的粒径、含量和液塑限等基本物理指标,可将土体分为黏土、粉土、砂土等类型<sup>[48]</sup>。土体类型对冻土热传导过程的影响主要体现在不同类型土体中固相颗粒导热系数和比热容的差异上。

测试大块体材料粉碎前后的导热系数可以发现,粉碎后材料的导热性能发生了显著改变<sup>[19]</sup>。这种导热性能的改变可归咎于块体材料破碎前后接触界面量的变化<sup>[39]</sup>;由块体原本的不同单元之间的连续接触变成了小块体之间点、面的接触形式,部分原本封闭的接触单元也为孔隙所填充。

土体类型对导热系数的影响也体现在固相颗粒接触界面量的变化上,但相较于块体材料的物理破碎,土体类型对导热系数的影响要复杂得多。砂粒、粉粒、黏粒具有不同的比表面积,其吸附水分子的能力和毛细作用强度也不相同<sup>[46,48]</sup>。这种持水能力的强弱进一步影响了不同类型土体在冻结状态下导热系数的演变速率。

温度、干密度、含水量一致的不同土体呈现不同的冻结规律<sup>[54]</sup>。同一类型的土体在不同温度、干密度、含水率状态下的冻结状态也有一定差别,受冻结状态所影响的土体导热系数与土体类型和土体温度、干密度等因素密切相关<sup>[55]</sup>。考虑土体冻结的基本条件,冻土一般出现在一定含水量下的负温环境中,常见的冻土土体类型有黏土、亚黏土、粉土、粉质黏土、砂土等。图 16 给出了相同孔隙率、不同土质的土体导热系数变化关系<sup>[45]</sup>。从整体上看,在相同干密度下,3 种类型土的导热系数由大到小依次为砂土、粉土、粉质黏土,即导热系数随土样粒径的增大而变大<sup>[22,45]</sup>。

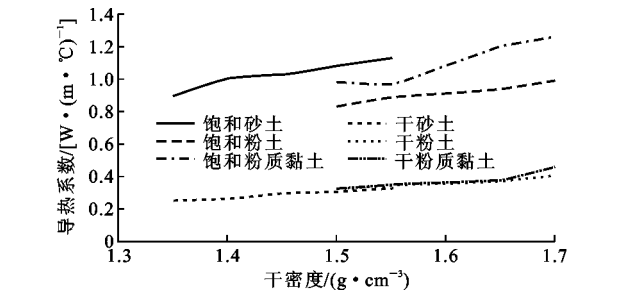


图 16 不同类型土体的导热系数

Fig. 16 Thermal Conductivity of Different Types of Soil

4.6 导热系数影响因素的敏感性分析

冻土导热系数与负温、含水率、干密度和含盐量等因素相关。在多种因素的联合作用下,不同因素变化对导热系数的敏感性影响不同。为评估因素变化对冻土导热系数的影响,定义单位区间内某因素与导热系数关系曲线的斜率  $k$  为敏感系数,构造公式如下

$$k = \left| \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_i}{F_{i+1} - F_i} \right| \quad (14)$$

式中:  $F_i$  为第  $i$  因素取值;  $\lambda_i$  为  $F_i$  因素下土体的导

热系数。

依据式(14)将图 11 中导热系数随负温的变化关系进行整理,得到负温对导热系数的敏感系数。同样,将图 12,13 的结果进行整理,结果见表 4。

表 4 因素变化对导热系数的敏感性  
Tab. 4 Sensitivity of Factor Changes to Thermal Conductivity

因素	$k_{\max}$	$k_{\min}$	$k_{\text{avg}}$
温度/℃	0.267	0.002	0.012
干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.992	0.208	1.670
含水率/%	0.143	0.083	0.099
含盐量/%	0.320	0.108	0.169

注: $k_{\max}$ , $k_{\min}$ , $k_{\text{avg}}$ 分别为敏感系数最大值、最小值和平均值,其中 $k_{\text{avg}}$ 按照各因素所有区间的 $k$ 取值进行计算。

由表 4 可知,各因素变化对导热系数的敏感性影响由大到小依次为干密度、含盐量、含水率、温度。按照 $k_{\max}$ 的计算值可发现,各因素敏感系数由大到小依次为干密度、含盐量、温度、含水率。因而,在进行具体的冻土导热系数研究中应考虑研究区间对研究因素的影响。

## 5 测温法确定冻土导热系数的讨论

天然冻土温度分布差异的原因除了与地面辐射平衡各分量相关,还与物质的输热能力有关<sup>[4,56]</sup>。描述冻土热传导物理现象的热参数有导热系数、比热容和相变潜热,如式(15)所示

$$c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\text{div}[\lambda(T)\text{grad}(T)]+q_v\quad(15)$$

式中: $c(T)$ , $\lambda(T)$ 分别为土体的比热容和导热系数函数; $\rho$ 为土体密度; $t$ 为冻结时间; $q_v$ 为土体内冷(热)源热流强度; $\text{grad}$ 表示梯度; $\text{div}$ 表示散度。

对于不存在相变的热传导现象可不考虑潜热的影响,甚至可将线性相变材料的潜热叠加至比热容进行温度场的预测<sup>[57]</sup>。土体潜热是由未冻水凝结成冰释放的热量,脱离未冻水含量的变化,则冻土中是不存在潜热的<sup>[58]</sup>。也就是说,潜热只存在于 2 个温度之间的区域,对于某温度点的潜热不具有理论意义,这与真比热容的温度点概念显著不同。受冻结过程中热参数的非线性变化和第 3 类、第 4 类边界条件的影响,冻土热传导是强非线性的问题<sup>[55,59]</sup>。在温度场预测特别是解析解问题的研究过程中,将非线性变化的潜热线性化叠加进比热容是值得探讨的。因此,热参数测试过程中应理清潜热与导热系数、比热容之间的关系。

现有的冻土导热系数多是以试样在一定热源下

的温度变化(温差)为计算依据的<sup>[17]</sup>。在导热系数试验过程中,在外热源作用下土样整体实现了升温。冻土升温的过程中有:①土颗粒、冰体、未冻水和气体的整体升温;②部分冰体融化<sup>[60]</sup>。由于冻土中土颗粒、冰、未冻水和气的比热容不同<sup>[4]</sup>,升高至同一温度过程中存在:①外热源与冻土中各相的热传导;②冻土中各相间的热传导。 $\text{H}_2\text{O}$ (水或冰)是晶体材料,其在相变过程中吸收热量而温度不产生变化。因此,导热系数试验中外热源施加给土样的热量并不全部反映在冻土温度的增加上,还有一部分热量被冰的融化所吸收<sup>[56]</sup>。这也是冻土温度场计算中需要考虑相变潜热的原因<sup>[57-58]</sup>。

在对冻土土样加热升温的过程中,受土中冰体融化吸收潜热影响,同等加热功率情况下,测定的土样温度小于真实的理论温度,如图 17 所示( $t_1$ , $t_2$  为加热过程开始与结束时间, $T_1$ , $T_2$  分别为时间  $t_1$  和  $t_2$  所对应的温度),试样吸收热量引起的温度增量并不线性。因此,采用测温法确定的冻土导热系数实际未排除冰体融化吸收潜热的影响<sup>[35,60]</sup>。

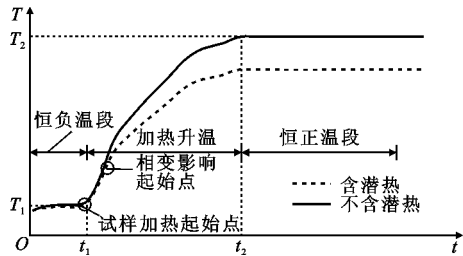


图 17 基于测温法的热参数测试  
Fig. 17 Thermal Parameter Test Based on Temperature Measurement Method

混合量热过程中冻土比热容测试也存在此类问题<sup>[60]</sup>。导热系数、比热容和潜热是计算带相变材料温度场的基本参数<sup>[8,61]</sup>,若不能将该潜热影响的热量从热参数测试中剥离,则基于导热系数、比热容和潜热的冻土温度场计算中考虑多重潜热影响,不仅影响计算结果,且混淆了热参数的物理意义。

冻土潜热出现的实质是土中未冻水含量的变化,以探针法为例,对冻土导热系数的一种修正方法进行说明。探针法测定导热系数的计算式为<sup>[13]</sup>

$$\lambda=\frac{IU\ln(t_2/t_1)}{4\pi l(T_2-T_1)}\quad(16)$$

式中: $I$ 为电流; $U$ 为输出电压。

在式(16)中,认为电流 $I$ 和输出电压 $U$ 施加给长度为 $l$ 土样的热量全部用于土样由 $T_1$ 升至 $T_2$ 。结合前文可知,该部分热量还有一部分用于土中冰体的相变。基于此,对含相变材料的线热源导热系

数计算方法进行推导。由于同一温度下,同一冻土的导热系数和比热容具有惟一值<sup>[4,58]</sup>。因此,将土中冰体融化吸收的热量以温度的形式加至土体的温度增量上,式(16)可转化为

$$\lambda = \frac{IU}{4\pi l T_2 - T_1 + L\rho_d(w_0 - w_u)/(\rho c)} \quad (17)$$

式中: $L$ 为冰体融化吸收的潜热值; $w_0, w_u$ 分别为土样的初始含水量和负温土样的未冻水含量。

需要说明的是,冻土比热容随土中各相含量的变化而变化,其测试值也应考虑潜热的影响,该研究成果可参考文献[60]。式(17)中的比热容应采用积分手段取值<sup>[62]</sup>。

## 6 研究建议和展望

### 6.1 冻土导热系数测试

目前的冻土导热系数测试方法主要集中于稳态法和瞬态法,不同测试方法的适用范围及测试精度均存在不同。稳态法加热时间长,土中冰体融化潜热对测试影响大;瞬态法加热时间短,但数据误差大<sup>[21,35]</sup>。通过规范提供的数据对导热系数测试数据进行筛选,采取数学统计方法对实测的大宗量测试数据进行筛选和辨识<sup>[63]</sup>,可显著提升冻土导热系数的测试精度。

依据测温法确定的冻土导热系数存在明显不足,充分考虑热量和温度之间的差别,研究考虑热融造成冰体融化吸收潜热对冻土导热系数测试误差的影响,修正相应的导热系数测试成果,对于冻土热传导过程的科学描述和解析解问题及相似准则问题的研究具有重要意义。

### 6.2 冻土导热系数计算模型

目前的导热系数模型主要有经验模型和理论模型。在应用经验模型预估土体导热系数时,应基于土体矿物组成进行归一化处理,即考虑土体基质(土体固相矿物)对冻土的影响<sup>[1-2,64]</sup>。导热系数研究的目的是对冻土温度场进行预估,导热系数模型的预测精度也应由温度场来验证。基于未冻水含量或者温度、干密度等基本参数进行冻土导热系数预估,而后与实测值进行比较,验证模型的适用性尚值得商榷。不同土质和实测过程中的误差都使得导热系数测试存在不足,统筹研究冻土导热系数、比热容等热参数并从温度场角度评估导热系数测试精度是可行的<sup>[7]</sup>。理论模型难以独立反映冻土导热系数的演变规律,需要基于未冻水、各相导热系数等参数进行预测,但理论模型对于热传导过程和解析解问题的研

究具有重要作用。依据冻土未冻水随负温的演变规律模型,建立导热系数随负温变化的理论模型对于综合考虑热参数对温度场的贡献具有重要作用。

### 6.3 土中固相物质导热系数

土体固相颗粒的导热系数是进行冻土导热系数预估的基础,目前的土体固相导热系数确定方法不一,不同干密度下同一土样固相矿物的导热系数测定稳定性较差。基于导热系数随干密度变化曲线向右延伸或导热系数随含水率变化曲线向左延伸的方法确定土中固相物质(土矿物)的导热系数存在较大不足。基于矿物分析手段确定的土中固相物质导热系数仅是一种理想状态。考虑土-水界面的接触,从复合介质的角度推导出适用于土中固相物质导热系数的确定方法,对于冻土导热系数的确定和基于土体基质的归一化方法实践具有基础作用。

### 6.4 冻土导热系数对温度场影响

与常温土体的导热系数不同,冻土导热系数与不同负温和冻结时刻密切相关。既有研究采用正负温分段取定值热参数的方法确定温度场无法反映土体的冻结过程<sup>[58]</sup>。采用一定负温阶段的平均热参数作为定值热参数进行温度场预测也难以反映冻结过程中温度场的非线性。因此,应考虑导热系数随不同负温非线性变化对冻土温度场的影响。导热系数是与方向相关的标量,从微观角度出发,考虑土体之间的接触、咬合、土体吸力等特性,建立能够反映土体冻结速率的导热系数模型应是冻土导热系数研究区别于常规土体的重要方向。另外,冻土导热系数测试中,应考虑原状土与重塑土存在的结构性差异<sup>[64]</sup>,即冻土导热系数的结构性和各向异性应受到重视。

## 7 结 语

(1)从冻土导热系数测试技术出发,探讨了冻土与常规土体在导热系数测试中存在的区别。对用于冻土导热系数测试的方法进行了综述,对其应用范围、使用特点、基本原理进行了简要介绍。对存在的若干冻土导热系数经验模型和计算模型进行了重点阐述,结合实例分析了各计算模型及其应用性。对目前的冻土导热系数研究成果进行了分析,从影响冻土导热系数的温度、干密度、含水率等因素出发,分析了导热系数随相关因素的变化趋势和敏感性。

(2)探讨了基于测温法的冻土热参数测试方法存在的不足,依据土样加热升温过程中未冻水含量的变化,结合能量与温度之间的平衡关系,提出了一

种修正冻土导热系数测试结果的方法。在此基础上,从导热系数测试技术、预测模型、土中固相物质导热系数预测和计算、冻土导热系数与温度场研究等方面,提出了对冻土导热系数研究的建议和展望。

## 参考文献:

## References:

- [1] 张楠,夏胜全,侯新宇,等. 土热传导系数及模型的研究现状和展望[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1550-1562.  
ZHANG Nan, XIA Sheng-quan, HOU Xin-yu, et al. Review on Soil Thermal Conductivity and Prediction Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1550-1562.
- [2] 许模,王迪,蒋良文,等. 岩土体导热系数研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 421-427, 433.  
XU Mo, WANG Di, JIANG Liang-wen, et al. Review on Thermal Conductivity Coefficient of Rock and Soil Mass[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 421-427, 433.
- [3] 马巍,王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
MA Wei, WANG Da-yan. Frozen Soil Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [4] 徐数祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
XU Xiao-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of Frozen Soil[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [5] RANKINEN K, KARVONEN T, BUTTERFIELD D. A Simple Model for Predicting Soil Temperature in Snow-covered and Seasonally Frozen Soil: Model Description and Testing[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(4): 706-716.
- [6] 叶尔绍夫. 冻土学原理(第二册)[M]. 刘经仁,译. 兰州: 兰州大学出版社, 2015.  
Yershov. Principles of Geocryology (Second Volume) [M]. Translated by LIU Jing-ren. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2015.
- [7] 陈之祥,李顺群,夏锦红,等. 基于未冻水含量的冻土热参数计算分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(增2): 67-74.  
CHEN Zhi-xiang, LI Shun-qun, XIA Jin-hong, et al. Calculation of Frozen Soil Thermal Parameters Considering Unfrozen Water Content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2): 67-74.
- [8] 王凯,李顺群,陈之祥,等. 正冻黏土瞬态温度场计算方法改进与试验验证[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2017, 34(2): 157-164.  
WANG Kai, LI Shun-qun, CHEN Zhi-xiang, et al. Improvement and Experimental Verification of Transient Temperature Field Calculation for Freezing Clay[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2017, 34(2): 157-164.
- [9] 张晨,蔡正银,黄英豪,等. 输水渠道冻胀离心模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 109-117.  
ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Centrifuge Modelling of Frost-heave of Canals [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 109-117.
- [10] 陈之祥,李顺群,夏锦红,等. 基于紧密排列土柱模型的冻土热参数计算[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2017, 34(4): 393-399.  
CHEN Zhi-xiang, LI Shun-qun, XIA Jin-hong, et al. Calculation of Thermal Parameters of Frozen Soil Based on the Closely Spaced Soil Column Model[J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2017, 34(4): 393-399.
- [11] FAHRENKAMP-UPPENBRINK J. Geoen지니어ing for Temperature Control[J]. Science, 2017, 357: 263-265.
- [12] 刘希民. 基于电流法的热电阻温度测量装置[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(增): 31-34, 49.  
LIU Xi-min. Thermal-resistor Temperature Measuring Device Based on Current Method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(S): 31-34, 49.
- [13] 周家作,韦昌富,魏厚振,等. 线热源法测量冻土热参数的适用性分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 681-687.  
ZHOU Jia-zuo, WEI Chang-fu, WEI Hou-zhen, et al. Applicability of Line Heat Source Method in Measuring Thermal Parameters of Frozen Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 681-687.
- [14] GUO Q S, LI X, LI M. Test Research on Thermal Conductivities of Silty Clay in Freezing and Thawing Based on Thermal Current Meter Method (TCMM) [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 341-342: 1472-1476.
- [15] FLERCHINGER G N, SAXTON K E. Simultaneous Heat and Water Model of a Freezing Snow-residue-roil System II. Field Verification[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 573-576.
- [16] 刘焕宝,张喜发,赵意民,等. 冻土导热系数热流计法模拟试验及成果分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 681-687.

- 1127-1131.
- LIU Huan-bao, ZHANG Xi-fa, ZHAO Yi-min, et al. Frozen Soil Thermal Conductivity Determined by Using Heat-flow Meter; Simulation Experiment and Result Analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1127-1131.
- [17] 张喜发, 杨风学, 冷毅飞, 等. 冻土试验与冻害调查[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- ZHANG Xi-fa, YANG Feng-xue, LENG Yi-fei, et al. Frozen Soil Test and Freezing Damage Investigation [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [18] NELSON F E, ANISIMOV O A, SHIKLOMANOV N I. Subsidence Risk from Thawing Permafrost[J]. Nature, 2001, 410(6831): 889-890.
- [19] 申向梁. 中俄原油管道多年冻土导热系数测试方法及比较研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- SHEN Xiang-liang. Comparative Study and Experimental Method Research on Thermal Conductivity of Permafrost of China-Russia oil Pipeline[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [20] 陶兆祥, 张景森. 大含水(冰)量融冻土导热系数的测定研究[J]. 冰川冻土, 1983, 5(2): 75-80.
- TAO Zhao-xiang, ZHANG Jing-sen. The Thermal Conductivity of Thawed and Frozen Soils with High Water (Ice) Content [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(2): 75-80.
- [21] 尹飞. 冻土导热系数的仪器研制和稳态法模拟试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- YIN Fei. The Instrumental Development of Thermal Conductivity of Frozen Ground and the Research on the Steady-state Method Simulation Test[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [22] JGJ 118—2011, 冻土地区建筑地基基础设计规范[S].
- JGJ 118—2011, Code for Design of Soil and Foundation of Building in Frozen Soil Region[S].
- [23] JIN H, YU Q, LU L, et al. Degradation of Permafrost in the Xing'anling Mountains, Northeastern China [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, 18(3): 245-258.
- [24] ROZANSKI A, SOBOTKA M. On the Interpretation of the Needle Probe Test Results: Thermal Conductivity Measurement of Clayey Soils [J]. Studia Geotechnica et Mechanica, 2013, 35(1): 195-207.
- [25] 戚家忠, 储党生, 韩彦智, 祁东矿人工冻土物理力学性能试验研究[J]. 淮南工业学院学报, 1999, 19(3): 54-58.
- QI Jia-zhong, CHU Dang-sheng, HAN Yan-zhi. Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Artificial Frozen Soil of Qidong Mine[J]. Journal of Huainan Institute Technology, 1999, 19(3): 54-58.
- [26] 洪涛, 梁四海, 孙禹, 等. 黄河源区多年冻土热传导系数影响因素分析及其在活动层厚度模拟中的应用[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 824-833.
- HONG Tao, LIANG Si-hai, SUN Yu, et al. Analyzing the Factors That Impact on the Heat Conductivity Coefficient and Applying Them to Simulate the Depth of Permafrost Active Layer in the Headwaters of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 824-833.
- [27] 姜雄. 多年冻土区高温冻土导热系数试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- JIANG Xiong. Experimental Study on Thermal Conductivity for Warm Frozen Soils in Permafrost Regions[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [28] 李顺群, 于珊, 张少峰, 等. 砂土、粉土和粉质粘土的导热系数确定方法: 中国, 201510195398. 3[P]. 2015-08-12.
- LI Shun-qun, YU Shan, ZHANG Shao-feng, et al. Determination of Thermal Conductivity of Silt and Silty Clay: China, 201510195398. 3[P]. 2015-08-12.
- [29] 李国玉, 常斌, 李宁. 用人工神经网络建立青藏高原高含冰量冻土的导热系数预测模型[C]//中国土木工程学会. 第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1327-1330.
- LI Guo-yu, CHANG Bin, LI Ning. The Establishment of Thermal Conductivity of the Qinghai-Tibet Plateau Permafrost with High Ice Content Prediction Model Using Artificial Neural Network[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of the Ninth Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 1327-1330.
- [30] JOHANSEN O. Thermal Conductivity of Soils[D]. Trondheim: University of Trondheim, 1975.
- [31] 原喜忠, 李宁, 赵秀云, 等. 非饱和(冻)土导热系数预估模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2689-2694.
- YUAN Xi-zhong, LI Ning, ZHAO Xiu-yun, et al. Study of Thermal Conductivity Model for Unsaturated Unfrozen and Frozen Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2689-2694.
- [32] MALYSHEV A V, TIMOFEEV A M. Considering Temperature Dependence of Thermo-physical Properties of Sandy Soils in Two Scenarios of Oil Pollution

- [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014(4): 302-308.
- [33] DE VRIES D A. Thermal Properties of Soils; Physics of Plant Environment [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Corporation, 1963.
- [34] FAROUKI O T. The Thermal Properties of Soils in Cold Regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 1981, 5(1): 67-75.
- [35] TIAN Z, LU Y, HORTON R, et al. A Simplified De Vries-based Model to Estimate Thermal Conductivity of Unfrozen and Frozen Soil[J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(5): 564-572.
- [36] SASS J H, LACHENBRUCH A H, MUNROE R J. Thermal Conductivity of Rocks from Measurements on Fragments and Its Application to Heat-flow Determinations[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(14): 3391-3401.
- [37] ZHU M. Modeling and Simulation of Frost Heave in Frost-susceptible Soils[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2006.
- [38] WIENER O. Abhandl Math-phys [M]. Leipzig: Klasse, Sachs Akad. Wiss, 1912.
- [39] 夏锦红, 陈之祥, 夏元友, 等. 不同负温条件下冻土导热系数的理论模型和试验验证[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 109-117.
- XIA Jin-hong, CHEN Zhi-xiang, XIA Yuan-you, et al. Theoretical Model and Experimental Verification on Thermal Conductivity of Frozen Soil Under Different Negative Temperature Conditions [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 109-117.
- [40] 谭贤君, 褚以惇, 陈卫忠, 等. 考虑冻融影响的岩土类材料导热系数计算新方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(增 2): 70-74.
- TAN Xian-jun, CHU Yi-dun, CHEN Wei-zhong, et al. A New Method to Study Thermal Conductivity of Geomaterials Considering Phase Change[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 70-74.
- [41] 刘光启, 马连湘, 项曙光. 化学化工物性数据手册: 有机卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- LIU Guang-qi, MA Lian-xiang, XIANG Shu-guang, et al. Handbook of Physical Properties of Chemistry and Chemical Engineering: Organic Volume[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [42] 胡田飞, 刘建坤, 房建宏, 等. 冻融循环下冷却温度对粉质黏土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1757-1767.
- HU Tian-fei, LIU Jian-kun, FANG Jian-hong, et al. Experimental Study on the Effect of Cyclic Freezing-thawing on Mechanical Properties of Silty Clay Under Different Cooling Temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1757-1767.
- [43] 刘松玉, 詹良通, 胡黎明, 等. 环境岩土工程研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 6-30.
- LIU Song-yu, ZHAN Liang-tong, HU Li-ming, et al. Environmental Geotechnics: State-of-the-art of Theory, Testing and Application to Practice[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(3): 6-30.
- [44] 陈卫忠, 龚 哲, 于洪丹, 等. 黏土岩温度-渗流-应力耦合特性试验与本构模型研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1217-1238.
- CHEN Wei-zhong, GONG Zhe, YU Hong-dan, et al. Review of Thermo-hydro-mechanical Coupled Tests and Constitutive Models of Clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1217-1238.
- [45] 于 珊, 李顺群, 冯慧强. 土的导热系数与其干密度、饱和度 and 温度的关系[J]. 天津城建大学学报, 2015, 21(3): 172-176.
- YU Shan, LI Shun-qun, FENG Hui-qiang. Relationship Among Soil's Thermal Conductivity, Dry Density, Saturation and Temperature[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2015, 21(3): 172-176.
- [46] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [47] 谈云志, 喻 波, 胡新江, 等. 非饱和土热导率预估模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 1): 129-133.
- TAN Yun-zhi, YU Bo, HU Xin-jiang, et al. Prediction Model for Thermal Conductivity of Unsaturated Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 129-133.
- [48] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- YIN Zong-ze. Geotechnical Principles [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [49] PENNER E. Thermal Conductivity of Frozen Soils [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1970, 7(3): 982-987.
- [50] 徐敦祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experimental Study on Water Migration in Frozen Soil[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [51] 邴 慧, 马 巍. 盐渍土冻结温度的试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1106-1113.
- BING Hui, MA Wei. Experimental Study on Freezing

- Point of Saline Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1106-1113.
- [52] 汪承维. 人工冻结盐渍土导热系数试验研究及其应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- WANG Cheng-wei. Tests About Coefficient of Thermal Conductivity of Artificial Freezing Saline Soil and Application[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2014.
- [53] 李顺群, 郑刚, 赵瑞斌, 等. 黏土微结构参数的相关分析和主成分分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1120-1126.
- LI Shun-qun, ZHENG Gang, ZHAO Rui-bin, et al. Correlation Analysis and Principal Component Analysis on Microstructure Parameters of Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 1120-1126.
- [54] 王丽霞, 胡庆立, 凌贤长, 等. 青藏铁路冻土未冻水含量与热参数试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1660-1663.
- WANG Li-xia, HU Qing-li, LING Xian-chang, et al. Test Study on Unfrozen Water Content and Thermal Parameters of Qinghai-Tibet Railway Frozen Silty Clay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1660-1663.
- [55] 陈之祥. 冻土导热系数模型和热参数非线性对温度场的影响研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2018.
- CHEN Zhi-xiang. Study on Thermal Conductivity Model and Influence of Thermal Parameters Nonlinearity on Temperature Field of Frozen Soil[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2018.
- [56] ZHANG T, CAI G, LIU S, et al. Investigation on Thermal Characteristics and Prediction Models of Soils[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 106: 1074-1086.
- [57] 胡增辉, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 隧道围岩温度场分布的数值分析及预测[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 867-872.
- HU Zeng-hui, LI Xiao-zhao, ZHAO Xiao-bao, et al. Analysis and Prediction of the Temperature Distribution Around Tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 867-872.
- [58] 陈之祥, 李顺群, 王杏杏, 等. 热参数对冻土温度场的影响及敏感性分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 136-141.
- CHEN Zhi-xiang, LI Shun-qun, WANG Xing-xing, et al. Analysis on Impact and Sensitivity of Thermal Parameters on Frozen Soil Temperature Field[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 136-141.
- [59] LIAO M, LAI Y, WANG C. A Strength Criterion for Frozen Sodium Sulfate Saline Soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(7): 1176-1185.
- [60] 夏锦红, 李顺群, 夏元友, 等. 一种考虑显热和潜热双重效应的冻土比热计算方法[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 973-978.
- XIA Jin-hong, LI Shun-qun, XIA Yuan-you, et al. Specific Heat of Frozen Soil Considering Sensible and Latent Heat of Pore Water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 973-978.
- [61] 李宁, 徐彬, 陈飞熊. 冻土路基温度场、变形场和应力场的耦合分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 1-7.
- LI Ning, XU Bin, CHEN Fei-xiong. Coupling Analysis of Temperature, Deformation and Stress Field for Frozen Soil Roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 1-7.
- [62] 何冠虎, 叶庆和, 邸忠起, 等. 用激光脉冲加热-降温法测量比热(500—1 200 K)[J]. 工程热物理学报, 1981, 2(3): 283-289.
- HE Guan-hu, YE Qing-he, DI Zhong-qi, et al. The Measurement of Specific Heat by Laser Pulse Heating-cooling Method (500-1 200 K)[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1981, 2(3): 283-289.
- [63] 杜宜臻, 李韧, 吴通华, 等. 土壤热导率的研究现状及其进展[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1067-1074.
- DU Yi-zhen, LI Ren, WU Tong-hua, et al. Study of Soil Thermal Conductivity: Research Status and Advances[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 1067-1074.
- [64] 何瑞霞, 金会军, 赵淑萍, 等. 冻土导热系数研究现状及进展[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 116-126.
- HE Rui-xia, JIN Hui-jun, ZHAO Shu-ping, et al. Review of Status and Progress of the Study in Thermal Conductivity of Frozen Soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 116-126.