

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-2689-06

非饱和（冻）土导热系数预估模型研究

原喜忠^{1,2,3}, 李 宁^{1,3}, 赵秀云², 李 婧²

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 长安大学 公路学院 特殊地区道路工程教育部重点实验室, 西安 710064;
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 岩土材料的导热系数是岩土工程温度场分析及建筑热工计算中的重要参数。研究旨在建立一个基于归一化导热系数概念和以土的干燥和饱和状态导热系数为基准的非饱和土导热系数的通用预估模型。通过对文献中 328 组实测数据的分析发现, 将同类土在不同密实度条件下的各种导热系数-含水率曲线簇进行归一化处理后, 可以得到惟一的归一化导热系数 k_r 与饱和度 S_r (归一化含水率) 关系, $1/k_r$ 与 $1/S_r$ 呈相关性较好的线性关系, 而每支 $1/k_r-1/S_r$ 直线均通过坐标 (1, 1) 点的斜率由土质类型决定。据此提出了一个集成土质类型、密实度 (孔隙率) 和含水率 (饱和度) 等因素综合影响的融土和冻土导热系数通用预估模型, 并给出了导热系数预估模型中土质参数的取值范围, 以及融土和冻土处于完全干燥状态和饱和状态的确定方法。对预估模型进行验证结果表明, 所提出的非饱和土导热系数预估模型具有较好准确性。

关 键 词: 热传导; 导热系数; 土; 冻土; 饱和度

中图分类号: TH 122

文献标识码: A

Study of thermal conductivity model for unsaturated unfrozen and frozen soils

YUAN Xi-zhong^{1,2,3}, LI Ning^{1,3}, ZHAO Xiu-yun², LI Jing²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The thermal conductivity of soils is a key parameter in analysis of soil heat transfer in geotechnical engineering. This paper intends to develop a generalized thermal conductivity model for unsaturated unfrozen and frozen soils based on the concept of normalized thermal conductivity with respect to dry and saturated states of soils. 328 groups of experimental results for unfrozen and frozen soils, such as gravels, sands, silts, clays and peat, available from the literature were analyzed to develop the general relationship between the normalized thermal conductivity of soils and the degree of saturation. A unique normalized thermal conductivity and degree of saturation (normalized water content) relationship is obtained for the soils with different porosity and different thermal conductivity and water content relationships. There is a strong linear relationship between the inverse of normalized thermal conductivity ($1/k_r$) and the inverse of degree of saturation ($1/S_r$) with lines passing through the coordinate (1,1). The soil types control the slope of the $1/k_r-1/S_r$ lines. Accordingly, the model integrating the effects of soil types, density (or porosity) and water content (or degree of saturation) on the thermal conductivity of unfrozen and frozen soils is proposed. Method and parameters for calculating the thermal conductivity of dry and unfrozen or frozen saturated soils are given. The model generally predicts the thermal conductivity within an error of 20% for all kinds of (unfrozen and frozen) soils studied.

Key words: heat transfer; thermal conductivity; soil; frozen soil; degree of saturation

1 引 言

岩土材料的导热系数是岩土工程温度场分析及建筑热工计算中的重要参数。在工程建设中, 特别是在寒冷地区建筑和道路工程设计以及其他地区的

地下工程人工地层冻结法施工或者环境岩土工程设计中, 只有掌握岩土材料的导热系数, 才能准确预测路基、地基、边坡及地下工程的温度场, 进而完成冻融稳定性分析以及隔热层设计。然而, 获得准确岩土材料 (特别是处于冻结状态下) 导热系数的

收稿日期: 2009-08-11

基金项目: 国家自然科学基金创新群体资助项目(No. 40821001)。

第一作者简介: 原喜忠, 男, 1965 年生, 副教授, 主要从事道路工程教学与研究工作。E-mail: xizhongyuan@163.com

测量过程较为繁琐。国内相关规范^[1-2]以表格的形式仅列举了草炭粉质黏土、粉土-粉质黏土、碎石粉质黏土和砂砾等 4 种典型土在不同密度及含水率条件下的导热系数, 这些均来源于徐学祖、陶兆祥早期的试验研究成果^[3-4]。典型土的导热系数可以采用对规范数据进行内插或外延方法确定, 而其他类土导热系数的取值则无所依据。北美地区广泛采用 Johansen 于 1975 年提出的诺模图预估各类土在不同密度及饱和度条件下的导热系数^[5], 该方法对国内工程的适用性还有待进一步验证。

2 基础数据

国内有关普通土和冻土导热系数方面研究报道和基础数据较少^[6-9]。本文选取现行规范《冻土工程地质勘察规范》^[1]和《冻土地区建筑地基基础设计规范》^[2]中所采用的 120 组冻土和融土导热系数数据, 该数据均来源于徐学祖和陶兆祥 70 年代的研究成果, 土类为草炭粉质黏土、粉土-粉质黏土、碎石粉质黏土和砂砾 4 种土, 土样分别取自内蒙古满归、青海热水、木里和西藏土门 4 个地点^[3-4]。本文分析的基础数据还包括吴紫汪和陶兆祥于 1980 年代围绕两淮地区(非冻土地区)人工冻结工程进行的冻土和融土导热系数研究所获得的 208 组测试数据, 土质类型包括广泛分布于淮南和淮北地区的高液限黏性土、中液限黏性土、低液限黏性土和砂土及砂砾^[10]。所分析的基础数据参数的范围及来源见表 1。两批数据的试验方法都与《土工试验方法标准》^[11]中的要求基本一致。

3 岩土材料导热系数的影响因素及预估模型参数选取

3.1 密度及含水率对土导热系数的影响

对于给定的岩土材料, 其导热系数通常受干密度和含水率的影响最为强烈, 这是由于土的基本组成成分之间导热系数差别较大引起的。固体颗粒的导热系数通常在 1~5 W/m°C 之间变化, 而水、冰和气体的导热系数分别为 0.6、2.24、0.024 W/m°C。随着干密度的增大, 单位体积土中固体颗粒数量增多, 导热系数会逐渐增大; 干密度相同时, 随着含水率的增大, 导热系数会逐渐增大。

Gangadhara Rao 和 Singh^[12]研究认为, 细粒土和砂土的导热系数与干密度之间可以用幂函数描述, 而导热系数与含水率之间可以用对数函数描述。在本文分析数据所涉及的范围内(表 1), 导热系数与干密度之间基本上为线性关系, 而导热系数

与(重量)含水率之间可以用对数函数描述。

表 1 基础数据的参数范围及来源
Table 1 Soil characters in this study and data source

典型土	干密度 /(kg/m ³)	含水率 /%	数据量 /组	取样地点	数据来源
草炭粉质黏土	400~900	30~130	36	内蒙古满归、 青海热水、木 里和西藏土门	文献 [1~4]
粉土-粉质黏土	1 200~1 600	5~35	35		
碎石粉质黏土	1 200~1 800	3~17	24		
砂砾	1 400~1 800	2~18	25		
高液限黏性土	1 200~1 800	15~60	56	淮南和淮 北地区	文献[10]
中液限黏性土	1 200~1 800	10~50	52		
低液限黏性土	1 300~1 800	10~40	37		
砂土	1 400~1 700	4~28	33		
砂砾	1 500~1 900	3~21	30		

3.2 冻土的温度及未冻水含量对冻土导热系数的影响

水和冰的导热系数相差近 4 倍, 如果分析剧烈相变区域内冻土的导热系数, 应考虑未冻水含量随温度的变化对冻土导热系数的影响。徐学祖对冻结草炭粉质黏土和粉质黏土导热系数的研究结果表明, 冻土导热系数随负温降低略有增大, 但增率很小, 温度变化 1°C, 导热系数的变化率小于 5%^[4]。因此, 在一般热工计算中导热系数取值只考虑冻结或融化状态, 可忽略温度影响。

3.3 其他因素影响

土的矿物成分、结构及粒径分布对土的导热系数也具有一定影响。石英等矿物成分具有较高的导热系数, 其含量大小对土的导热系数具有一定的影响。然而 Côté 和 Konrad 证明, 对于岩石材料, 尤其是当石英岩含量低于 20% 时, 应该采用广义几何平均法^[13-14]。

3.4 岩土导热系数预估模型参数选取

尽管影响冻土或融土导热系数的因素有很多, 但为便于工程应用, 所建立的岩土导热系数预估模型中参数应尽可能少。尽量选取影响导热系数变化的最主要的参数, 如密度和含水率以及土质类型等, 且在工程应用中参数的获取和测试应不必采用过于复杂的方法、技术或设备。

4 干土和饱和土的导热系数的确定

在探讨非饱和土导热系数计算方法之前, 首先分析土中孔隙完全被空气填充(干土)或完全被水填充(饱和土)两种简单情况导热系数预估方法。

4.1 干土导热系数

空气和固体颗粒的导热系数相差百倍, 所以孔隙率的变化会对干土导热系数产生重要影响。由于

所分析的数据中没有干土的实测值，本研究将各种土在不同密度条件下导热系数随含水率变化曲线向左延伸，与纵坐标相交，取得干土的导热系数。

对测试数据分析表明，随着孔隙率的增加，干土的导热系数逐渐减小。同时，导热系数随孔隙率的变化率也逐渐减小。本文用式(1)的指数函数描述干土的导热系数与孔隙率变化关系，如图1所示，取得了较好的相关性。

$$d_{\text{dry}} = a10^{-bn} \quad (1)$$

式中： d_{dry} 为干土的导热系数； n 为土的孔隙率； a 、 b 为受颗粒组成影响的材料参数。对于级配较好的砂砾而言， a 和 b 的值分别取10 W/m°C和4；对于天然矿物土， a 和 b 可分别在0.5~1.3 W/m°C和1.2~1.5范围内取值；对于含有有机纤维的土壤（如泥炭）， a 和 b 分别取0.3 W/m°C和1.1。

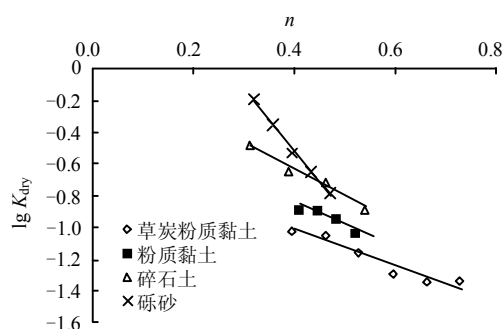


图1 干土导热系数 k_{dry} （对数）与孔隙率关系 n
Fig.1 Relationship between the logarithm of thermal conductivity and porosity for dry soils

土的孔隙率可以通过式(2)得到

$$n = 1 - \rho_d / \rho_s \quad (2)$$

式中： ρ_s 、 ρ_d 分别为固体颗粒的密度和土的干密度。

4.2 饱和土导热系数

目前已有很多计算饱和土的导热系数理论模型，然而Sass研究认为，如果组成成分的导热系数之间的差别不超过一个数量级的时候，采用最简单的几何平均的方法和其他较为复杂的方法一样有效^[14-15]，因此饱和未冻土的导热系数可以通过式(3)计算。

$$k_{\text{sat}(u)} = k_s^{1-n} k_w^n \quad (3)$$

式中： $k_{\text{sat}(u)}$ 为饱和未冻土的导热系数； k_s 、 k_w 分别

为固体颗粒和水的导热系数（W/m°C）。

饱和冻土的导热系数通过式(4)计算可得

$$k_{\text{sat}(f)} = k_s^{1-n_f} k_i^{n_f} \quad (4)$$

式中： $k_{\text{sat}(f)}$ 为饱和冻土的导热系数； k_i 为冰的导热系数； n_f 为饱和冻土的孔隙率。

如果考虑饱和土因冻结过程中孔隙体积的增加（9%），根据Côté和Konrad的研究^[13-14]，饱和冻土的孔隙率 n_f 通过式(5)确定。

$$n_f = 1.09n_u / (1 + 0.09n_u) \quad (5)$$

式中： n_u 为未冻土的孔隙率，由式(2)算得。

如果考虑未冻水含量变化对细粒饱和冻土的导热系数的影响，式(4)可以改写为

$$k_{\text{sat}(f)} = k_s^{1-n_f} k_i^{n_f - \theta_u} k_w^{\theta_u} \quad (6)$$

式中： θ_u 为在细粒土中未冻水的体积比例。

给定温度的条件下冻土中未冻水的（重量）含量可以通过规范^[1-2]中给出的经验关系式确定：

$$w_u = w_p k(T) \quad (7)$$

$$w_u = w[1 - i(T)] \quad (8)$$

式中： w_u 为冻土中未冻水的重量含量（%）； w_p 为塑限（重量）含水率（以小数计）； k 为温度修正系数，可根据试验结果或由规范^[1-2]查取； i 为含冰量（冰的质量与总水质量之比），可根据试验结果或由规范^[1-2]中查取； T 为温度。

由于未冻水体积含水率与重量含水率存在如下关系：

$$\theta_u = \frac{w_u \rho_d}{100 \rho_w} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)即可确定饱和细粒冻土导热系数。

对于冻结粗粒土，可不考虑未冻水影响。

5 非饱和土导热系数分析及模型建立

建立岩土材料导热系数预测模型，可以采用主导因子多元回归和神经网络等分析方法^[16-17]，本文采用归一化分析方法。

密度、含水率参数在工程勘察和测试分析中，获取方法较为简单，同时又是影响岩土导热系数的

主要因素,在本文分析和模型建立中,将其列为预估模型的主要参数。

不同干密度融土和冻土导热系数随含水率变化规律如图2(仅以低液限黏土为例)所示。从图中可以看出,密度越大,导热系数越高,而在土类确定和相同密度的情况下融土和冻土的导热系数随着含水率的增加而增加,即随着水对土孔隙填充程度(土的饱和度)的增加,土的导热系数从干土的导热系数逐渐增加到饱和土的导热系数。

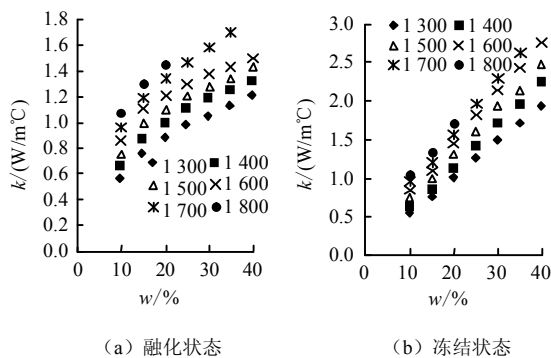


图2 不同干密度低液限黏性土导热系数随含水率变化曲线(单位: kg/m³)

Fig.2 Thermal conductivity of low liquid limit clayey soils (unit: kg/m³)

以土的完全干燥状态以及饱和状态下的导热系数为基准,将土的含水率和导热系数作归一化处理。由于重量含水率无法描述孔隙内水分变化,为此采用饱和度作为归一化含水率,并定义归一化导热系数:

$$k_r = \frac{k - k_{\text{dry}}}{k_{\text{sat}} - k_{\text{dry}}} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } S_r = 0, w = 0 \text{ 时, } k_r = 0, k = k_{\text{dry}} \\ \text{当 } S_r = 1, w = w_{\text{sat}} \text{ 时, } k_r = 1, k = k_{\text{sat}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

对归一化的导热系数和含水率(饱和度)重新分析,其变化规律如图3所示。从图中可以看出,对于图2中同类土在不同密度条件下的各种导热系数-含水率曲线簇进行归一化处理后可以得到惟一的归一化导热系数-饱和度(归一化含水率)(k_r - S_r)关系曲线,且曲线通过坐标(0, 0)和(1, 1)。

通过(0, 0)和(1, 1)的曲线可以采用幂函数来描述,但进一步分析发现 $1/k_r$ 与 $1/S_r$ 呈相关性较好的线性关系(表2)。不同的土类在同一个坐标系内为通过(1, 1)点的放射性直线簇(图4),其斜率由土质条件决定。

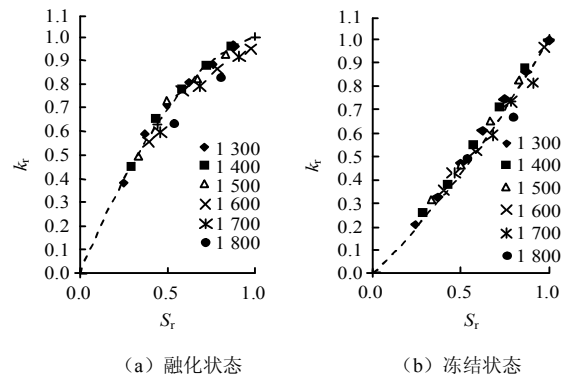


图3 不同干密度的低液限黏性土归一化导热系数随饱和度变化曲线

Fig.3 Normalized thermal conductivity for low liquid limit clayey soils

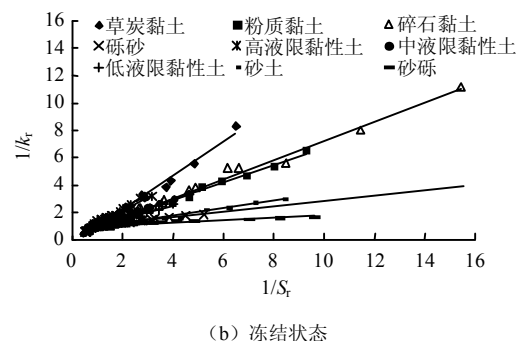
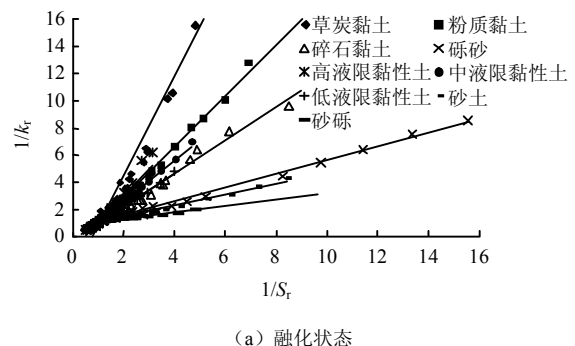


图4 各种土 $1/k_r$ 与 $1/S_r$ 相关性分析

Fig.4 The relationships between $1/k_r$ and $1/S_r$ for unfrozen and frozen soils

由于各种土的 $1/k_r$ 与 $1/S_r$ 关系为直线,并通过坐标(1, 1),因此采用通式(12)表达各种土的 k_r - S_r 函数关系:

$$\frac{1}{k_r} = c \frac{1}{S_r} + (1 - c) \quad (12)$$

式中: c 为土类参数。根据表2,可以建立 c 与液塑限及颗粒组成等土性参数之间的关系。进而将土类影响因子纳入预测模型。各类土的 c 值整理为表3。

式(12)也可以转换为

$$k_r = \frac{S_r}{c + (1 - c)S_r} \quad (13)$$

表2 各种土的 $1/k_r$ 与 $1/S_r$ 相关性分析结果汇总Table 2 The results of correlation analysis between $1/k_r$ and $1/S_r$

土类	融化状态	冻结状态
草炭黏性土	$y = 1.232x - 0.2426$ $R^2 = 0.9904$	$y = 3.6255x - 2.6839$ $R^2 = 0.9413$
粉土-粉质黏土	$y = 0.6271x + 0.3724$ $R^2 = 0.9887$	$y = 1.8687x - 0.8875$ $R^2 = 0.9934$
碎石粉质黏土	$y = 0.7022x + 0.2389$ $R^2 = 0.9904$	$y = 1.222x - 0.2868$ $R^2 = 0.9829$
砾砂	$y = 0.1968x + 0.85$ $R^2 = 0.9879$	$y = 0.503x + 0.5728$ $R^2 = 0.9913$
高液限黏性土	$y = 1.0113x + 0.0939$ $R^2 = 0.9768$	$y = 1.9466x - 0.8871$ $R^2 = 0.9241$
中液限黏性土	$y = 0.6162x + 0.4485$ $R^2 = 0.9799$	$y = 1.4127x - 0.4037$ $R^2 = 0.9887$
低液限黏性土	$y = 0.4883x + 0.5195$ $R^2 = 0.975$	$y = 1.1786x - 0.1402$ $R^2 = 0.9923$
砂土	$y = 0.2692x + 0.6809$ $R^2 = 0.9826$	$y = 0.4048x + 0.6979$ $R^2 = 0.9866$
砂砾	$y = 0.0908x + 0.8721$ $R^2 = 0.8997$	$y = 0.235x + 0.8367$ $R^2 = 0.9143$

注：表中 $y=1/k_r$, $x=1/S_r$, R^2 为相关系数。

表3 土类参数 c 的取值范围Table 3 Empirical parameter c for different types of soils in the unfrozen and the frozen states

土类	融化状态	冻结状态
含有机质的黏性土	1.2	3.6
高液限黏性土	1.0	1.9
中低液限黏性土	0.5~0.7	1.2~1.8
砂土和砾砂	0.2~0.3	0.4~0.5
级配良好的砂砾	0.1	0.2

因此，如果已知土质类型，可以按式（14）求得融土或者冻土的导热系数：

$$k = (k_{\text{sat}} - k_{\text{dry}})k_r + k_{\text{dry}} \quad (14)$$

式中饱和土导热系数 k_{sat} 和干土导热系数 k_{dry} 可以按前面（第4章节）给出的方法求得。

6 导热系数预估模型的验证

将预估模型计算结果与实测数据进行对比，结果如图5~7所示。验证中，中低液限黏性土和砂土及砾砂的 c 值分别取表4建议取值区间的平均值。

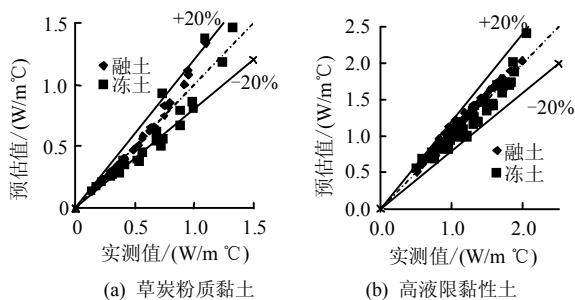
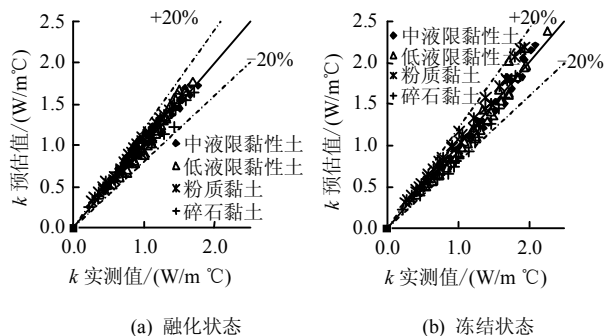
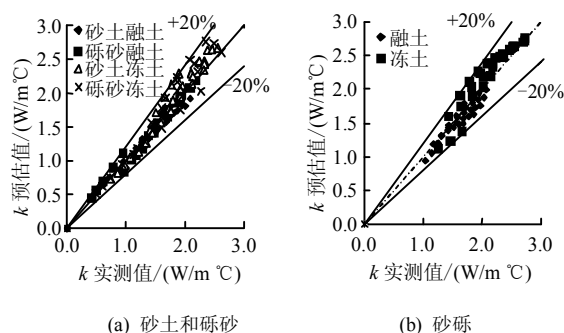


图5 草炭粉质黏土和高液限黏性土导热系数的实测值和预估值的对比

Fig.5 Predicted thermal conductivity values compared with measured values of peat and high liquid limit clayey soils

图6 中低液限黏性土导热系数实测值和预估值的对比
Fig.6 Predicted thermal conductivity values compared with measured values of moderate and low liquid limit clayey soils图7 砂土和砾砂及砾砂导热系数实测值和预估值的对比
Fig.7 Predicted thermal conductivity values compared with measured values for sand and pebbly sand and sandy gravel

对比结果表明，模型对于融土具有较好的预估准确性，对不饱和以及饱和状态的冻土也具有较好的准确性，计算结果与实测数据的误差基本上不超过20%；而对于过饱和的冻土，一般预测结果比实测数据偏大，原因有待深入分析。

7 结论

(1) 随着孔隙率的增加，干土的导热系数逐渐减小，可以用指数函数描述不同类别干土的导热系数与孔隙率变化之间的关系。

(2) 在土类确定和相同密度的情况下，随着水对土孔隙填充程度（土的饱和度）的增加，土的导热系数从干土的导热系数逐渐增加到饱和土的导热系数。因此，利用完全干燥土和饱和土的导热系数以及饱和度对同类土在不同密实度条件下的各种导热系数和含水率（ $k-w$ ）曲线簇进行归一化处理，可以得到惟一的归一化导热系数-饱和度（归一化含水率）关系。

(3) 进一步分析发现， $1/k_r$ 与 $1/S_r$ 呈相关性较好的线性关系，而且每支 $1/k_r-1/S_r$ 直线通过（1，1）

点,其斜率由土质类型决定。据此本文提出了一个集成土质类型、密实度(孔隙率)和含水率(饱和度)等因素综合影响的融土和冻土导热系数通用预估模型,并给出了导热系数通用模型中土质参数的取值范围,以及融土和冻土处于完全干燥状态和饱和状态的确定方法。

(4)对预估模型进行验证结果表明,本文所提出的非饱和土导热系数预估模型具有较好准确性,计算误差可以控制在20%以内。归一化模型能够反映导热系数变化规律的物理本质,并且可以推广到未经实测的土质类型。由于模型采用归一化通用形式,便于在传热数值分析和土的冻融过程模拟中使用。

参考文献

- [1] 国家林业局. GB 50324—2001 冻土工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [2] 黑龙江省寒地建筑科学研究院. JGJ 118—98 冻土地区建筑地基设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [3] 徐敦祖, 陶兆祥, 付素兰. 典型融冻土的热学性质[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第2号). 北京: 科学出版社, 1981.
- [4] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [5] ORLANDO B. ANDERSLAND, BRANKO LADANYI. Frozen ground engineering (second edition)[M]. New Jersey: John Wiley & Son, 2004.
- [6] 王铁行, 刘自成, 卢靖. 黄土导热系数和比热容的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 655—658.
WANG Tie-hang, LIU Zi-cheng, LU Jing. Experimental study on coefficient of thermal conductivity and specific volume heat of loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 655—658.
- [7] 庄迎春, 谢康和, 孙友宏. 砂土混合材料导热性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 262—269.
ZHUANG Ying-chun, XIE Kang-he, SUN You-hong. Experimental study on thermal conductivity of mixed materials of sand and bentonite[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2): 262—269.
- [8] 王春雷, 谢强, 姜崇喜, 等. 青藏铁路冻区盐渍土热特性及力学性能分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 836—839.
WANG Chun-lei, XIE Qiang, JIANG Chong-xi, et al. Analysis of thermal characteristics and mechanical properties of salty soil in frozen area of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 836—839.
- [9] 陈善雄, 陈守义. 砂土热导率的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(5): 47—53.
CHEN Shan-xiong, CHEN Sou-yi. Experimental study on thermal conductivity of sands[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(5): 47—53.
- [10] 吴紫汪, 丁德文, 张长庆, 等. 冻结凿井冻结壁的工程性质[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1988.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [12] GANGADHARA RAO, M V B B, SINGH D N. A generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36: 767—773.
- [13] CÔTÉ J, KONRAD J M. Thermal conductivity of basecourse materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42: 61—78.
- [14] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42: 443—458.
- [15] 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.
- [16] 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(下册). 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [17] 常斌. 基于数值仿真试验的岩土工程智能化方法及应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.