

DOI: 10.11779/CJGE20220243

土体导热系数温度效应及其预测模型

徐云山^{1,2}, 肖子龙¹, 孙德安^{*3}, 陈军浩¹, 曾召田⁴

(1. 福建工程学院土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建工程学院地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350108;

3. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 4. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004)

摘要: 考虑环境温度变化对土体导热系数的影响, 对于地下热工项目的优化设计和安全评价是必要的。利用热探针法测试了不同温度下红黏土、粉土、软土和膨润土的导热系数, 分析了土体导热系数的温度效应及其影响因素, 建立了考虑导热系数温度效应的加权几何平均模型, 并与传统的预测模型进行对比分析。试验结果表明: 土体导热系数随温度的增加而增大, 其温度效应随干密度的增大而减小, 温度对非饱和土体导热系数的影响较大, 对于干燥和饱和土体导热系数的影响较微弱。温度对土体导热系数的影响可能取决于水汽潜热传输作用的变化, 土中可提供潜热传输的水分和水汽运移通道越多, 土体导热系数的温度效应越显著。模型计算结果表明, 提出的加权几何平均模型预测性能良好, 且较好预测了含水率和干密度对土体导热系数温度效应的影响, 而 Tarnawski 模型、Gori 模型、Leong 模型预测精度均低于加权几何平均模型。

关键词: 土体导热系数; 温度效应; 水汽潜热传输; 预测模型

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)06-1180-10

作者简介: 徐云山(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事特殊土的工程特性与微观机制、非饱和土力学等方面的教学和科研。E-mail: xuyunshanfj@163.com。

Temperature effects and prediction model of thermal conductivity of soil

XU Yunshan^{1,2}, XIAO Zilong¹, SUN Dean³, CHEN Junhao¹, ZENG Zhaotian⁴

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China; 2. Key Laboratory of Underground Engineering

of Fujian Provincial Universities, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China; 3. Department of Civil Engineering,

Shanghai University, Shanghai 200444, China; 4. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Considering the influences of environmental temperature on thermal conductivity of soil is necessary for the optimization design and safety assessment of underground thermal engineering projects. The thermal conductivities of lateritic clay, silt clay, soft clay and bentonite at different temperatures are measured by using the thermal probe method, and the temperature effects of thermal conductivity of soil and its influencing factors are analyzed. A weighted geometric average model considering the temperature effects of thermal conductivity of soil is then established, and is compared with the traditional predictive models. The test results show that the thermal conductivity of soil increases with the increase of temperature, and its temperature effects decrease with the increase of dry density. The temperature has a great influence on the thermal conductivity of unsaturated soil, but a weak influence on the thermal conductivity of dry and saturated soil. The temperature effects of thermal conductivity of soil may depend on the change of the latent heat transfer of vapor. The more the moisture and vapor migration channels that can provide for the latent heat transfer of vapor in soil, the more significant the temperature effects of thermal conductivity of soil. The calculated results show that the proposed weighted geometric average model provides the best fitting to the measured data against the three other traditional models, and can predict well the influences of water content and dry density on the temperature effects of thermal conductivity of soil, while the prediction accuracy of the Tarnawski model, Gori model and Leong model is lower than that of the weighted geometric average model.

Key words: thermal conductivity of soil; temperature effect; latent heat transfer; prediction model

0 引言

土体导热系数是表征地下热量传导效率的重要热物理参数, 也是土体热力学性质的重要指标之一, 其

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202295); 福建省科技厅青创项目(2021J05219); 福建工程学院科研启动基金项目(GY-Z21013)

收稿日期: 2022-03-09

***通信作者** (E-mail: sundean@shu.edu.cn)

大小影响着地下空间传、蓄热过程。深入了解土体导热系数的影响因素及其内在机制对于许多热工项目的传热分析、建模和合理设计具有重要意义, 例如人工冻结法在地下工程施工中的应用^[1], 核废料深地质处置的导热问题^[2-3], 深部矿产与地热资源的开发利用^[4], 埋地高压电缆的散热^[5]以及垃圾填埋场衬垫系统的设计^[6]等。为此, 国内外学者对土体导热系数开展了大量的研究探讨, 发现影响岩土体导热系数的因素较多, 主要包括矿物成分、颗粒大小与级配、含水率、孔隙率、饱和度、盐分、有机质、微观结构和温度等^[7-9]。然而, 研究中对土体导热系数的测试大多是在室温下进行, 对于不同温度下土体导热系数的测试及其预测研究较少, 需引起重视。

由于土体是由固、液、气三相组成的复合多孔介质, 温度变化时土中液相会发生迁移和相变, 比如温度变化引起的水分迁移^[10]、冻融循环^[11]以及水汽潜热传输^[7]等过程, 影响了土体的导热系数。与低温循环引起冻融过程的影响相比, 高温引起的水汽潜热传输作用对土体导热系数的影响表现得更为突出。陆森等^[12]利用单针热脉冲技术测试了 3~81℃下壤土的导热系数, 发现当试样温度升至 81℃时, 其导热系数约为 22℃下的 (2~4) 倍。研究表明, 室温范围 (0~40℃) 非饱和土中热量传递主要通过土中各相的接触热传导进行; 较高温度 (40~90℃) 影响下, 非饱和土中还存在水汽潜热传输作用的传热机制, 且该机制甚至占据主导作用^[13]。目前, 由于水汽潜热传输作用的量化仍比较困难, 因此考虑温度影响的导热系数预测模型还较少。

De^[14]最早建立了考虑水汽扩散强化传热影响的导热系数预测模型, 但该模型含有较多参数, 其关键参数的取值具有较大不确定性。为此, 一些学者对 De

Vries 模型进行简化和修正, 提出了 Campbell 模型^[15]、De V-1 和 De V-2 模型^[16]。Tarnawski 等^[17]以 Johansen 模型为基础, 将标准化函数扩展成关于饱和度和温度的函数, 建立了 Tarnawski 经验模型, 但该模型拟合参数较多, 不实用。Tarnawski 等^[18]和 Leong 等^[19]提出了考虑温度影响的粒间接触传热模型, 该模型是以自洽近似理论为基础, 同时考虑了土颗粒间接触热阻对传热过程的影响, 但计算过程过于复杂。就目前而言, 由于缺少不同温度下土体导热系数的实测数据, 现有考虑温度影响的预测模型尚缺乏可靠的试验验证。同时, 由于温度作用下非饱和土体内部热传递是一个传热传质耦合过程, 使得现有预测模型的形式普遍比较复杂, 存在一定局限性。

本文利用热探针法测试了 4 种土体导热系数的温度效应, 探讨温度对土体导热系数影响的内在机理。在此基础上, 基于广义几何平均法建立了考虑温度影响的土体导热系数预测模型, 并与传统预测模型进行比较。为进一步检验新模型的有效性和可靠性, 利用该模型预测干密度和含水率对土体导热系数温度效应的影响, 结果表明新模型具有较好的预测性能。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土包括红黏土、粉质黏土、软土以及 GMZ07 膨润土, 红黏土和粉质黏土取自广西桂林市雁山镇广西师范大学新校区内, 软土取自上海地区, GMZ07 膨润土产自内蒙古兴和县高庙子地区。在进行试验之前, 先将所取土样风干、碾散、过筛, 均匀混合后备用。通过室内试验, 获取了 4 种供试土样的基本物性指标和矿物成分, 如表 1, 2 所示。

表 1 供试土样的基本物性指标

Table 1 Physical property indexes of soil samples

土样	相对质量 密度	液限/ %	塑限/%	塑性指数	颗粒级配/%		
					砂粒 2~0.05 mm	粉粒 0.05~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm
红黏土	2.74	61.8	38.1	23.7	7.89	47.02	45.09
粉质黏土	2.72	27.6	16.5	11.1	27.10	52.54	20.36
软土	2.73	40.6	20.5	20.1	3.75	69.44	26.81
GMZ07 膨润土	2.76	163.0	32.0	131.0	—	56.40	43.60

表 2 供试土样的矿物成分

Table 2 Mineral compositions of soil samples

单位: %

土样	蒙脱石	高岭石	伊利石	长石	石英	其他
红黏土	—	50.7	12.0	9.9	12.7	14.7
粉质黏土	—	51.0	19.0	—	11.5	18.5
软土	—	—	31.2	—	23.0	45.8
GMZ07 膨润土	62.0	—	—	11.0	10.0	17.0

1.2 土体导热系数测定

为研究温度、含水率和干密度对土体导热系数的影响,本次试验设置试样温度分别为 5, 20, 40, 60, 80, 90°C, 含水率为 0.5%~40.3%, 干密度为 1.10~1.80 g/cm³。为满足导热系数测定设备的尺寸要求,确定试样直径为 7.0 cm, 高为 5.2 cm。

采用喷雾法和静压法制备不同含水率和干密度试样,具体的制备过程如下:①取适量土体置于塑料袋内,利用喷雾法湿润土样至目标含水率;②扎紧塑料袋并密封静置 7 d,直至湿土样内水分均匀分布;③将均化后的湿土样倒入不锈钢模具内,静压至目标干密度,并静置一定时间直至试样不发生回弹。

土体导热系数的测定采用 KD2 Pro 型热特性分析仪,优点是能够快速完成热性质的测定。KD2 Pro 型热特性分析仪主要由控制器和热探针组成,其测试原理是基于线热源理论,可归结为在无限大介质中一恒定线热源径向一维导热的求解问题^[20]。测量过程中,热探针会产生热脉冲并对样品进行加热,随后控制器将会采集热电偶对热脉冲产生的温度响应,最后利用该过程中热探针温度变化的监测数据来计算样品的导热系数。本次试验利用 SH-1 型热探针进行导热系数测定,其长度和直径分别为 30, 1.28 mm, 双针间隔为 6 mm, 测试精度为±5%,可在-50~150°C环境温度下正常使用。为保证不同温度下导热系数测定时试样内水分维持恒定,利用保鲜膜和胶布将试样包裹严实,随后将密封好的试样放置恒温箱内静置至目标温度(分别为 5, 20, 40, 60, 80, 90 °C),再利用 SH-1 型热探针竖直插入试样进行测定,即可获取不同温度试样的导热系数,测试过程如图 1 所示。为保证试验的测试精度,每个试样测定 3 次,土体最终的导热系数取多次测定结果的平均值。

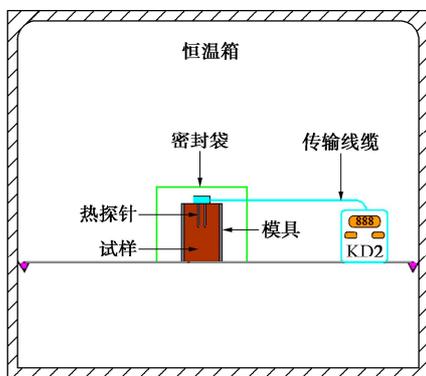


图 1 不同温度下试样的导热系数测试

Fig. 1 Measurement of thermal conductivity of samples subjected to different temperatures

1.3 考虑温度影响的土体导热系数预测模型

(1) Tarnawski (2000) 模型

Tarnawski 等^[17]以 Johansen 模型^[21]为基础,将标准化函数 Ke 扩展成关于饱和度 S_r 和摄氏温度 T 的函数,建立了考虑温度影响的导热系数 K 预测模型,即 Tarnawski 经验模型:

$$Ke(S_r, T) = \frac{K - K_{dry}}{(K_{sat} - K_{dry})} \quad (1)$$

式中: K_{sat} , K_{dry} 分别为完全干燥和饱和状态下土体的导热系数 (W/mK)。

干燥状态下土体的导热系数 K_{dry} 可由下式进行计算:

$$K_{dry} = \frac{0.137\rho_d + 64.7}{\rho_p - 0.947\rho_d} \quad (2)$$

式中: ρ_d 为干密度; ρ_p 为颗粒密度,取 2650 kg/m³。

饱和状态下土体的导热系数 K_{sat} 可由广义几何平均关系式进行计算:

$$K_{sat} = K_w^n K_s^{1-n} \quad (3)$$

式中: n 为孔隙率; K_w , K_s 分别为水和固体颗粒的导热系数, K_w 在 20°C 下取 0.594 W/mK;

$$K_s = K_q^{\theta_q} K_o^{1-\theta_q} \quad (4)$$

式中: K_q , θ_q 分别为石英的导热系数和体积分数, $K_q=7.7$ W/mK; K_o 为除石英外其它矿物成分的等效导热系数,当 $\theta_q \leq 0.2$ 时, $K_o=3$ W/mK; 当 $\theta_q > 0.2$ 时, $K_o=2$ W/mK。

Ke 是关于饱和度 S_r 和温度 T 的函数:

$$Ke(S_r, T) = \frac{a + bT + cS_r + dS_r^2}{1 + eT + fS_r + gS_r^2} \quad (5)$$

式中: $a \sim g$ 为拟合参数,由任一温度下的实测数据进行拟合获取,进而用于预测其它温度下土体的导热系数。为使该模型更易于推广使用,现采用 20°C 下导热系数的实测结果来拟合获取参数 $a \sim g$,由此可预测其它温度下土体的导热系数:

$$K = K_{dry,20^\circ C} + (K_{sat,20^\circ C} - K_{dry,20^\circ C})Ke(S_r, T) \quad (6)$$

(2) Gori (2002) 模型

Gori 等^[22]将土体概化为由各组分构成的立方体单元空间,且立方体单元颗粒处于土体单元中心。在此基础上,将土体单元水饱和过程划分成以下 3 个阶段:①在完全干燥条件下,孔隙中由空气充满;②含湿(非饱和)状态下,土中水先通过吸附和毛细作用赋存在固体颗粒四周,随着水分的继续增加,“水桥”开始形成并逐渐扩张;③在完全饱和和状态下,土中孔隙充满水。针对水饱和过程的不同阶段,土体的导热系数计算方法不同。

a) 完全干燥状态下,土体的导热系数 K 由干空气和固体颗粒的导热系数计算求得:

$$\frac{1}{K} = \frac{\beta - 1}{K_{da}\beta} + \frac{\beta}{K_s + K_{da}[\beta^2 - 1]} \quad (7)$$

b) 类似地, 完全饱和状态下, 土体的导热系数可由下式计算求得:

$$\frac{1}{K} = \frac{\beta - 1}{K_w\beta} + \frac{\beta}{K_s + K_w[\beta^2 - 1]} \quad (8)$$

式中: K_s , K_w 和 K_{da} 分别为固体颗粒、水和干空气的热传导系数; 参数 β 与孔隙率 n 有关:

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{1}{1-n}} \quad (9)$$

K_w , K_{da} 均为温度 T 的函数:

$$K_w = 0.569 + 1.88 \times 10^{-3}T - 7.72 \times 10^{-7}T^2, \quad (10)$$

$$K_{da} = 2.408 \times 10^{-2} + 7.92 \times 10^{-5}T \quad (11)$$

固体颗粒的导热系数 K_s 为各矿物组分的加权平均, 但该方法过于复杂, 为便于比较不同预测模型的可靠性, K_s 也按式 (4) 计算取值。

非饱和状态下, 热传导系数计算的前提是求取临界含水率 θ_c :

$$\theta_c = 0.375\theta_{pwp} \quad (12)$$

式中: θ_{pwp} 为土粒间开始形成“水桥”时的体积含水率, 可利用 Rawls 等^[23]的线性回归公式估算:

$$\theta_{pwp} = 0.026 + 0.005m_{clay} \quad (13)$$

式中: m_{clay} 为黏粒含量。

c) 含湿状态下, 当体积含水率 $\theta_w < \theta_c$ 时, 非饱和土体的导热系数为

$$\frac{1}{K} = \frac{\beta - 1 - \delta/3}{K_{app}\beta} + \frac{\beta\delta}{3[K_w + K_{app}(\beta^2 - 1)]} + \frac{\beta}{K_s + \frac{2}{3}\delta K_w + (\beta^2 - 1 - \frac{2}{3}\delta)} \quad (14)$$

式中: K_{app} 为空气的表观热传导系数, 可由干空气的导热系数 K_{da} 和饱和水蒸汽的导热系数 K_{vs} 计算求得

$$K_{app} = K_{da} + h \cdot K_{vs} \cdot \xi \quad (15)$$

式中: ξ 为传质增强因子, 按文献[24]建议取 1; h 为气相相对湿度,

$$h = \exp\left(\frac{\psi M_w}{\rho_w RT_K}\right) \quad (16)$$

式中: ψ 为土壤水势, M_w 为水的摩尔质量; ρ_w 为水的密度; R 为绝对气体常数; T_K 为开尔文温度。

饱和水蒸汽的热传导系数 K_{vs} 为

$$K_{vs} = \frac{H_L DM_w}{RT_K} \cdot \frac{p_b}{p_b - p_{vs}} \cdot \frac{dp_{vs}}{dT_K} \quad (17)$$

式中: p_b 为大气压; H_L 为汽化潜热, $H_L = 2503000 - 2300T$ 。

饱和蒸汽压 p_{vs} 与温度 T 有关:

$$\ln p_{vs} = \sum_{l=-1}^3 g_l T^l + g_4 \ln T \quad (18)$$

式中: g_l 为形状因子, $l = -1 \sim 4$ 。 $g_{-1} = -5800.22$, $g_0 = 0.01$, $g_1 = -0.05$, $g_2 = 0.42 \times 10^{-4}$, $g_3 = -0.14 \times 10^{-7}$, $g_4 = 6.55$ 。

式 (17) 中, D 为水蒸气在空气中的扩散系数, 与开尔文温度 T_K 有关:

$$D = 2.25 \times 10^{-5} \left[\frac{T_K}{273.15} \right]^{1.72} \quad (19)$$

参数 δ 为关于体积含水率 θ_w 和孔隙率 n 的函数:

$$\delta = \frac{\theta_w}{1-n} \quad (20)$$

d) 当体积含水率 $\theta_w > \theta_c$, 且长度比 $\gamma_f < 1$ 时, 土体的导热系数可由下式求得:

$$\frac{1}{K} = \frac{\beta^2 - \beta\gamma}{K_{app}(\beta^2 - \gamma_f^2) + K_w \cdot \gamma_f^2} + \frac{\beta\gamma - \beta}{K_{app}(\beta^2 - \gamma^2) + K_w \cdot \gamma^2} + \frac{\beta - \beta\gamma_f}{K_{app}(\beta^2 - \gamma^2) + K_w \cdot (\gamma^2 - 1) + \lambda_s} + \frac{\beta\gamma_f}{K_s + K_w \cdot (\gamma^2 - 1 + 2M) + K_{app}(\beta^2 - \gamma^2 - 2M)} \quad (21)$$

式中: 参数 γ 为

$$\gamma = \sqrt[3]{\frac{V_w}{V_s} - \frac{V_{wf}}{V_s} + 1} \quad (22)$$

式中: V_{wf} , V_s 分别为毛细水和固体颗粒的体积; V_s 可由基本物性指标计算求得。

$$\frac{V_{wf}}{V_s} = \left[0.183 + \frac{0.226 - 0.183}{0.4764 - 0.2595} \cdot (0.4764 - n) \right] \cdot (\beta^3 - 1) \quad (23)$$

长度比 γ_f 本质上也与体积含水率有关:

$$\gamma_f = \sqrt{\frac{V_{wf}/V_s}{3(\beta - \gamma)}} \quad (24)$$

e) 当体积含水率 $\theta_w > \theta_c$, 且长度比 $\gamma_f > 1$ 时, 土体的导热系数可由下式求得:

$$\frac{1}{K} = \frac{\beta^2 - \beta\gamma}{K_{app}(\beta^2 - \gamma_f^2) + K_w \cdot \gamma_f^2} + \frac{\beta\gamma - \beta\gamma_f}{K_{app}(\beta^2 - \gamma^2) + K_w \cdot \gamma^2} + \frac{\beta\gamma_f - \beta}{K_{app}(\beta^2 - \gamma^2 - 2M) + K_w \cdot (\gamma^2 + 2M)} + \frac{\beta}{K_s + K_w \cdot (\gamma^2 - 1 + 2M) + K_{app}(\beta^2 - \gamma^2 - 2M)} \quad (25)$$

(3) Leong (2005) 模型

Leong 模型^[19]是以自洽近似法为基础, 即假定土体是由土颗粒和均质体构成, 该均质体是由具有相似性状的组分 (包括土颗粒、水和空气) 组成 (见图 2)。由此, 土体的等效导热系数可由迭代公式计算求得:

$$K_{\text{eff}} = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=1}^3 \frac{\theta_i}{2K_{\text{eff}} + K_i} \right]^{-1} \quad (26)$$

式中： K_i 和 θ_i 分别为土中各单相的导热系数和体积分数。

固相 (θ_1)、液相 (θ_2) 和气相 (θ_3) 的体积分数可由下式计算求得：

$$\theta_1 = \frac{V_s}{V_v + V_s} = \frac{\rho_d}{\rho_w G_s} \quad (27)$$

$$\theta_2 = \frac{V_w}{V_v + V_s} = \frac{S_r (G_s - \rho_d / \rho_w)}{G_s} \quad (28)$$

$$\theta_3 = \frac{V_a}{V_v + V_s} = 1 - (\theta_1 + \theta_2) \quad (29)$$

式中： V_s 、 V_w 和 V_v 分别为固体颗粒、水和土中孔隙的体积； ρ_d 为土体的干密度 (g/cm^3)； ρ_w 为水的密度； G_s 为土粒相对质量密度。

固相的导热系数 K_1 可由下式计算求得：

$$K_1 = \alpha K_s \quad (30)$$

式中： K_s 为固体颗粒的导热系数，可利用式 (4) 计算求解； α 是传质校正因子，反映了土颗粒间接触热阻 (TCR) 对传热过程影响程度的大小，数值越大，土颗粒间接触情况越良好，故土颗粒的导热系数越大。在水饱和过程中，土颗粒间的接触情况受饱和度的影响，因而传质校正因子 α 与饱和度 S_r 有关：

$$\alpha = Ke(\alpha_{\text{sat}} - \alpha_{\text{dry}}) + \alpha_{\text{dry}} \quad (31)$$

$$Ke = 0.71 \lg S_r + 1 \quad (32)$$

式中： α_{dry} 、 α_{sat} 分别为完全干燥和饱和状态下的传质校正因子，

$$\alpha_{\text{dry}} = \frac{1}{(\beta / K_s + (1 - \beta) / K_{\text{da}}) K_s} \quad (33)$$

$$\alpha_{\text{sat}} = \frac{1}{(\beta / K_s + (1 - \beta) / K_2) K_s} \quad (34)$$

式中： K_{da} 、 K_2 分别为干空气和液相 (水) 的导热系数，均是关于温度 T 的函数：

$$K_{\text{da}} = 2.408 \times 10^{-2} + 7.92 \times 10^{-5} T \quad (35)$$

$$K_2 = 0.569 + 1.88 \times 10^{-3} T - 7.72 \times 10^{-7} T^2 \quad (36)$$

式 (5)、(6) 中，参数 β 为土颗粒间有效接触率，与孔隙率 (n) 有关：

$$\beta = 1 - 0.12833n + 0.06461n^2 + 0.06491n^3 \quad (37)$$

气相的导热系数 K_3 可由干空气 K_{da} 和饱和水蒸汽 K_{vs} 的导热系数求得：

$$K_3 = K_{\text{da}} + hK_{\text{vs}} \quad (38)$$

式中： h 为气相的相对湿度，可利用式 (16) 计算求得； λ_{vs} 可利用式 (17) 计算求得。

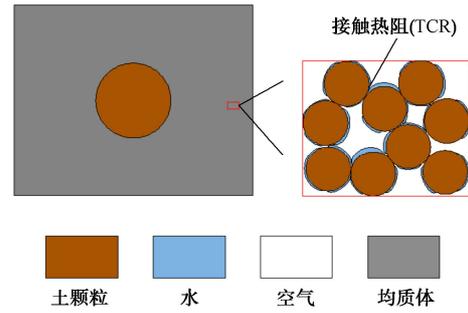


图 2 Leong 模型的结构原理图

Fig. 2 Structural diagram of Leong model

(4) 加权几何平均模型

本文基于加权几何平均法^[25]，建立考虑温度影响的土体导热系数预测模型，导热系数 K 可由各组分的加权几何平均关系式计算求得：

$$K = \prod_i^n K_i^{\theta_i} \quad (39)$$

式中： K_i 、 θ_i 分别为各组分的导热系数和体积分数。

利用加权几何平均法建立预测模型时，需作如下假定：①温度梯度作用下，视岩土体为固、液、气组成的 3 相混合均质体；②土体孔隙由空气填充，随着土中水分的增加，孔隙中的空气逐渐被水分取代。据此，非饱和土的导热系数可由下式进行计算：

$$K = K_s^{\theta_s} K_w^{\theta_w} K_g^{\theta_g} \quad (40)$$

$$\theta_s = 1 - n = \rho_d / \rho_p \quad (41)$$

$$\theta_w = n S_r \quad (42)$$

$$\theta_g = n(1 - S_r) \quad (43)$$

$$\theta_s + \theta_w + \theta_g = 1 \quad (44)$$

式中：固、液、气相的导热系数和体积分数分别为 K_s 、 K_w 、 K_g 和 θ_s 、 θ_w 、 θ_g ； S_r 、 n 分别为土的饱和度以及孔隙率； ρ_d 为干密度； ρ_p 为颗粒密度。

已有研究表明，干燥状态下温度对土体导热系数的影响较微弱^[7, 12-13]。为此，固相导热系数采用式 (4) 进行估算，即不考虑温度对其导热系数的影响。为考虑温度对液、气相导热系数的影响，利用 Leong 模型中式 (36)、(38) 来分别计算不同温度下液、气相的导热系数。

需要说明的是，若不考虑温度变化的影响，土中主要传热方式是通过接触传导，而温度作用下压实非饱和土中各单相之间的接触情况比较复杂，土中还存在水蒸汽相，虽然 Leong 模型引入传质校正因子 α 用于表征土颗粒间接触热阻对传热过程的影响，但忽略了水蒸汽对土颗粒间接触热阻的影响，且该影响还可能与温度有关，目前较难进行量化。为此，引入模型拟合参数 m 和 p 用于综合考虑上述因素对土体传热的

影响, 对加权几何平均模型作进一步修正如下:

$$K = K_s^{m(1-n)} (K_w^S K_g^{(1-S_r)})^{pn} \quad (45)$$

2 试验结果及分析

2.1 含水率对土体导热系数温度效应的影响

图 3 表示不同含水率 w 下土体导热系数 K 随温度 T 的变化。由图可知, 土体导热系数随着温度和含水率的增大而增大。不同含水率条件下, 温度对土体导热系数的影响程度不同。对于干燥和饱和试样, 温度对土体导热系数的影响比较微弱。对于非饱和试样, 温度对土体导热系数的影响随着含水率的增加呈先增大后减小的变化趋势。例如, 初始干密度为 1.30 g/cm^3 , 含水率分别为 0.5% (饱和度为 1.2%) 和 40.3% (饱和度为 99.7%) 时, 温度对红黏土试样导热系数的影响明显较小(图 3(a))。而当试样的温度大于 40°C 时, 温度对非饱和和土体导热系数的影响开始显著, 且随着试样含水率的增加, 温度对土体导热系数的影响越显著, 随着试样含水率的继续增加, 温度对土体导热系数的影响呈下滑趋势, 直至试样处于饱和状态时, 温度对土体导热系数的影响极小。

从土体三相构成角度来分析, 由于温度对于干试样的导热系数几乎没影响(图 3), 表明土中固相和气相部分的导热系数受温度变化的影响较小。已有研究表明, 土中水的导热系数随温度的变化也较小, 当水温从 2°C 升至 92°C 时, 土中水导热系数的增加不超过 0.1 W/mK ^[26]。换言之, 仅从土中各单相导热系数与温度的变化关系无法较好的解释温度对土体导热系数的影响。在较高环境温度下, 由于非饱和含湿土样(多孔多相材料)内部孔隙结构(包含孔隙大小、形状、分布以及迂曲情况等)、孔隙中水分形态(结合水、自由水以及水蒸汽)、含量及分布情况均比较复杂, 在孔隙尺度上可能会存在一定的温度梯度, 导致土样内部发生水汽潜热传输效应。研究表明, 在温度梯度作用下, 土中水在“液岛”两端会发生蒸发和凝结交替存在的潜热传输作用(即相变热量的传递), 并在热扩散作用下进一步强化土壤内部的热传导, 即为水汽潜热传输效应^[27]。对膨润土持水特性的研究发现, 膨润土的持水特性随着温度的升高反而变弱^[28-29]。在土体导热系数测试过程中, 由于试样的含水率始终保持不变, 因而吸力会随着温度的升高而减小, 对土中水的约束减小, 也就更有利于水汽潜热传输的发生, 导热系数随之增大。王平全等^[30]采用热失重法确定了黏土中结合水类型、界限以及相对含量, 发现土样温度升至 $75\sim 120^\circ\text{C}$ 时, 土中弱结合水转变为自由水。随着试样温

度升高至一定范围内, 部分土中弱结合水将转变成自由水, 导致由温度引起的土中水分子热运动增强, 也为水汽潜热传输提供了良好的物质条件。据此, 本文认为温度对土体传热过程的影响可能取决于水汽潜热传输作用的变化, 且比较依赖于温度、土中水分含量和水汽运移通道。这也就解释了非饱和土体导热系数的温度效应在中等饱和度范围内最为显著, 而在干燥和完全饱和状态时, 温度对土体导热系数的影响较小。

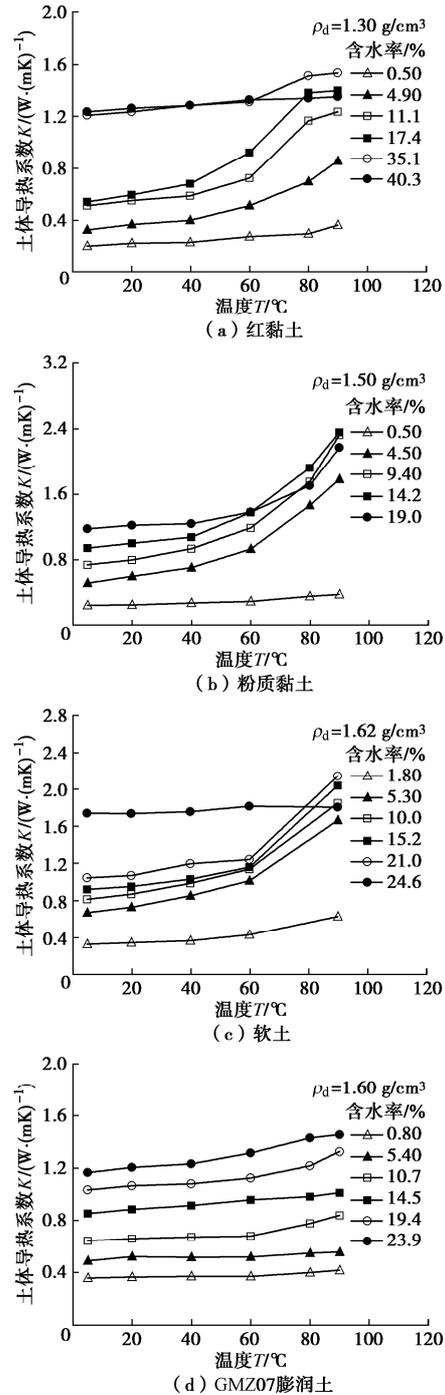


图 3 不同含水率试样导热系数随温度的变化

Fig. 3 Change in thermal conductivity of samples with different water contents with temperature

2.2 干密度对土体导热系数温度效应的影响

图4为不同干密度 ρ_d 下压实试样导热系数 K 随温度 T 的变化。由图可知,相同含水率下,土体导热系数随着温度和干密度的增大而增大,且温度对土体导热系数的影响还与干密度有关。随着压实干密度的增大,温度对试样导热系数的影响明显减小。因而,尽管室温下(20~40°C)较高干密度试样的导热系数更大,但在高温(如90°C)条件下,较低干密度试样的导热系数也可能大于较高干密度试样。由“液岛”理论可知,良好的物质条件(土中水)和顺畅的传热通道(孔隙或裂隙)是水汽潜热传输作用的前提基础。换言之,土体内部可供潜热传输的水分和传热通道数越多,水汽潜热传输越显著,温度对土体导热系数的影响也就更明显。这就可以解释图4中的试验结果,随着干密度的增大,土中孔隙空间被压缩,尤其是大孔隙,致使水汽潜热传输作用受阻,因此土体导热系数的温度效应随干密度的增大而减小。

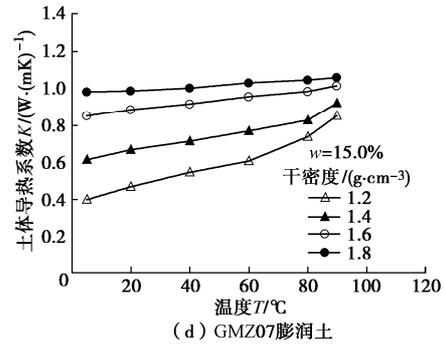
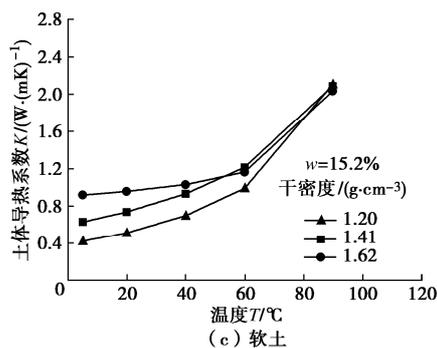
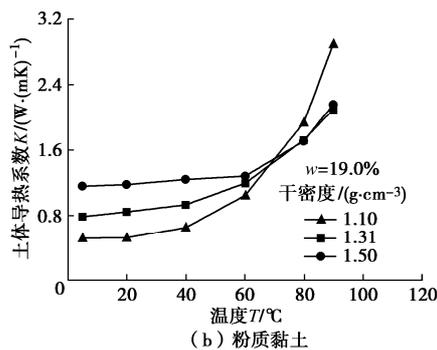
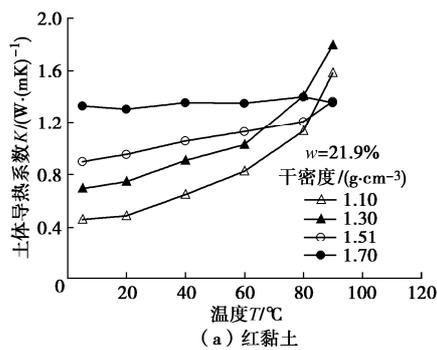


图4 不同干密度试样导热系数随温度的变化

Fig. 4 Change in thermal conductivity of samples with different dry densities with temperature

3 预测模型验证及评估

利用实测的土体导热系数,图5对比了4种模型的预测性能。由图可知,本文提出的加权几何平均模型预测性能最优,特别是对于膨润土,其预测值与实测值的偏差基本在±10%以内。Gori模型的预测效果不佳,其在高温条件下预测值普遍偏大,主要原因在于:①该理论模型中关键参数(如临界含水率 θ_c)取值存在不确定性,需要通过间接估算获取(见式(12), (13)),且该关键参数较难通过实测获得;②Gori模型视土体为立方体单元,其固体颗粒位于土体单元中心,并将土体单元水饱和过程划分成3个阶段来预测导热系数,这些假定不可避免存在不同程度的偏差和不确定性。此外,Gori模型形式上也最为复杂,难以满足工程设计要求。Tarnawski模型和Leong模型的预测效果较好,偏差基本小于±30%。其中,采用Tarnawski模型对不同温度下土体导热系数进行计算时,模型参数 $a\sim g$ 仅由20°C下的实测结果拟合获得,若模型参数 $a\sim g$ 由不同温度下的实测结果拟合获取,Tarnawski模型预测效果应更好,但计算起来也比较繁琐,不利于该模型的推广使用。由式(15), (38)可知,传质增强因子 ζ 是用以反映水汽潜热传输过程水蒸汽扩散速率的影响,Gori模型和Leong模型中气相导热系数计算时并未考虑该因素的影响(即取 $\zeta=1$),忽略土中水蒸汽热扩散作用的影响。据此,本文认为Gori模型和Leong模型的预测偏差可能还与传质增强因子 ζ 的取值有关,今后需深入探究。

为进一步检验加权几何平均模型对其它不同质地土壤的预测性能,利用该模型(加权几何平均模型)对文献[14]中细砂和粉砂质黏壤土的导热系数进行预测分析,结果如图6所示。由图可知,加权几何平均模型对细砂和粉砂质黏壤土的预测效果均较好。实测结果表明,温度对红黏土热传导系数的影响与干密度

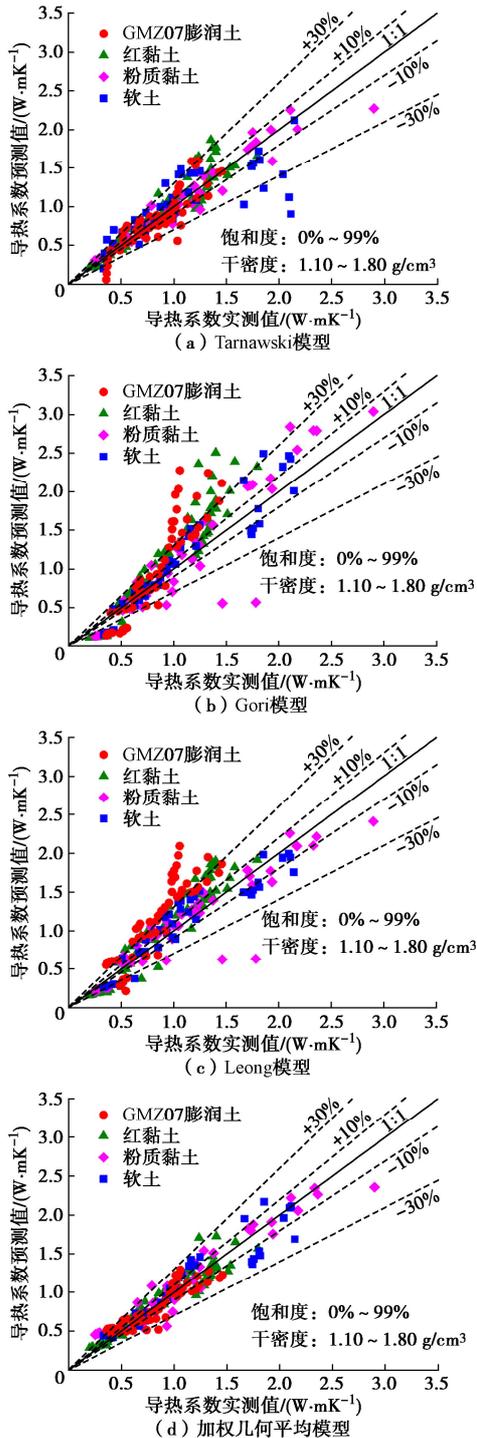


图 5 导热系数模型预测值和实测值对比

Fig. 5 Comparison of measured and predicted thermal conductivities of soil

和含水率均有关 (图 3, 4)。为此, 利用加权几何平均模型预测含水率和干密度变化对土体导热系数温度效应的影响, 进一步检验加权几何平均模型的可靠性。

图 7, 8 分别为含水率和干密度对土体导热系数温度效应影响的预测结果。由图可知, 对于干燥和饱和土体, 温度对其导热系数的影响很微弱。对于非饱和和含湿土体, 温度对其导热系数的影响显著。随着干密度的增大, 土体的导热系数均随之增大, 但温度对土

体传热的影响还受干密度的约束, 这与实测结果的分析是一致的。因此, 本文提出的加权几何平均模型可较好预测土体导热系数温度效应与含水率和干密度间的关系, 具有良好的预测性能。

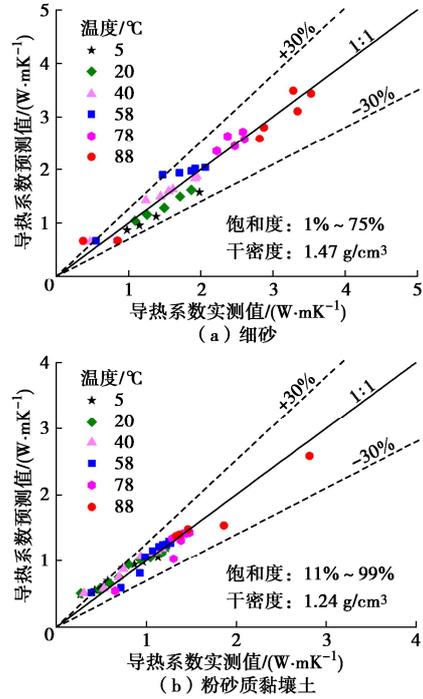


图 6 平均几何模型预测值和实测值对比

Fig. 6 Comparison between predicted and measured values of average geometric model

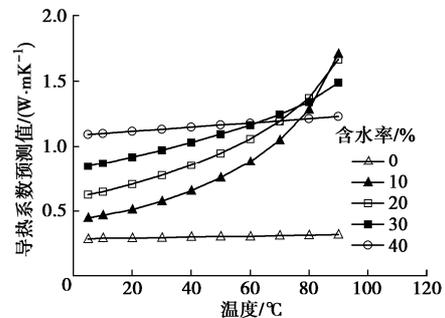


图 7 含水率对土体导热系数温度效应影响的预测

Fig. 7 Prediction of influences of water content on temperature effects of thermal conductivity of soil

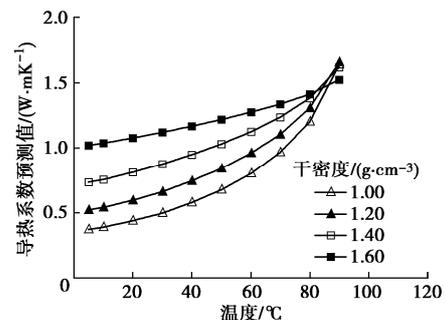


图 8 干密度对土体导热系数温度效应影响的预测

Fig. 8 Prediction of influences of dry density on temperature effects of thermal conductivity of soil

4 结 论

本文利用热探针法测试了不同温度条件下红黏土、粉土、软土和膨润土的导热系数,对土体导热系数的温度效应进行分析。在此基础上,建立了考虑土体导热系数温度效应的加权几何平均模型,并与传统的预测模型进行对比分析,主要得出3点结论。

(1) 土体导热系数随着温度的增加而增大,其温度效应随干密度的增大而减小,温度对非饱和含湿土体导热系数的影响较大,对于干燥和饱和土体导热系数的影响比较微弱。

(2) 基于加权几何平均法,建立考虑温度影响的导热系数预测模型,该模型同时考虑了水分和干密度对土体导热系数温度效应的影响。基于6种土体导热系数的实测结果,对加权几何平均模型和传统模型进行了对比分析,模型的计算结果表明,本文提出的加权几何平均模型预测性能最好,Tarnawski模型和Leong模型预测性能略低于加权几何平均模型,Gori模型预测效果最差。

(3) 温度对土体导热系数的影响可能取决于水汽潜热传输作用的变化,该作用较依赖于温度、土中水分含量和水汽运移通道,当土中可提供潜热传输的水分和水汽运移通道越多,水汽潜热传输作用将越强,温度对土体导热系数的影响也越显著。

参考文献:

- [1] HAN L, YE G L, LI Y H, et al. In situ monitoring of frost heave pressure during cross passage construction using ground-freezing method[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(3): 530-539.
- [2] 王 驹, 苏 锐, 陈伟明, 等. 中国高放废物深地质处置[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(4): 649-658. (WANG Ju, SU Rui, CHEN Weiming, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(4): 649-658. (in Chinese))
- [3] 张虎元, 赵秉正, 童艳梅. 混合型缓冲砌块导热性能及其均匀性研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(S1): 1-9, 18. (ZHANG Huyuan, ZHAO Bingzheng, TONG Yanmei. Thermal conductivity and uniformity of hybrid buffer blocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(S1): 1-9, 18. (in Chinese))
- [4] 陆浩杰, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 黏土热-力学特性对能量桩力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(1): 53-61. (LU Haojie, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Influences of thermo-mechanical properties of clay on mechanical responses of energy piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(1): 53-61. (in Chinese))
- [5] OCLÓN P, BITTELLI M, CISEK P, et al. The performance analysis of a new thermal backfill material for underground power cable system[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **108**: 233-250.
- [6] ALI M A, BOUAZZA A, SINGH R M, et al. Thermal conductivity of geosynthetic clay liners[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(9): 1510-1521.
- [7] 刘晨晖, 周 东, 吴 恒. 土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1877-1886. (LIU Chenhui, ZHOU Dong, WU Heng. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1877-1886. (in Chinese))
- [8] ABU-HAMDEH N H, REEDER R C. Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(4): 1285-1290.
- [9] CÔTÉ J, KONRAD J M. Assessment of structure effects on the thermal conductivity of two-phase porous geomaterials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, **52**(3/4): 796-804.
- [10] 李建东, 王 旭, 张延杰, 等. 水蒸气增湿非饱和黄土热湿迁移规律研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 186-192. (LI Jiandong, WANG Xu, ZHANG Yanjie, et al. Study of thermal moisture migration of unsaturated loess with water vapor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(1): 186-192. (in Chinese))
- [11] 徐永丽, 董子建, 周吉森, 等. 冻融及不同温度下石灰改良盐渍土动力参数研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(1): 90-97. (XU Yongli, DONG Zijian, ZHOU Jisen, et al. Dynamic parameters of lime-improved saline soil under freeze-thaw and different temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(1): 90-97. (in Chinese))
- [12] 陆 森, 任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(7): 13-18. (LU Sen, REN Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, **25**(7): 13-18. (in Chinese))
- [13] HIRAIWA Y, KASUBUCHI T. Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature (5-75°C)[J]. European Journal of Soil Science, 2000, **51**(2): 211-218.

- [14] DE VRIES D A. Thermal properties of soils[M]// Physics of the Plant Environment. New York: John Wiley & Sons, 1963: 210-235.
- [15] CAMPBELL G S, JUNGBAUER J D JR, BIDLAKE W R, et al. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity[J]. Soil Science, 1994, **158**(5): 307-313.
- [16] TARNAWSKI V R, GORI F, WAGNER B, et al. Modelling approaches to predicting thermal conductivity of soils at high temperatures[J]. International Journal of Energy Research, 2000, **24**(5): 403-423.
- [17] TARNAWSKI V R, LEONG W H, BRISTOW K L. Developing a temperature-dependent Kersten function for soil thermal conductivity[J]. International Journal of Energy Research, 2000, **24**(15): 1335-1350.
- [18] TARNAWSKI V R, LEONG W H, GORI F, et al. Inter-particle contact heat transfer in soil systems at moderate temperatures[J]. International Journal of Energy Research, 2002, **26**(15): 1345-1358.
- [19] LEONG W H, TARNAWSKI V R, GORI F, et al. Inter-particle contact heat transfer model: an extension to soils at elevated temperatures[J]. International Journal of Energy Research, 2005, **29**(2): 131-144.
- [20] 张延军, 于子望, 黄芮, 等. 岩土热导率测量和温度影响研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 213-217. (ZHANG Yanjun, YU Ziwan, HUANG Rui, et al. Measurement of thermal conductivity and temperature effect of geotechnical materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 213-217. (in Chinese))
- [21] JOHANSEN O. Thermal Conductivity of Soils[D]. Trondheim: Trondheim University, 1977.
- [22] GORI F, CORSANITI S. Theoretical prediction of the soil thermal conductivity at moderately high temperatures[J]. Journal of Heat Transfer, 2002, **124**(6): 1001-1008.
- [23] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, SAXTONN K E. Estimation of soil water properties[J]. Transactions of the ASAE, 1982, **25**(5): 1316-1320.
- [24] WEBB S W, HO C K. Review of porous media enhanced vapor-phase diffusion mechanisms, models, and data: does enhanced vapor-phase diffusion exist?[J]. Journal of Porous Media, 1998, **1**(1): 71-92.
- [25] WOODSIDE W, MESSMER J H. Thermal conductivity of porous media. II. consolidated rocks[J]. Journal of Applied Physics, 1961, **32**(9): 1699-1706.
- [26] NIKOLAEV I V, LEONG W H, ROSEN M A. Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range[J]. International Journal of Thermophysics, 2013, **34**(6): 1110-1129.
- [27] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1957, **38**(2): 222.
- [28] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(1): 287-296.
- [29] ZHU Z C, SUN D A, ZHOU A N, et al. Calibration of two filter papers at different temperatures and its application to GMZ bentonite[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(6): 509.
- [30] 王平全, 李晓红. 用热失重法确定水合黏土水分含量及存在形式[J]. 天然气工业, 2006, **26**(1): 80-83, 164. (WANG Pingquan, LI Xiaohong. Thermal-weightlessness method to determine water content and existing form of hydratable clay[J]. Natural Gas Industry, 2006, **26**(1): 80-83, 164. (in Chinese))