

淤泥质黏土火灾高温下导热系数的试验研究

徐 婕^{1, 2}, 朱合华^{1, 2}, 闫治国^{1, 2*}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 对火灾高温下隧道衬砌结构周围饱和软黏土的热传导特性进行了试验研究, 旨在进一步探讨作用于隧道结构上的荷载变化, 以便准确评价其安全状态。采用热探针程序法(美国材料与试验协会(ASTM)确定土体和软岩导热系数的标准方法), 应用自行研制的高温土体导热系数测定仪测定了上海淤泥质黏土在高温下的导热系数。试验分别测定了不同温度及不同含水率条件下土样的导热系数, 并以 KD2 导热系数测定仪作为校准仪器对试验结果进行了校正。试验结果表明: 导热系数随着温度的升高而增大, 且其增大的速率随温度的增加而减小, 特别是对含有机质的淤泥质黏土因有机质的高温分解而使得这种降低更加明显; 此外, 在不同高温下土体导热系数随含水率的增加而增大。

关键词: 淤泥质黏土; 高温; 导热系数; 热探针程序法

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)11-2108-06

作者简介: 徐 婕(1988-), 女, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事隧道及地下工程防灾研究。E-mail: xujiaxiaomo@yahoo.cn。

Experimental studies on coefficient of thermal conductivity of silty clay

XU Jie^{1, 2}, ZHU He-hua^{1, 2}, YAN Zhi-guo^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.

Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The researches on heat conduction characteristics of soft soil under high temperature are performed for further determining the load change on tunnel lining structure surrounded by saturated soft soil and accurately evaluating its safety under high temperature of fire. The experiment adopts the method of thermal needle probe procedure, proposed by American Society for Testing and Materials (ASTM) as the standard method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock, by using self-made apparatus for coefficient of thermal conductivity of soil to measure the coefficient of thermal conductivity of Shanghai mucky clay under high temperature. The thermal conductivity of soil samples with different water contents is measured respectively under different temperatures. At the same time, as calibrating instrument, the KD2 thermal conductivity measuring apparatus is used to calibrate the test results. The test results indicate that the thermal conductivity of soil with the same water content increases with the increase of temperatures. When the temperature is low, the increase rate of thermal conductivity of soil is higher, and when the temperature is high, the increase rate of thermal conductivity of soil is lower, which is more serious due to the decomposition of the organic soil under high temperatures. Further, the thermal conductivity of soil with the same temperature increases with the increase of water content.

Key words: silty clay; high temperature; coefficient of thermal conductivity; thermal needle probe procedure

0 引 言

近年来, 交通隧道面临着火灾频发的问题。由于隧道内排烟与散热条件较差, 使得隧道内发生火灾时具有升温速度快、达到温度高(1000℃以上)、持续时间长、人员疏散困难、救火难度大等特点, 往往会造成较大的财产损失和人员伤亡。

值得关注的是, 对于软土隧道混凝土衬砌结构, 试验表明: 一方面因火灾持续时间长, 导致隧道结构外围土体温度不断升高; 另一方面, 即使火焰熄灭后,

周围土体温度还将持续升高达 100℃以上。因此, 火灾高温除了因混凝土结构高温爆裂对其本身造成直接损伤之外^[1-4], 还会引起隧道周围饱和水土层结构和力学性质的变化^[5-7], 且土体中的水因气化而产生水蒸气压力增量, 进而导致爆裂损伤隧道混凝土结构安全性

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978197); 教育部创新团队发展计划项目(IRT1029); 上海市领军人才计划与曙光跟踪计划项目

收稿日期: 2011-11-14

*通讯作者

在外荷载增加的条件下进一步降低。土体的导热系数是决定热量传播速度和土体温度场分布的关键因素之一, 因此, 研究高温下土体导热系数的变化规律有助于软土隧道结构应对火灾高温的设计优化、火灾后安全评价方法以及救援措施的确定。

国内外关于含水率、孔隙率、饱和度、密实度等因素对土体导热系数的影响规律已进行了诸多研究^[8-10]。文献^[11~17]从不同的角度阐述了温度对于土体导热系数的影响。何发祥等^[10]认为常温状态下温度对导热系数产生的影响很小。在对特殊土温度效应研究方面, 邓友生等^[12]采用热线法实验测定了不同温度下具有一定含水率的含盐土的导热系数, 结果表明: 硫酸钠盐土在含盐量相同时, 其导热系数在负温区随温度升高而减小, 在正温区则增大; 付厚利等^[13]利用 ANSYS 软件对冻土的等效导热系数进行了模拟, 发现导热系数的变化与土体中各点温度的下降速度存在着较强的非线性关系; 周亚素等^[14]通过对现场测定土体导热系数影响因素的分析, 指出土体温度的高低会引起水分迁移量和速率的变化, 从而影响土体的导热系数; 邓朝晖^[15]认为温度升高时材料固体分子热运动增强, 且材料孔隙中的空气导热和孔壁间的辐射作用也有所增强, 因此, 温度对导热系数具有较大的影响, 导热系数随着温度的升高而增大。在地热能开发应用方面, 高青等^[16]运用二维瞬态有限元模型分析了竖孔 U 型管地下换热器对其周边土体导热系数的变化规律: 随着土体初始温度的增加, 导热系数几乎直线上升; 宋春节^[17]通过对大地有效导热系数测试技术的研究, 发现了单位埋深输入热量不同对导热系数测试产生了较大影响, 而单位埋深输入热量的增加, 意味着在管道周围土体温度的上升。

综上所述, 在特定条件下, 温度对于土体导热系数有着较大的影响。但是已有研究主要是针对盐土、冻土等特殊土体或者地源热泵特定环境下土体的导热系数随温度的变化规律, 有的研究工作仅进行了理论分析, 无试验结果验证。更加需要引起注意的是, 现有的研究均集中在 100 ℃ 以下的试验温度, 缺少对火灾工况下土体达到 100 ℃ 以上的高温导热系数变化规律的试验研究。为填补这一空白, 本文首次以上海淤泥质黏土(位于地下 10 m 深处, 是轨道和越江交通隧道所处的主要地层)为对象, 对火灾高温下的导热系数开展了试验研究。

1 试验方法、土体和装置

1.1 试验方法

热线法是测量非金属固体材料导热系数的一种非

稳态测定方法, 具有测试装置简单和测量时间短的优点, 且适用于极宽的温度范围, 可以避免水分的迁移对测量结果的影响。其原理是在均温的各项同性均质试样中放置一根电阻丝, 作为热线。测试时, 在热线上施加一个恒定的加热功率, 热线和其附近试样的温度会升高。根据测量热线本身或平行于热线的一定距离上的温度随时间上升的关系, 即可以确定试样的导热系数^[18]。

美国材料与试验协会 (ASTM) 将热探针程序法作为确定土体和软岩导热系数的标准方法, 该法即是以热线法原理为试验依据的, 此标准中规定重塑土试样的最小直径为 51 mm (2 英寸), 长度为 200±30 mm (8.0±1 英寸)。热探针程序法假设如下: ①被测土体试样内部热物性均匀一致; ②有较大的探针高度与直径比, 探针为线热源, 传热过程按柱坐标轴对称的一维问题处理; ③加热棒的功率保持为定值; ④忽略探针插入土体试样时对于土体的扰动; ⑤测试前, 被测土体内部各点温度相等; ⑥不考虑探针内部温度不均匀分布的影响; ⑦探针与土体之间无接触热阻。

热线法测量土体导热系数的基本原理是基于线热源理论中的热量传导方程。假设介质中有一半径为 r_0 的无限长金属探针, 由于金属探针的导热率远大于周围介质的导热率, 当 r_0 很小时可以把它处理为等温线热源。当时间 $t > 0$ 时, 对探针施加恒定功率加热, 其单位长度探针的发热量为 Q 。根据 ASTM D5334-08, 如果将稳定热量在一定时间段加于常温加热器, 相应温度变化为^[19]

$$\Delta T = -\frac{Q}{4\pi\lambda} E_i\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) \quad (0 < t \leq t_1) \quad (1)$$

式中 t 为加热时间 (s); ΔT 为开始计时起的温度升高量 (℃); Q 为加热棒单位长度加热功率 (W/m); r 为被测点离加热棒的距离 (m); D 为热扩散系数 (m^2/s); λ 为导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$); E_i 表示进行指数积分; t_1 为加热时间 (s)。

对上式进行近似的指数积分是一个简化的解法, 且能得到合适的结果^[19]:

$$\Delta T \approx \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln(t) \quad (0 < t \leq t_1) \quad (2)$$

由于试验初始和结束阶段(分别代表瞬时条件和边界影响)的数据不适于结果分析, 即在 $T(t) - \ln t$ 的曲线中, 找出直线段, 求其斜率即可, 则导热系数计算公式为^[19]

$$\lambda = \frac{CQ}{4\pi} \left[\frac{\Delta T}{\Delta(\ln t)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

式中, C 为校正系数, 具体表达式为^[19]

$$C = \frac{\lambda_{\text{material}}}{\lambda_{\text{measured}}} \quad (4)$$

本文试验中， $\lambda_{\text{material}}$ 为 20℃ 下由 KD2 测定仪测量的导热系数， $\lambda_{\text{measured}}$ 为 20℃ 下自制测定仪测量的导热系数。

试验中，为避免由主观选取分析时间范围所引起的结果偏差，每组数据中选择的起始和结束时间保持一致，直线段斜率通过线性回归得到^[19]。

1.2 试验土体

试验土体为取自上海市徐汇区宜山路以北、桂菁路以西的漕河泾开发区某工程项目的地下土体。此场地为古河道沉积区，自地表以下 110.46 m 深度范围内为第四系河口、滨海、浅海、沼泽相沉积层，主要由饱和黏性土、粉性土以及沙土组成。本文试验采用土体为拟建场地埋深为 9.33 m 处的灰色淤泥质粉质黏土，该土层具有高压缩性、高灵敏度、低强度的特性。试验用土体物理力学参数：重度为 17.4 kN/m³，内摩擦角 φ 为 20.0°，黏聚力为 11 kPa，天然含水率为 44.15%，孔隙比为 1.256，液限为 40.78%，塑限为 25.14%，饱和度为 98.5。

试验土样为直径 61 mm，高度 200 mm 的圆柱体。试验分为 100℃ 以下和 100℃ 以上（包括 100℃）两大组。其中，100℃ 以下分为常温状态土体和 90℃ 的土体，100℃ 以上的土体分 100℃、115℃、135℃、150℃、162℃、190℃ 和 205℃ 七种不同的温度。对应每个工况，试验土样为 3 组以确保结果的稳定。表 1 为土样分别需测定的温度条件、含水状态和使用的仪器。

表 1 土样工况

Table 1 Working conditions of soil samples		
温度	对应含水状态	测定仪器
20℃	干燥, 16.65%, 饱和	KD2 测定仪自制测定仪
90℃	干燥, 16.65%, 饱和	自制测定仪
100℃ 以上	干燥	自制测定仪

1.3 试验装置

(1) KD2 导热系数测定仪

KD2 导热系数测定仪由手持式数据显示装置和可以插入被测介质中的探针组成，其原理亦同热线法，测量精度为 5%。其优点为测量时间短、精度高，对于土体试件尺寸无要求，且探针直径非常小，可认为是线热源。但由于其工作环境温度规定为 -20℃~60℃，不能测量更高温度下土体的导热系数，故用于测量本文试验对照组常温下土体的导热系数，对下述自制导热系数测定仪的试验结果进行校正，校正系数公式为式 (4)。

(2) 自制导热系数测定仪

根据非稳态测定理论，若假定在土样中存在一个理想的无限细长的线热源，并且该线热源的发热功率为一个定值，则在该线热源的作用下，线热源本身及其周围土体的温度都会上升，而线热源温度上升的速率则取决于其周围介质的导热系数的大小。因此，测出升温速率即可得到导热系数。

目前国内市面上出售的土体导热系数测定仪器均无法在高温下（100℃ 以上）使用，故本文试验依照 KD2 导热系数测定仪的原理，以及 ASTM 规定的热探针程序法中仪器组装方法和设计简图，自行设计并组装了一台可以在高温下测定土体导热系数的导热系数测定仪，如图 1 所示。此仪器由温控箱和探针两部分组成。探针由不锈钢外壳、加热原件和热电偶组成，为线热源，提供恒定功率。在试验中假设探针半径可以忽略不计，则不计轴向热损失，可认为是一维径向导热。探针选用不锈钢外壳和康铜丝作为加热元件；热电偶紧贴加热元件，插入深度为土样一半高度（100 mm）处，用于测量探针在加热过程中各个时刻的温度；为了减小探针内部热容量和内部空气对流造成的影响，在探针内部填充热容量小的环氧树脂。温控箱与探针相连，内部装有电流表和电压表，用于测量探针在加热过程中的电压和电流。



图 1 自制的土体导热系数测定仪

Fig. 1 Self-made test apparatus for coefficient of thermal conductivity of soil

2 试验步骤

首先，对试验所需土体进行晾晒、粉碎、过筛，收集直径小于 0.5 mm 的干燥土颗粒。这样做的原因是：土体为多孔松散介质，常温时，松散颗粒型材料的导热系数与材料的粒径有关，粒径大时，颗粒之间的孔隙尺寸增大，其间空气的导热系数受温度变化的影响程度必然增大。因此，粒径越小，其导热系数受温度变化的影响越小。然后，配置不同含水率的土样，分别装入直径 61 mm、高度 200 mm 的不锈钢筒，放

入固结铁箱加压固结。固结之后得到的土样的含水率分别为干燥, 16.56%和饱和土样。为得到不同温度的土体, 将土样放在烘箱中, 调节不同的温度, 然后分别用 KD2 导热系数测定仪测量 20℃时各种含水率土样的导热系数, 将其和用自制导热系数测定仪测量结果进行对比, 得到校正系数 C , 对自制导热系数测定仪测定的各种工况下土样的导热系数进行校正。

3 试验结果及分析

3.1 $\ln t - T$ 关系曲线斜率取值

在试验过程中直接测量到的数据是探针在加热的过程中随时间变化的温度升高值。需要先拟合确定时间的自然对数 $\ln t$ 和温度 T 的函数关系图的斜率, 再由式 (3) 计算得到导热系数。在测量初始阶段, 电流不稳定等因素会影响导热系数的测量; 而在测量结束阶段, 在探针达到一定温度、切断电源后, 因探针内加热棒的余温仍然会散发出热量而使探针的热电偶的温度继续上升, 但此上升的温度并非探针内通入稳定电流的固定电功率造成的, 所以, 开始和结束阶段的测量数据不能用于分析, 按照 ASTM 的规定, 可取整个试验过程数据曲线中的近似线性阶段部分确定斜率。为避免因选用数据测量时间范围大小的人为因素影响而使数据分析产生偏差, 对同一个探针的测量数据分析时, 必须选择相同时间范围内的温度数据进行分析比较。在本文试验中, 通过对所有数据的总体分析, 各组测量数据的直线段的时间范围取值为自探针通入电流后的 35~65 s。对所选取的近似直线段数据作最小二乘法拟合得到其斜率, 代入式 (3) 即可计算出导热系数。取值方法如图 2 所示。图 2 为在 135℃时, 干燥土体的试验曲线。从图 2 中取 30~65 s 的近似直线段进行拟合, 其斜率即为 401.7℃/s。表 2 为由式 (4) 给出的校正系数值。

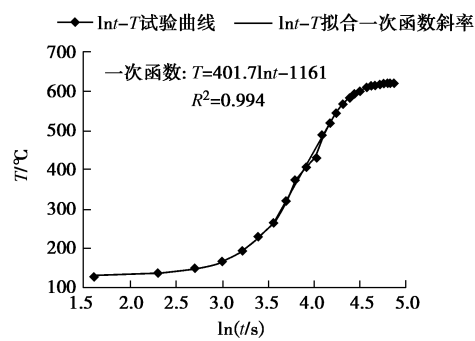


图 2 135℃干燥土体中探针温度 and 时间的自然对数关系
Fig. 2 Relationship between temperature of probe and logarithm of time for dry soil under 135℃

表 2 校正系数表

Table 2 Correction factors			
测定与计算值	饱和土样	16.56%含水率土样	干燥土样
KD2 测定仪	1.12	1.05	0.14
自制测定仪	1.354694	1.276923	0.176340
C 值	0.8268	0.8223	0.7939
C 平均值	0.8143		

3.2 校正后导热系数和温度、含水率关系与分析

图3为27组干燥土样数据拟合的导热系数与温度的关系曲线。可以用二次函数 $\lambda = -1.0 \times 10^{-7} T^2 + 7.0 \times 10^{-5} T + 0.142$ 很好地表达, 相关系数 R 值为 0.995。

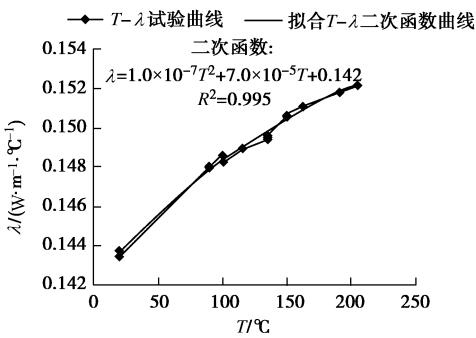


图 3 干燥土样导热系数和温度的关系
Fig. 3 Relationship between coefficients of thermal conductivity of dry soil and temperatures

图4为各个工况土样的导热系数求平均值后的导热系数和温度的关系曲线。表3给出的是图4中各个温度阶段曲线的斜率。

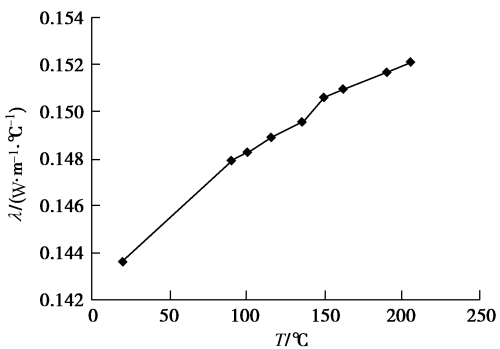


图 4 导热系数平均值和温度的关系
Fig. 4 Relationship between coefficients of thermal conductivity and temperatures

表 3 $T - \lambda$ 不同温度段的斜率

Table 3 Slopes of various temperature ranges of $T - \lambda$				
温度/℃	20~90	90~100	100~115	115~135
导热系数变化率/ 10^{-5}	6.25	3.64	3.51	3.44
温度/℃	135~150	150~162	162~190	190~205
导热系数变化率/ 10^{-5}	6.09	3.35	2.62	2.61

从表 3 可以看出, 干燥的土体的导热系数变化速率随着温度的增加而增加。

关于淤泥质黏土的导热系数随着温度、含水率的变化机理，下面做进一步的分析：

(1) 土体是一种最为典型的多孔介质，固体骨架遍及多孔介质所占据的体积空间，孔隙空间相互连通，其内的介质可以是气相流体、液相流体或者气液两相流体。多孔介质的主要物理特征是孔隙尺寸极其微小，比表面积数值很大^[11]。

由多孔介质内的传热过程分析可知，它包括固体骨架（颗粒）之间相互接触及孔隙中流体的导热过程；孔隙中流体的对流换热；固体骨架（颗粒）或者气体间的辐射换热^[20]。大量实验研究和理论分析表明，对颗粒直径不超过4~6 mm的多孔介质，其孔隙中流体的对流换热贡献可以忽略不计，而辐射换热的贡献，只是在固体颗粒之间温差较大，孔隙为真空时才比较明显^[20]，所以在分析时，假设传热过程中只有热传导现象的存在。在固体中，热传导过程是由微观粒子的热运动引起的，即微观粒子围绕固定的平衡位置振动，并将能量依次地传给相邻的微观粒子。随着温度的上升，微观粒子的热运动会更加剧烈，所以导热系数增大。

(2) 水是导热系数最高的非金属液体。它的导热系数的范围为0.55~0.675 W/(m·℃)，大约为空气导热系数的25倍^[11]。水的导热系数最初随温度的升高而上升，约在120℃时达到最大值，温度再上升时，导热系数下降。各种气体的导热系数的通常范围为0.0052~0.6 W/(m·℃)，气体导热是通过气体分子在热运动时的相互碰撞，在温度升高时，气体分子的热运动加强，其导热系数增大^[16]。由于土颗粒、水和空气的导热系数都是随温度的升高而增大的，所以土体的导热系数与温度呈正相关。

表4为100℃以下，导热系数随含水率的变化规律。导热系数随着含水率的增加而变大，并且干燥土体的导热系数比湿润土的导热系数的小很多，基本相差一个数量级。这是因为当孔隙中含水时，水的导热系数为0.58 W/(m·℃)，比空气的导热系数0.029 W/(m·℃)大25倍左右。所以土体中的小孔隙气体被水分替代以后，整体的导热系数势必增大；同时水的存在使固体和气体的接触面上形成一种水膜，这层水膜在固体和孔隙气体之间形成一种连接作用，大大减小接触热阻，导致土体的导热系数也增大。

(3) 在干燥土体的各个温度阶段，随着温度的升高，导热系数的增加速率逐渐减低，这是由于试验用土——上海地区淤泥质粉质黏土，有机质含量较高，在温度达到90℃以上时，有机质将在不同的温度阶段分解，从而使固体颗粒减少，土体孔隙率增加。孔隙度增加意味着土体在以下两个方面发生变化：单位体积内有更少的固体物质和更多的孔隙气体。在通常状

态下，土颗粒的导热系数是空气的几十倍^[11]，当土体中参与导热的孔隙气体越多，显然土体的导热系数就会越小；其次，固体土颗粒的导热是靠固体分子的振动传播的，而气体导热主要依靠气体分子的扩散作用，两者的导热机理不同，导致两者的接触界面上存在较大的接触热阻^[20]，土体的孔隙度增大，则固体颗粒与孔隙气体的接触面就越多，接触热阻会变大，换言之，导热系数会变小。温度上升引起的导热系数的增大与有机物质的分解引起的导热系数的下降相互影响，引起在高温时，导热系数的变化速率减缓。

表 4 导热系数与含水率关系

Table 4 Relationship between coefficients of thermal conductivity and water contents

含水率/%	导热系数/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	
0.0	0.143594(20℃)	0.147970(90℃)
16.56	1.039798(20℃)	1.061283(90℃)
饱和	1.103127(20℃)	1.128310(90℃)

4 结 论

本文采用自制的土体导热系数测定仪，根据ASTM推荐的热探针程序法，对上海地区淤泥质黏土的高温传热特性做了较深入的试验研究，主要结论如下：

(1) 由于土颗粒、水和空气的导热系数均随着温度的升高而增大，土体导热系数也随着温度的升高而增大，其变化规律可用二次函数 $\lambda = -1.0 \times 10^{-7} T^2 + 7.0 \times 10^{-5} T + 0.142$ 表述。

(2) 由于土体中有机质的分解导致固体颗粒的减少以及接触热阻的增加，土体导热系数的增加速率随着温度的增加而逐渐减小。

(3) 土体导热系数随含水率的增加而增大。由于水的导热系数远远大于空气的导热系数，试验结果表明干燥土的导热系数比湿润土的导热系数小一个数量级左右。

致 谢：感谢美国 Kansas 大学韩杰教授为本试验研究提供了美国材料与试验协会最新版的试验规程。同时，感谢同济大学张旭老师、陈宝老师和吴晓峰老师在试验过程中给予的指导和帮助。

参考文献：

[1] ONO K. Fire design requirements for various types of tunnel [M]. Seoul: Keynote Lecture of ITA WTC 2006, 2006.
[2] SAVOV K, LACKNER R, MANG H A. Stability assessment of shallow tunnels subjected to fire load[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(8): 745 - 763.
[3] 闫治国. 隧道衬砌结构火灾高温力学行为及耐火方法研究

- [D]. 上海: 同济大学, 2007. (YAN Zhi-guo. A study on mechanical behaviors and fireproof methods of tunnel lining structure during and after fire scenarios[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [4] YAN Z G, ZHU H H. Experimental study on mechanical behaviors of tunnel lining under and after fire scenarios[C]// Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress, Prague, 2007: 1805 - 1809.
- [5] CUI Yu-jun, YE Wei-min. On modeling of thermo-mechanical volume change behavior of saturated clays[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(21): 3903 - 3910.
- [6] HUECKEL T, BALDI G. Thermoplasticity of saturated clays: experimental constitutive study[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(12): 1778 - 1796.
- [7] TANAKA N, THOMAS J, CRILLLY G. Stress-strain behavior of reconstituted illicit clay at different temperatures[J]. Engineering Geology, 1997, **47**: 339 - 350.
- [8] 蒋建平, 李晓昭, 高广运, 等. 南京地铁(融)土热物理参数试验研究[J]. 中国铁道科学, 2009, **30**(1): 13 - 16. (JIANG Jian-ping, LI Xiao-zhao, GAO Guang-yun, et al. Experimental study on the thermophysical parameters of (thawed) soil in the foundation of Nanjing metro engineering[J]. China Railway Science, 2009, **30**(1): 13 - 16.(in Chinese))
- [9] 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. (in Chinese))
- [10] 何发祥, 黄 英. 用 BP 网络求解土体的导热系数[J]. 岩土力学, 2000, **21**(1): 84 - 87. (HE Fa-xiang, HUANG Ying. Solution of thermal conduction coefficient from BP network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(1): 84 - 87. (in Chinese))
- [11] 刘晓燕, 郑春媛, 黄彩凤. 多孔材料导热系数影响因素分析[J]. 低温建筑技术, 2009, **31**(9): 121 - 122. (LIU Xiao-yan, ZHEN Chun-yuan, HUANG Cai-feng. Analysis effect factor of thermal conductivity for porous materials[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, **31**(9): 121 - 122. (in Chinese))
- [12] 邓友生, 何 平, 周成林. 含盐土导热系数的试验研究[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(3): 319 - 323. (DENG You-sheng, HE Ping, ZHOU Cheng-lin. An experimental research on the thermal conductivity coefficient of saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(3): 319 - 323. (in Chinese))
- [13] 付厚利, 刘 勇. 深土冻结温度场导热系数识别及应用[C]// 矿山建设工程新进展—2007 全国矿山建设学术会议文集. 2007. (FU Hou-li, LIU Yong. Heat conductivity identification and application of deep earth freezing temperature field[C]// The Academic Meeting of Mining Construction, 2007. (in Chinese))
- [14] 周亚素, 雷 鸣. 现场测定土壤导热系数的影响因素分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2009, **35**(4): 472 - 477. (ZHOU Yan-su, LEI Ming. Influence factors analysis on in-situ test of ground thermal conductivity[J]. Journal of Doonghua University(Natural Science), 2009, **35**(4): 472 - 477. (in Chinese))
- [15] 邓朝晖. 建筑材料导热系数的影响因素及测定方法[J]. 工程质量, 2008(7): 15 - 18. (DENG Zhao-hui. Affecting factors and test methods on thermal conductivity of building materials[J]. Quality of Civil Engineering and Construction, 2008(7): 15 - 18. (in Chinese))
- [16] 高 青, 余传辉, 马纯强, 等. 地下土壤导热系数确定中影响因素分析[J]. 太阳能学报, 2008, **29**(5): 581 - 585. (GAO Qing, YU Chuan-hui, MA Chun-qiang. Analysis of influence factors on determining the ground thermal conductivity[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008, **29**(5): 581 - 585. (in Chinese))
- [17] 宋春节. 地源热泵系统关键技术的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008: 214 - 221. (SONG Chun-jie. Study of several key technical problems of ground-source heat pump system[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008: 214 - 221. (in Chinese))
- [18] 乔亚玲. 薄质隔热涂层导热系数的测定方法及其量测精度的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007: 6 - 7. (QIAO Ya-ling. A new method of thermal conductivity coefficient test for heat-insulated filmsy coating and its measuring accuracy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007: 6 - 7. (in Chinese))
- [19] D5334—08 American Society for Testing and Materials. Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure1[S]. 2008.
- [20] 刘 伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (LIU Wei, FAN Ai-wu, HUANG Xiao-ming. Heat and mass transfer theory and application of porous media[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))