

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.018

# 下蜀土导热系数与电阻率和剪切波速关系模型 试验研究\*

刘洋<sup>1</sup>, 张丹<sup>1</sup>, 桑宏伟<sup>1</sup>, 周殷康<sup>1</sup>, 阎长虹<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093; 2. 南京大学金陵学院, 江苏南京 210089)

**摘要:** 针对导热系数现场难以快速、准确测试的问题, 以下蜀土为研究对象, 建立了依据电阻率和剪切波速估算导热系数的关系模型。分别采用 HC-110 热导测试仪、四极法和弯曲元测试系统对 20℃、含水率为 10%~21%、干密度为 1.5~1.8 g/cm<sup>3</sup> 下蜀土的导热系数、电阻率和剪切波速进行了测试, 得到了三者与含水率和干密度之间函数关系, 建立了导热系数与电阻率和剪切波速的关系模型, 经检验, 该关系模型拟合度高, 为工程实践中利用电阻率和剪切波速快速确定土体导热系数提供了新的方法。

**关键词:** 导热系数; 电阻率; 剪切波速; 拟合; 关系模型

**中图分类号:** P642    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0453-07

## Experimental Study on Relationship between Thermal Conductivity, Resistivity and Shear Wave Velocity of Xiashu Loess

LIU Yang<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>, SANG Hongwei<sup>1</sup>, ZHOU Yinkang<sup>1</sup>, YAN Changhong<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Nanjing University Jinling College, Nanjing 210089, China)

**Abstract:** In view of the difficulty of rapid and accurate testing of the thermal conductivity at the site, rammed soils were used in this study, and a relational model for estimating thermal conductivity based on resistivity and shear wave velocity was established. The HC-110 thermal conductivity tester, quadrupole method and bending element test system respectively used for the thermal conductivity of soil at 20℃, water content between 10%-21%, and dry density between 1.5 and 1.8 g/cm<sup>3</sup>. The resistivity and shear wave velocity were tested and the relationship between the moisture content and the dry density was obtained. The relationship between thermal conductivity, resistivity and shear wave velocity was established. After testing, the relational model has a high degree of fitness. It provides a new method for rapidly determining the thermal conductivity of soil using resistivity and shear wave velocity in engineering practice.

**Keywords:** thermal conductivity; resistivity; shear wave velocity; fitting; relational model

\* 收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572271)、江苏省自然科学基金项目(BK20161239)资助

作者简介: 刘洋(1995-), 男, 硕士。主要从事浅层地温能的研究。Email: 15639100548@163.com

通讯作者: 张丹(1976-), 男, 副教授。主要从事浅层地温能开发及其地质环境效应研究。Email: zhangdan@nju.edu.cn

## 引言

土体导热系数在浅层地温能利用设计过程中起着至关重要的作用,是计算地下浅层能量平衡、温度分布特征和蓄能能力的基本参数之一。目前,导热系数的测量方法主要有原位试验、室内测试、组分类型辨别法和探针法四种<sup>[1-2]</sup>。

室内测试包括稳态测试法和非稳态测试法。由于室内测试法脱离原始环境,测量数据与实际情况偏差较大。原位测试法需要在现场进行热响应试验,常用柱热源模型和线热源模型计算场地的综合导热系数,操作复杂,成本较高,测试时间较长。探针法早在1833年就被提出,结合线热源模型可在工程现场简洁方便地测出土壤的导热系数,但是加热范围很小,不足以反映整个土体的导热系数<sup>[3]</sup>。组分类型辨别法利用钻孔取出的试样分析组分,根据岩石热物性参数表得到导热系数的大致范围<sup>[4]</sup>。组分类型辨别法得到的导热系数准确性不高,不利于实际施工取值。而且不同地区、不同深度得到的数据千差万别。可见,能在现场快速、准确地测量不同深度土体导热系数的方法目前还不成熟。

土体电阻率是表征土体导电性的基本参数,可以反映土的物理性质和状态。土体电阻率是工程勘察阶段比较容易获取的土的基本物性参数之一,测量方法简单、快速,可信度高。

土体剪切波速在土力学的研究和地基工程设计中起着至关重要的作用,在室内或工程场地内都方便易得。目前,剪切波速已成为表征土体物理、力学性质和评价土体扰动或地基处理效果的重要指标之一<sup>[5-6]</sup>。

俞亚南等<sup>[7]</sup>通过对粉土和黏土导热系数的研究,发现在工程应用范围内,导热系数和干密度、含水率均成线性关系。刘国华等<sup>[8]</sup>根据四因素三水平的正交试验证明了对电阻率影响因素的主次顺序依次为含水率、孔隙水电阻率、饱和度和土的类型。B. O. Hardin等<sup>[9]</sup>认为剪切波速与土的孔隙比、土体性质、容重及深度有关。可见,国内外研究和工程实际应用表明,导热系数、电阻率和剪切波速都是影响土体工程性质的重要物理参数,且其共同点是都与含水率和干密度有一定的内在关系。由此可以推断,导热系数和电阻率、剪切波速之间应存在某种联系。

针对导热系数在实际工程现场应用中难以快速、准确测量的问题,本文拟建立导热系数与电阻率和剪切波速之间的数学关系,而后利用试验数据对其进行验证,从而得到可以在实际工程中快速、准确计算不同深度土体导热系数的关系模型。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土样

本次试验选用的土样是南京地区分布十分广泛的下蜀土。通过粉土筛分之后,确定了所用下蜀土的粒径分布情况如图1所示。主要化学成分见表1。下蜀土的最优含水率为18%,比重为2.75。

结合下蜀土自身的物理性质与实际工程中的应用,将干密度的取值区间定在1.5~1.8 g/cm<sup>3</sup>,含水率分别取10%、14%、18%和21%。

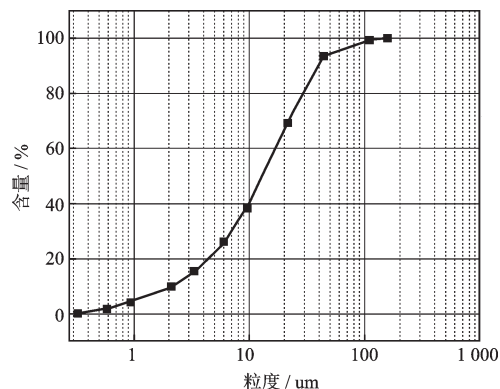


图1 下蜀土级配曲线

Fig.1 Distribution curve of xiashu loess

表1 下蜀土主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of Xiashu loess

化学成分	SO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	GaO	Na <sub>2</sub> O
含量/%	69.9	6.11	13.33	4.89	5.02

为了准确得到导热系数与电阻率和剪切波速之间的关系。对比了环刀样、三轴样和中三轴样电阻率和剪切波速的测试效果,最终确定土样规格为5 cm×9 cm,导热系数的测量试验中选用土样规格为2.1 cm×6.18 cm。每组土样均包括三个平行样。

### 1.2 试验原理与步骤

测量土体电阻率的原理是通过土体两端的电压差与电路中的总电流之比来计算土样电阻率,如式(1)所示:

$$\rho = \frac{RS}{L} = \frac{\Delta VS}{IL} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $R$  为电阻,  $\Omega$ ;  $\Delta V$  为土样两端的电压差,  $V$ ;  $S$  为土样横截面积,  $cm^2$ ;  $I$  为电路中电流,  $mA$ ;  $L$  为两个电极之间的距离,  $cm$ 。

通常, 测量电阻率的方法有二极法和四极法。电极的电阻和电极与土样之间的接触电阻会使得二极法的误差较大, 为了避免这种误差对试验结果的影响选用四极法测量土体的电阻率<sup>[10]</sup>。图2为四极法原理示意, 四极法是把电压表的两端插入土样中, 得到两个电极之间的电压差, 再通过通路中的电流值确定土体的电阻率。

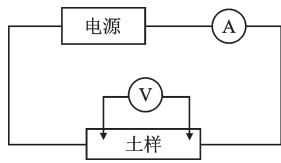


图2 四极法示意

Fig.2 Schematic diagram of schematic of four electrodes

由于四极法的测试需要插入土体, 不可避免的对土体产生扰动作用。为了减少这种影响, 对同一土样进行了多次测量, 每次测量分别取两个电极之间的距离为 8、6、4  $cm$ 。依据拉伊达准则筛去过大大小值, 取平均值作为土样的电阻值<sup>[11]</sup>。

测量剪切波速采用南京大学基于 PicoScope 3040D 示波器搭建的弯曲元测试系统。该系统测量方便, 所得数据精度满足实际需求。其基本原理如图3所示。

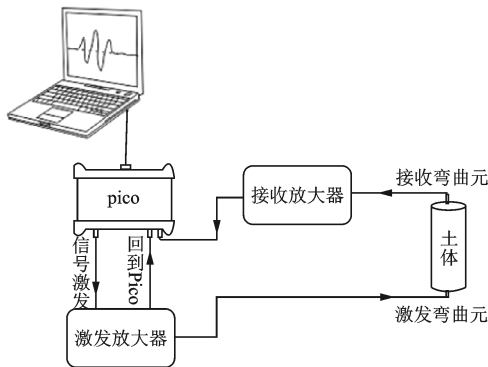


图3 弯曲元系统示意

Fig.3 Schematic diagram of bender element

在实际测量中, 将激发弯曲元置于土样下端, 接收弯曲元固定在土样上端。由 PicoScope 示波器发出一个信号, 经放大后分为两路, 一路直接回到

PicoScope, 另一路到达激发弯曲元, 通过土样后由接收弯曲元采集波动信号并经接收放大器回到 PicoScope 中。通过对比激发信号和接收信号同相起跳点的时间差确定土样的剪切波速。

通过预试验, 最终选用初达波法, 即以正弦波的第一个同相偏转点作为计时点, 考虑系统误差后得到剪切波通过土体的时间差, 该时间差与传播距离的比值即为土体的剪切波速<sup>[12]</sup>。

在实际测试中, 接收到的波形可能会受到由于土体与弯曲元之间的机械阻抗产生的近场作用和过冲作用的影响<sup>[11]</sup>。多次试验后发现, 不同的土样需要选择不同频率的正弦波来削弱这两种作用对测试结果的影响, 通过对比, 发现频率为 10~30  $kHz$  时测试效果最好。

导热系数的测试选用符合美国 ASTM 标准的 HC-110 型热导仪。该设备测量精度为  $\pm 5\%$ , 重复性测试误差为  $\pm 2\%$ 。广泛应用于岩石土体和其他建筑材料中导热系数的测试。该设备采用下加热板加热, 对比通过土样后上下加热板的热流输出及温度之差来计算导热系数, 计算公式为:

$$\lambda = \frac{Q_h + Q_c}{2} \times \frac{L}{\Delta T} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为导热系数;  $Q_h$  为土样上加热板热流输出值,  $W/m^2$ ;  $Q_c$  为土样下加热板热流输出值,  $W/m^2$ ;  $\Delta T$  为土样上下表面温度差,  $K$ ;  $L$  为土样的高度,  $m$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 土体电阻率与含水率、干密度的关系

土体电阻率主要与温度、干密度、含水率和水中离子种类相关<sup>[13-14]</sup>, 在控制用水相同与试验温度 20  $^{\circ}C$  情况下, 对不同干密度和含水率下的土体电阻率进行测量。由于温度的升高会导致离子的活动性上升, 因此需要对不同温度下的电阻率进行温度补偿。研究表明, 不同温度下的电阻率与 18  $^{\circ}C$  下的电阻率有如下关系<sup>[15]</sup>:

$$\rho_{18} = \frac{1 + \alpha(T - 18)}{\rho_T} \quad (3)$$

式中,  $\rho_T$  为温度为  $T$  时土的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $\rho_{18}$  为 18  $^{\circ}C$  时土的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}C$ ;  $\alpha$  为试验常数, 约为 0.025  $^{\circ}C^{-1}$ 。

据前人研究, 非饱和土的电阻率随温度的上升而减小且随孔隙率的增加呈负指数减小<sup>[16]</sup>。因此,

拟构建函数空间内的指数型函数表征电阻率和含水率、干密度三者的关系。构建的函数为：

$$\rho = z_0 + B \exp(-x/C) \times \exp(-y/D) \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $x$  为含水率, %;  $y$  为干密度,  $g/cm^3$ ;  $z_0$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  为待定系数。

图4为按式(3)经过温度补偿后所得的电阻率分布情况及根据式(4)进行拟合后得到的三维空间曲面。

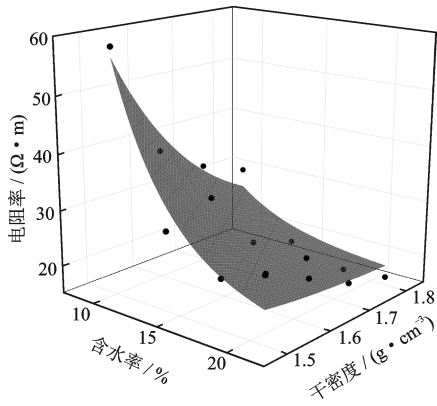


图4 公式(4)与试验结果拟合关系

Fig.4 Fitting graph of Eq. (4) and the experimental results

图5为分别以1.5、1.6、1.7、1.8  $g/cm^3$  干密度对图4拟合结果截取剖面并与试验数据点进行对比所得剖面。

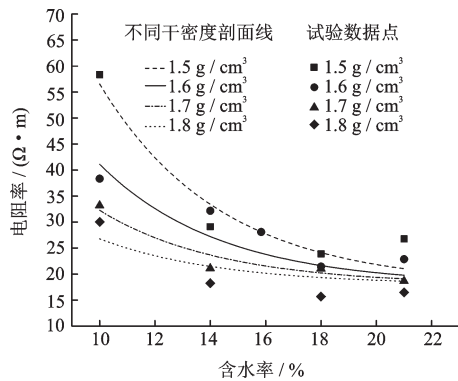


图5 公式(4)与试验结果拟合关系剖面

Fig.5 The section diagram of the fitting relation between Eq. (4) and test results

式(4)拟合参数取值及对应的相关系数见表2。由表可见,式(4)与试验数据之间的相关度很高,在试验所取含水率和干密度范围内,电阻率与含水率和干密度之间满足式(4)确定的函数关系。

这一现象的原因可能是干密度增加,增加了整体的接触面积,使得导电能力增加。随着含水率的

增加,使得土中的空隙减少,因此随着含水率增加呈指数性减小。

表2 参数取值及相关系数

Table 2 Parameters and correlation coefficient

参数	拟合值	相关系数
$z_0$	151.308 18	0.995 71
$a$	-13.632 09	0.935 20
$b$	160.530 17	0.995 43

## 2.2 土体剪切波速与含水率、干密度的关系

根据甘肃省地震局对黄土剪切波速的研究,在一定范围内,剪切波速与孔隙比和饱和度呈线性增长趋势<sup>[17]</sup>。拟用函数空间上的平面方程对剪切波速与含水率、干密度的关系进行拟合:

$$v = z_0 + a \times x + b \times y \quad (5)$$

式中,  $v$  为剪切波速,  $m/s$ ;  $z_0$ 、 $a$  和  $b$  为变量参数;  $x$  为含水率, %;  $y$  为干密度,  $g/cm^3$ 。

通过试验得到的剪切波速与其相对应的含水率、干密度的拟合结果如图6所示。

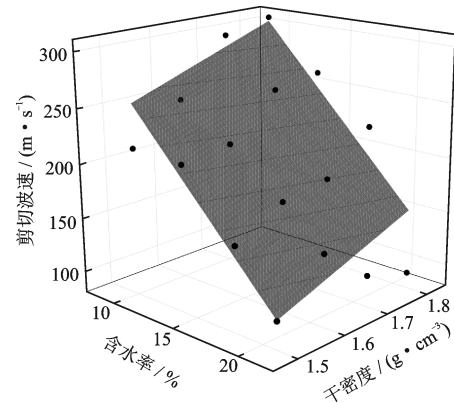


图6 公式(5)与试验结果拟合关系

Fig.6 Fitting graph of Eq. (5) and the experimental results

对图6的拟合结果以不同的干密度截取剖面并与试验数据点进行对比得到图7。

不同含水率与干密度对应的剪切波速与式(5)进行空间拟合之后得到的参数和相关系数见表3。由表3可见,试验数据与式(5)之间存在很好的相关关系。其原因可能为水传导波的能力弱于土体,因此随着含水率的增加,波速呈线性减小,在含水率不变时,随着干密度的增大同时呈线性增大。

## 2.3 土体导热系数与含水率、干密度的关系

参考刘鹏等<sup>[18]</sup>对南京下蜀土热物理性的相关

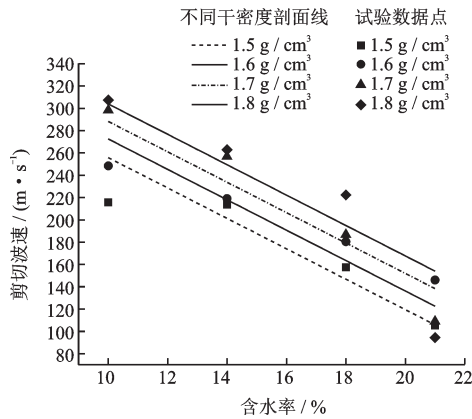


图7 公式(5)与试验结果拟合关系剖面

Fig.7 The section diagram of the fitting relation between Eq. (5) and test results

表3 参数取值及相关系数

Table 3 Parameters and Correlation coefficient

参数	拟合值	相关系数
$z_1$	20.456 2	0.870 32
$B$	6.396 6	0.999 46
$C$	3.259 16	0.995 64
$D$	0.166 83	0.999 15

研究,南京下蜀土的导热系数与温度、含水率和干密度在一定范围内均呈线性关系。因此,假设南京下蜀土在恒定温度条件下的导热系数和含水率、干密度具有空间平面函数关系:

$$K = z_1 + \alpha \times x + \beta \times y \quad (6)$$

式中, $K$ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$ ;  $z_1$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 为变量参数; $x$ 为含水率,%; $y$ 为干密度, $g/cm^3$ 。

同理,对式(6)与试验数据进行拟合,结果如图8所示。

导热系数随着干密度的增加而增加的幅度很

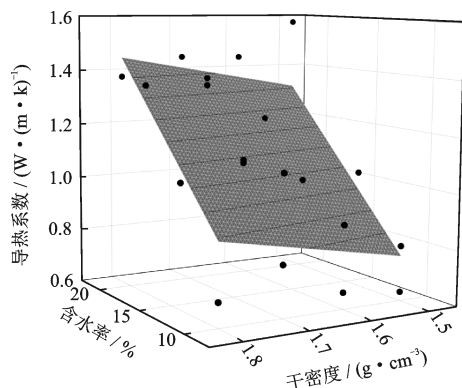


图8 公式(6)与试验结果拟合关系

Fig.8 Fitting graph of Eq. (6) and the experimental results

小,以干密度做出的剖面线密集,与试验数据点间难以区分偏离程度。因此,以不同含水率做出式(6)的剖面线与试验数据点之间的关系如图9所示。

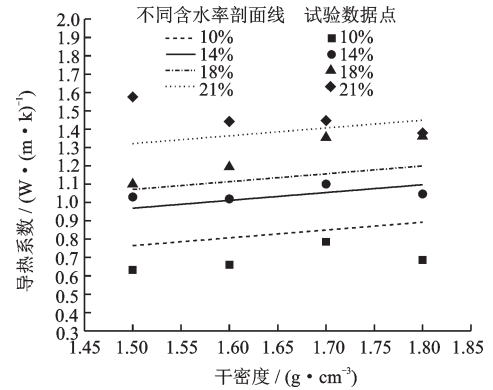


图9 公式(6)与试验结果拟合关系剖面

Fig.9 The section diagram of the fitting relation between Eq. (6) and test results

通过对表4中不同参数的相关系数进行对比可知,含水率和干密度与导热系数之间与式(6)之间具有高度的相关性。

表4 参数取值及相关系数

Table 4 Parameters and correlation coefficient

参数	拟合值	相关系数
$z_1$	-0.380 89	0.996 23
$\alpha$	0.050 59	0.935 21
$\beta$	0.426 36	0.996 01

## 2.4 导热系数与电阻率、剪切波速的关系模型

通过公式(4)、(5)、(6)与试验数据拟合对比,可得到电阻率、剪切波速和导热系数分别与含水率和干密度之间在函数空间里的关系式。电阻率、剪切波速和导热系数均与含水率和干密度等土体的物理性质具有确定的函数关系。因此,可以通过对式(4)、式(5)式进行合并化简,最后得到干密度与电阻率和剪切波速的关系式和含水率与电阻率和剪切波速的关系式。将两式带入式(6)中,经过化简可得如下关系式:

$$K = A \ln \rho + B \nu + C \quad (7)$$

式中, $K$ 为导热系数; $\rho$ 为电阻率, $\Omega \cdot m$ ;  $\nu$ 为剪切波速, $m/s$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 均为常量参数。

为验证公式(7)与通过试验得到的数据之间的对应关系,对式(7)和试验数据进行拟合,如图(10)所示,拟合参数见表(5)。

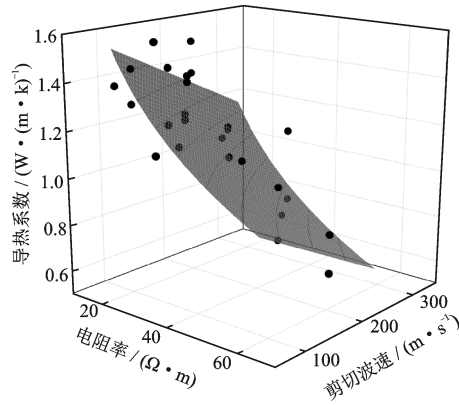


图10 公式(7)与试验结果拟合关系

Fig.10 Fitting graph of Eq.(7) and the experimental results

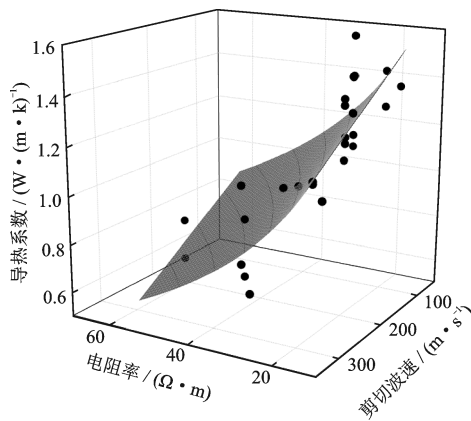


图11 公式(7)与试验结果拟合关系侧视图

Fig.11 The section diagram of the fitting relation between Eq. (7) and test results

可见,通过式(4)~(6)推导出的式(7)与试验数据在空间上高度相关,可以通过现场电阻率和剪切波速的测试数据计算土体的导热系数。

表5 参数取值及相关系数

Table 5 Parameters and correlation coefficient

参数	拟合值	相关系数
A	1.008 19	0.989 46
B	0.195 20	0.995 43
C	-1.949 93	0.996 80

通过表5中相关系数的取值可知,式(7)与试验数据之间有良好的相关性。综上所述,下蜀土在试验条件范围内导热系数与电阻率和剪切波速之间的关系满足式(7)。

### 3 结论与讨论

(1)电阻率与含水率、干密度之间满足函数空

间内的指数关系;剪切波速、导热系数均与含水率和干密度之间满足平面方程关系。

(2)建立了导热系数与电阻率和剪切波速在试验条件下的函数关系,试验数据与关系式拟合度极高。

对于以南京下蜀土为代表的粉土,本文建立的导热系数与含水率、孔隙率的关系和已有研究的结论是一致的<sup>[19]</sup>。查甫生等<sup>[15,17]</sup>对非饱和黏性土的研究表明电阻率与含水率、孔隙率之间存在函数关系;程健等<sup>[20]</sup>通过试验,发现土体的剪切波速与含水率之间存在线性关系。可见,土体的导热系数、电阻率和剪切波速与含水率、孔隙率等基本物理性质之间存在一定的数学关系。根据本文试验和所建立的函数关系,证明了导热系数与电阻率、剪切波速之间具有显著的相关性,为在工程勘察阶段快速、准确地测量导热系数提供了理论基础和新的方法。

### 参考文献:

- [1] 费康,洪伟,钱建,等.循环温度作用下砂土地基能量桩的长期工作特性[J].防灾减灾工程学报,2017,37(4):525-531  
Fei K, Hong W, Qian J, et al. Long-term performance of energy piles subjected to cyclic thermal loading in sand[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4): 525-531. (in Chinese)
- [2] Yao J, Likos W J. Transient plane and line source methods for soil thermal conductivity[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, 40(5):20160333.
- [3] Austin W A. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties[D]. Stillwater, Oklahoma;Oklahoma State University, 1998.
- [4] Li M, Lai A C K. Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): a perspective of time and space scales[J]. Applied Energy, 2015,151:178-191.
- [5] Sun C G. Determination of mean shear wave velocity to 30m depth for site classification using shallow depth shear wave velocity profile in Korea[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015,73:17-28.
- [6] 王建华,程国勇,张立.取样扰动引起土层剪切波速变化的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2604-2608.  
Wang J H, Cheng G Y, Zhang L. Study on variation of shear wave velocity caused by sampling disturbance[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 604-2 608. (in Chinese)
- [7] 俞亚南,徐 坚,冯建江.粉性土导热系数的室内实验研究[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(1): 180-183.  
Yu Y N, Xu J, Feng J J. Laboratory experiment on thermal conductivity of silty clay[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(1): 180-183. (in Chinese)
- [8] 刘国华,王振宇,黄建平.土的电阻率特性及其工程应用研究[J].岩土工程学报,2004,26(1):83-87.  
Liu G H, Wang Zh Y, Huang J P. Research on electrical resistivity feature of soil and it's application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83-87. (in Chinese)
- [9] Hardin B O, Black W L. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(2): 353-369.
- [10] 周 蜜,王建国,黄松波,等.土壤电阻率测量影响因素的试验研究[J].岩土力学,2011,32(11):3 269-3 275.  
Zhou M, Wang J G, Huang S B, et al. Experimental investigation on influencing factors in soil resistivity measurement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3 269-3 275. (in Chinese)
- [11] 王 磊,何江涛,张振国,等.基于信息筛选和拉依达准则识别地下水主要组分水化学异常的方法研究[J].环境科学学报,2018,38(3):919-929.  
Wang L, He J T, Zhang Zh G, et al. Research on the method to identify the outliers of the main components of groundwater based on the information screening coupled with PauTa criterion [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 919-929. (in Chinese)
- [12] 周燕国,陈云敏,黄 博,等.利用弯曲元测量土体表层剪切波速的初步试验[J].岩土工程学报,2008,30(12):1 883-1 887.  
Zhou Y G, Chen Y M, Huang B, et al. Preliminary tests of measuring shear wave velocity on soil surface using bender elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1 883-1 887. (in Chinese)
- [13] 姬美秀,陈云敏,黄 博.弯曲元试验高精度测试土样剪切波速方法[J].岩土工程学报,2003,25(6): 732-736.  
Ji M X, Chen Y M, Huang B. Method for precisely determining shear wave velocity of soil from bender element tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 732-736. (in Chinese)
- [14] 查甫生,刘松玉,杜延军,等.击实黄土的电阻率特性试验研究[J].岩土力学,2011,32(增2):155-165.  
Zha F Sh, Liu S Y, Du Y J, et al. Characteristics of electrical resistivity of compacted loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 2): 155-165. (in Chinese)
- [15] 查甫生,刘松玉,杜延军,等.非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J].岩土力学,2007,28(8):1 671-1 676.  
Zha F Sh, Liu S Y, Du Y J, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1 671-1 676. (in Chinese)
- [16] Keller G V, Frischknecht F C. Electrical methods in geophysical prospecting [M]. New York: Pergamon Press, 1966.
- [17] 王 平,王 强,王 峻,等.黄土场地剪切波速影响因素模糊灰关联分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):4 299-4 304.  
Wang P, Wang Q, Wang J, et al. Research on loess site's shear wave velocity influencing factor based on fuzzy-gray relational analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 4 299-4 304. (in Chinese)
- [18] 刘 鹏,阎长虹,徐 杨,等.南京地区下蜀土导热系数影响因素室内试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(5):847-852.  
Liu P, Yan Ch H, Xu Y, et al. Laboratory research on influence factors of thermal conductivity for Xiashu loess in the area of Nanjing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5): 847-852. (in Chinese)
- [19] 郑 强,晋 华,刘 虎,等.孔隙率与含水率对砂质土样导热系数的影响[J].水电能源科,2015,33(12): 125-128.  
Zheng Q, Jin H, Liu H, et al. Effect of porosity and moisture content on thermal conductivity of sandy soil samples [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(12): 125-128. (in Chinese)
- [20] 程 健,张 丹,刘子文.基于弯曲元的剪切波扁铲侧胀技术可行性试验研究[J].工程勘察,2018,46(3): 12-16.  
Cheng J, Zhang D, Liu Z W. Feasibility study on flat shovel bulging technique with shear wave based on bending elements [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(3): 12-16. (in Chinese)

(本文责编:池营营)