

# 岩土层原位导热系数的多元线性回归分析方法

段新胜<sup>1</sup>, 林清龙<sup>2</sup>, 毛汉川<sup>2</sup>, 顾 湘<sup>1</sup>, 查翌灿<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074; 2. 浙江省地质调查院, 杭州 311203)

**摘 要:** 由于取样的扰动和室内试验方法的局限性,用岩土样品导热系数代表岩土层原位有效导热系数存在明显误差。基于“杭州市浅层地温能调查评价项目”中40个热响应试验孔的地层结构和现场热响应试验成果,用多元线性回归分析理论和行业数据统计SPSS软件(statistical product and service solutions)程序,以各岩土层厚度为自变量、原位有效导热系数为回归系数,热响应试验所确定的试验孔岩土的综合导热系数为因变量,确定各岩土层原位有效导热系数,回归方程和回归系数显著可信,可用于计算统计区域内其他地埋管热交换工程孔岩土的综合导热系数。

**关键词:** 地源热泵; 导热系数; 回归分析; 地埋管热交换孔; 岩土热响应试验

**中图分类号:** TK519

**文献标识码:** A

## 0 引 言

在地埋管地源热泵系统设计所需的岩土体热物性参数中,热交换孔岩土的综合导热系数是最为重要的参数之一。目前获取的方法主要有岩土样品测试法、查表法和现场岩土热响应试验法<sup>[1-3]</sup>。样品测试法是将钻取的岩土样品送到实验室,用专用导热系数测试仪测定其导热系数<sup>[4,5]</sup>。但由于取样过程的扰动,样品失水和直径有限(一般约为70 mm)等问题,其性状不能准确真实地反映岩土层的原位性状。查表法中相关表格给出的岩土体导热系数一般也是根据样品测试结果整理出来的。现场岩土热响应试验法是目前公认的能准确获取岩土的综合导热系数的唯一方法。

由中国地质调查局牵头,我国已按《浅层地热能勘察评价规范》<sup>[6]</sup>完成了各直辖市、省会城市及主要地级市浅层地温能资源调查评价工作<sup>[7]</sup>,在各城市进行了大量的地埋管热交换孔的钻探取样、编录和样品室内试验,特别是现场岩土热响应试验,获得了大量的地层结构及试验孔岩土的综合导热系数。本文以杭州市为例,利用其大量热响应试验孔地层结构和热响应试验成果,用多元线性回归分析方法确定各岩土层原位有效导热系数,拓展项目成

果,更新或丰富“查表法”中的数据。在具体工程项目中,可根据获取的地层信息和本文获得的岩土层原位有效导热系数,计算设计所需的热交换孔岩土的综合导热系数,或对具体工程岩土热响应成果进行检验和比对。

## 1 杭州市项目概况

“杭州市浅层地温能资源调查评价项目”在杭州市辖区范围内共布置了40个地埋管岩土热响应试验孔,深度47~198 m,大部分集中在100 m。在钻进过程中分层采取岩心,进行现场编录;采用瑞典 Hot Disk TPS2500S 热常数分析仪进行样品的室内热物理性质试验,用中国地质大学(武汉)研制的GP-3地埋管岩土热响应试验仪对试验孔进行现场岩土热响应试验。如表1所示,钻孔所穿越的岩土层按“建筑地基基础设计规范”<sup>[8]</sup>进行分类,并将厚度较小的土层适当归并,岩层按矿物组成和风化程度进行分类。这些热响应试验孔共揭示了18类岩土层,文中用18个英文字母依次表示为:填土和粉土(a)、粘性土(b)、淤泥质土(c)、粉细砂(d)、中粗砾砂(e)、圆砾(f)、卵石(g)、残积土(h)、泥岩(i)、硅质泥岩(j)、强风化泥质粉砂岩(k)、中风化泥质粉砂岩(l)、强风化砂砾岩(m)、中风化砂砾岩(n)、强风化凝灰

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 中国地质调查局、浙江省国土资源厅、杭州市国土资源局项目(1212011220838)

通信作者: 段新胜(1962—), 男, 博士、教授, 主要从事岩土工程与浅层地热能勘探开发方面的研究。duanxinsheng@163.com

表1 各热响应试验孔的不同岩土层分层厚度、总深度及岩土的综合导热系数

Table 1 Thickness of strata, total depths and effective thermal conductivities of the test boreholes

孔号	$x_a$	$x_b$	$x_c$	$x_d$	$x_e$	$x_f$	$x_g$	$x_h$	$x_i$	$x_j$	$x_k$	$x_l$	$x_m$	$x_n$	$x_o$	$x_p$	$x_q$	$x_r$	$L$	$\bar{\lambda}$
1	8.6	42.7	5.3	11.9	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	8.7	14.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	2.011
2	19.0	7.0	12.0	9.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.0	2.067
3	1.5	20.4	24.7	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	41.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.0	1.699
4	11.2	13.9	20.7	7.6	0.0	8.2	0.0	0.0	37.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	1.727
5	0.8	18.7	12.5	14.0	8.0	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.6	78.0	2.079
6	2.1	20.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	23.0	43.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	2.300
7	3.5	18.1	14.6	4.2	3.8	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	36.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.0	1.872
8	0.5	5.3	12.5	3.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	78.0	1.988
9	1.2	24.5	0.0	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63.2	99.0	1.911
10	7.8	10.5	24.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	25.0	0.0	0.0	80.0	1.833
11	14.0	14.0	12.8	18.9	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	31.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.0	1.868
12	19.0	24.0	8.2	13.5	0.0	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	1.952
13	21.0	9.2	20.5	4.5	0.0	0.0	10.2	0.0	0.0	0.0	20.2	13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	2.164
14	0.5	2.0	2.1	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	74.8	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	1.897
15	17.8	1.5	0.0	0.0	3.6	5.3	0.0	0.0	73.5	0.0	0.0	0.0	0.0	15.3	0.0	0.0	0.0	0.0	117.0	2.152
16	0.6	27.7	1.8	3.1	0.0	3.7	0.0	0.0	62.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	2.345
17	6.0	6.3	6.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	76.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.0	2.424
18	1.8	4.9	11.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	68.6	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	5.7	99.0	1.892
19	13.6	5.0	12.7	2.2	0.0	29.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	79.0	1.876
20	7.4	11.9	0.0	8.2	0.0	4.2	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.6	47.9	0.0	0.0	98.0	2.340
21	1.7	12.8	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	54.5	0.0	79.0	2.184
22	7.5	2.4	6.8	4.5	5.4	5.6	15.0	0.0	0.0	0.0	38.2	13.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	1.874
23	23.0	56.2	3.3	0.0	0.0	65.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	148.0	2.258
24	19.6	11.0	22.9	0.0	0.0	15.7	22.3	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	2.171
25	1.5	6.0	55.9	0.0	0.0	4.1	0.0	0.0	5.7	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.0	2.066
26	1.2	26.7	0.7	0.0	0.0	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	49.5	0.0	0.0	99.0	1.900
27	16.5	2.5	11.7	0.0	0.0	17.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	47.8	0.0	0.0	99.0	2.056
28	19.2	3.6	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.4	37.5	0.0	0.0	99.0	2.064
29	27.8	27.2	0.0	0.0	0.0	12.6	0.0	0.0	9.0	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.0	1.681
30	5.6	37.4	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	0.0	0.0	22.4	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.0	1.829
31	2.2	29.0	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	20.3	0.0	0.0	19.0	19.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	1.979
32	10.7	21.9	9.5	6.2	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	4.1	44.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	2.195
33	1.2	18.1	32.1	1.4	0.0	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	29.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	2.005
34	2.6	0.0	24.2	7.6	0.0	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	0.0	0.0	0.0	47.0	1.581
35	1.0	17.8	8.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	52.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	1.867
36	9.0	16.0	32.0	1.6	2.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	48.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	120.0	1.810
37	13.5	3.5	1.8	18.0	0.0	14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.0	1.955
38	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.6	0.0	0.0	0.0	43.3	8.5	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.0	2.216
39	0.5	2.7	8.2	0.8	0.0	9.1	0.0	0.0	0.0	57.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.0	2.446
40	1.7	18.2	37.5	0.0	0.0s	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.9	124.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	198.0	2.246

注: $x_i$ —地层厚度,下标*i*为各种岩土层代号,详见1节; $m$ ;  $L$ —试验孔的孔深, $m$ ;  $\bar{\lambda}$ —用现场热响应试验方法所确定的试验孔岩土的综合导热系数,  $W/(m \cdot K)$ 。

岩(o)、中风化凝灰岩(p)、中风化灰岩(q)、粉砂岩(r)。

各试验孔不同岩土层的分层厚度、孔深及按《地源热泵系统工程技术规范》<sup>[9]</sup>进行现场岩土热响应试验获得的试验孔岩土的综合导热系数见表1。在表1中,地层厚度如果为零,则表示该地层缺失。在40个试验孔中共采集了有效样品807件,样品在各岩土层的分布数量和用Hot Disk TPS2500S热常数分析仪测定的岩土样品导热系数的统计结果见表2。

表2 岩土样品导热系数测试结果分层统计

Table 2 Stratified statistical results of thermal conductivity of core samples

编号	名称	N	$\mu$	min/max	$\sigma$	$\delta$
a	填土、粉土	77	1.62	0.80/1.93	0.18	0.11
b	粘性土	130	1.49	0.90/2.43	0.23	0.16
c	淤泥质土	96	1.23	0.90/1.69	0.16	0.13
d	粉细砂	41	1.81	1.37/2.30	0.22	0.12
e	中粗砾砂	13	2.25	1.66/2.76	0.35	0.16
f	圆砾	50	2.06	1.62/3.28	0.35	0.17
g	卵石	12	2.34	1.98/2.75	0.25	0.11
h	残积土	12	2.04	1.22/2.39	0.33	0.16
i	泥岩	46	2.17	1.80/2.76	0.24	0.11
j	硅质泥岩	37	2.82	2.44/3.23	0.20	0.07
k	强风化泥质粉砂岩	22	1.59	1.19/1.58	0.20	0.13
l	中风化泥质粉砂岩	90	1.93	1.16/4.46	0.54	0.28
m	强风化砂砾岩	18	1.72	1.03/2.68	0.42	0.24
n	中风化砂砾岩	64	1.95	1.03/3.77	0.49	0.25
o	强风化凝灰岩	12	2.29	1.51/2.96	0.46	0.20
p	中风化凝灰岩	60	2.16	1.17/2.87	0.40	0.19
q	中风化灰岩	22	3.20	2.92/3.31	0.09	0.03
r	粉砂岩	3	2.90	1.62/4.88	—	—

注:N—样品数量; $\mu$ —分层岩土样品导热系数平均值,W/(m·K);min/max—导热系数的最小值/最大值,W/(m·K); $\sigma$ —标准差; $\delta$ —变异系数。

## 2 试验孔各岩土层原位有效导热系数的多元线性回归分析

### 2.1 多元线性回归分析模型的建立

试验孔的孔号用阿拉伯数字1,2,⋯,40表示,18个岩土层的层号用a,b,⋯,r表示(见表1)。以18个岩土层的厚度为自变量 $x_j$ ( $j=a,b,\cdots,r$ ),其在

40个试验孔中的厚度值就是18个自变量的40组观测值 $x_{ij}$ ( $i=1,2,\cdots,40;j=a,b,\cdots,r$ )。对于每个试验孔,其孔深 $L_i$ 和试验孔岩土的综合导热系数 $\bar{\lambda}_i$ (由现场热响应试验确定)是已知的,设同一地区相同类型的岩土层具有相同的原位有效导热系数 $\lambda_j$ ,则试验孔岩土的综合导热系数与试验孔孔深的乘积应等于各土层原位有效导热系数与各土层厚度的乘积之和,故可构造如式(1)所示的多元线性回归模型:

$$y_i = \lambda_a x_{ia} + \lambda_b x_{ib} + \cdots + \lambda_j x_{ij} + \cdots + \lambda_r x_{ir} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中, $y_i$ ——第*i*号试验孔岩土的综合导热系数与试验孔孔深的乘积, $y_i = \bar{\lambda}_i L_i$ ;  $\lambda_j$ ——第*j*层岩土层的原位有效导热系数,为多元线性回归系数; $x_{ij}$ ——第*i*号试验孔中第*j*岩土层的厚度; $\varepsilon_i$ ——随机误差。

表1中40个热响应试验孔的岩土层分层厚度、总深度和岩土热响应试验成果可看作式(1)的40组观察值。

### 2.2 多元线性回归分析

用最小二乘法估计,确定多元线性回归模型未知参数 $\lambda_a, \lambda_b, \cdots, \lambda_r$ 。实际上就是寻找未知参数的估计值 $\hat{\lambda}_a, \hat{\lambda}_b, \cdots, \hat{\lambda}_r$ ,使离差平方和 $Q(\hat{\lambda}_a, \hat{\lambda}_b, \cdots, \hat{\lambda}_r) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\lambda}_a x_{ia} - \hat{\lambda}_b x_{ib} - \cdots - \hat{\lambda}_r x_{ir})^2$ 最小,求得的 $\hat{\lambda}_a, \hat{\lambda}_b, \cdots, \hat{\lambda}_r$ 为回归参数 $\lambda_a, \lambda_b, \cdots, \lambda_r$ 的最小二乘估计。

由于 $Q(\hat{\lambda}_a, \hat{\lambda}_b, \cdots, \hat{\lambda}_r)$ 为 $\hat{\lambda}_a, \hat{\lambda}_b, \cdots, \hat{\lambda}_r$ 的非负二次函数,因而总是存在最小值。根据微积分中求极值的原理,分别求 $Q(\hat{\lambda}_a, \hat{\lambda}_b, \cdots, \hat{\lambda}_r)$ 对 $\hat{\lambda}_a, \hat{\lambda}_b, \cdots, \hat{\lambda}_r$ 的导数,并令导数等于零,整理后可得正规方程组:

$$\begin{cases} \sum (\hat{\lambda}_a x_{ia} + \hat{\lambda}_b x_{ib} + \cdots + \hat{\lambda}_r x_{ir}) x_{ia} = \sum y_i x_{ia} \\ \sum (\hat{\lambda}_a x_{ia} + \hat{\lambda}_b x_{ib} + \cdots + \hat{\lambda}_r x_{ir}) x_{ib} = \sum y_i x_{ib} \\ \vdots \\ \sum (\hat{\lambda}_a x_{ia} + \hat{\lambda}_b x_{ib} + \cdots + \hat{\lambda}_r x_{ir}) x_{ir} = \sum y_i x_{ir} \end{cases} \quad (2)$$

求解此方程组,即可求得的 $\hat{\lambda}_a, \hat{\lambda}_b, \cdots, \hat{\lambda}_r$ 。将表1中热响应试验孔岩土层的分层厚度作为自变量、试验孔深度*L*与热响应试验确定的试验孔岩土的综合导热系数 $\bar{\lambda}$ 的乘积*y*作为因变量,应用SPSS(statistical product and service solutions)程序<sup>[10]</sup>进行多元线性回归,分析结果见表3和表4。

表3 方差分析结果					
Table 3 Variance analysis results					
模型	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	Sig
回归	1689367.24	18	93853.74	199.79	0.000
残差	10334.75	22	469.76	—	—
总计	1699701.99	40	—	—	—

注:预测变量为  $x_0 \sim x_i$ ;因变量为  $y$ ;通过原点的线性回归。

表4 回归分析的岩土层原位有效导热系数及其与 样品实验室导热系数平均值的比较					
Table 4 Effective thermal conductivities of strata obtained by regression and comparisons with those of samples					
编号	名称	$\hat{\lambda}$	Sig	$\mu$	$\Delta$
a	填土、粉土	1.670	0.008	1.62	3.09
b	粘性土	1.910	0.000	1.49	28.19
c	淤泥质土	1.661	0.000	1.23	35.04
d	粉细砂	1.997	0.012	1.81	10.33
e	中粗砾砂	2.276	0.019	2.25	1.16
f	圆砾	2.439	0.000	2.06	18.25
g	卵石	2.987	0.006	2.34	27.65
h	残积土	2.803	0.011	2.04	37.40
i	泥岩	2.346	0.000	2.17	8.11
j	硅质泥岩	2.572	0.000	2.82	-8.79
k	强风化泥质粉砂岩	1.711	0.006	1.59	7.61
l	中风化泥质粉砂岩	2.220	0.000	1.93	15.03
m	强风化砂砾岩	2.436	0.082	1.72	41.62
n	中风化砂砾岩	1.772	0.000	1.95	-9.13
o	强风化凝灰岩	2.140	0.014	2.29	-6.55
p	中风化凝灰岩	2.144	0.000	2.16	-0.74
q	中风化灰岩	2.327	0.000	3.20	-27.28
r	粉砂岩	1.860	0.000	2.90	-35.86

注:  $\hat{\lambda}$ —多元线性回归确定的岩土层原位有效导热系数, W/(m·K);Sig—显著性水平; $\Delta$ 见式(3)。

表3为用方差分析检验回归方程显著性的结果,可见回归的均方为93853.74,残差的均方为469.76,“*F*”检验的  $F=199.79>F_{0.05}(18, 22)=2.10$  且  $\text{Sig}.=0.000<0.01$ ,说明线性回归方程显著。表4中的第3列为回归系数,第4列为回归系数的显著性检验结果,除强风化砂砾岩的  $\hat{\lambda}_m$  显著性水平  $\alpha$  略大于0.05,为0.082外,其他回归系数的显著性水平平均小于0.05,说明回归系数显著有意义。

### 2.3 回归分析结果与样品导热系数的对比分析

多元线性回归分析确定的岩土层原位有效导热系数与岩土样品导热系数平均值的比较用式(3)表示:

$$\Delta = \frac{(\hat{\lambda} - \mu)}{\mu} \times 100 \tag{3}$$

各岩土层的  $\Delta$  值列于表4的第6列。由表4可见,根据热响应试验结果用多元线性回归分析方法所确定的各岩土层的有效导热系数  $\hat{\lambda}$  与岩土样品实验室测定的导热系数平均值  $\mu$  之间的相对误差在-35.86%~41.62%之间,相对误差较大。因此,工程实践中如用岩土样品的导热系数代替岩土层原位有效导热系数存在明显误差。造成两者之间误差较大的原因主要有两个:一是岩土样品的扰动问题,如取样过程中的机械扰动、应力释放和失水等;二是室内测试方法问题,Hot Disk 热常数分析仪的探头为薄片式探头,探头半径为6.403~14.735 mm,小于很多岩土体裂隙之间的间距。测试时,探头被夹在两块样品中间,测试功率小(不到1 W)、时间短(不到100 s)<sup>[5]</sup>,热流传播的距离有限,测试过程中岩土样品中水分迁移量有限,因此测试结果很难反映有孔隙、裂隙,有地下水活动的原位岩土体的性状。

## 3 结 论

用大量通过钻探取样获知地层结构的地理管热交换孔的现场岩土热响应试验成果,设试验孔岩土的综合导热系数与试验孔孔深的乘积等于各岩土层原位有效导热系数与各岩土层厚度的乘积之和,用地层厚度为自变量,热响应试验所确定的试验孔岩土的综合导热系数与孔深的乘积为因变量,岩土层原位有效导热系数为回归系数,通过多元线性回归分析,用SPSS程序可确定各岩土层原位有效导热系数。

本文给出了该方法在杭州市具体应用,可供其他地区或更大范围应用该方法时作为参考,所确定的岩土层原位有效导热系数的适用范围取决于参与统计的热响应试验孔的分布范围。

### [参考文献]

- [1] 段新胜,关 鹏,邓国庆,等.地源热泵岩土体导热系数确定方法的实例分析[J].暖通空调,2014,44(9):81—84.
- [1] Duan Xinsheng, Guan Peng, Deng Guoqing, et al. Case



- study on determination of rock-soil thermal conductivity for ground source heat pump systems [J]. HV&AC, 2014, 44(9): 81—84.
- [2] 于明志, 彭晓峰, 方肇洪, 等. 基于线热源模型的地下岩土热物性测试方法[J]. 太阳能学报, 2006, 27(3): 279—283.
- [2] Yu Mingzhi, Peng Xiaofeng, Fang Zhaohong, et al. Line source method for measuring thermal properties of deep ground[J]. Acta Energiæ Solaris Sincia, 2006, 27(3): 279—283.
- [3] David Banks. An introduction to thermogeology: Ground source heating and cooling (2<sup>nd</sup> Edition) [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
- [4] 秦应洁, 周学军, 冯 梅, 等. 稳态平板热流计法岩土导热系数的室内测定[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(5): 669—671.
- [4] Qin Yingjie, Zhou Xuejun, Feng Mei, et al. The laboratory testing of rock and soil thermal conductivity using steady plate heat flux gage method [J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(5): 669—671.
- [5] 赵秀峰, 曹景洋, 罗惠芬. 采用 Hot Disk 测量岩土热物性的实验研究[J]. 中国测试, 2012, 38(4): 106—109.
- [5] Zhao Xiufeng, Cao Jingyang, Luo Huifen. Experimental study on measuring thermal properties of rock and soil with hot disk [J]. China Measurement & Test, 2012, 38(4): 106—109.
- [6] DZ/T 0225—2009, 浅层地热能勘察评价规范[S].
- [6] DZ/T 0225—2009, Specification for shallow geothermal energy investigation and evaluation[S].
- [7] 王贵玲, 蔺文静, 张 薇. 我国主要城市浅层地温能利用潜力评价[J]. 建筑科学, 2012, 28(10): 1—3, 8.
- [7] Wang Guilin, Lin Wenjing, Zhang Wei. Evaluation on utilization potential of shallow geothermal energy in major cities of china [J]. Building Science, 2012, 28(10): 1—3, 8.
- [8] GB 50007—2011, 建筑地基基础设计规范[S].
- [8] GB 50007—2011, Code for design of building foundation [S].
- [9] GB 50366—2009, 地源热泵系统工程技术规范[S].
- [9] GB 50366—2009, Technical code for ground source heat pump system[S].
- [10] 黄润龙. 数据统计与分析技术: SPSS 软件实用教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [10] Huang Runlong. Data statistics and analysis techniques: A practical guide to SPSS software [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.

## MULTIPLE LINEAR REGRESSION ANALYSIS METHOD FOR IN-SITU THERMAL CONDUCTIVITIES OF ROCK AND SOIL LAYER

Duan Xinsheng<sup>1</sup>, Lin Qinglong<sup>2</sup>, Mao Hanchuan<sup>2</sup>, Gu Xiang<sup>1</sup>, Zha Yican<sup>1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Geological Survey Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 311203, China)

**Abstract:** Due to the perturbation of sampling and the limitations of laboratory test methods, there is a significant error in using the geotemperature coefficient of geomaterials to represent in-situ effective thermal conductivity of rock and soil layers. Based on the stratum structure and on-site thermal response test (TRT) results of 40 thermal response test holes in the “Hangzhou Shallow Geothermal Energy Survey and Evaluation Project”, using multivariate linear regression analysis theory and industry statistics SPSS software (Statistical Product and Service Solutions), the thickness of each rock and soil layer as independent variables, in situ effective thermal conductivity as the regression coefficient, experimental hole geotechnical comprehensive thermal conductivity obtained by TRT as dependent variable to determine in-situ effective thermal conductivities of each rock and soil layer. It was shown that the regression equation and the regression coefficients are significant, which can be used to calculate the comprehensive thermal conductivity of rock and soil in other buried pipe heat exchange engineering hole in the statistical area.

**Keywords:** ground source heat pumps; thermal conductivity; regression analysis; heat exchange borehole; thermal response test (TRT)