

DOI: 10.11779/CJGE202002017

热传导 CPT 探头的研发与应用

刘松玉, 郭易木, 张国柱, 周 游

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 土体热导率是能源地下工程、高压电线埋设、冻土路基等工程设计中的重要参数, 是评估土体换热性能及地下温度场计算的关键, 但目前缺乏有效的原位测试手段。基于瞬时线热源温度消散理论, 研发了可测试原位土体热导率的静力触探 (CPT) 探头。根据理论假设与现有 CPT 系统尺寸, 确定了探头具体长度、直径、内部构造、温度采集点位, 并提出相应测试步骤与热导率计算方法。利用 COMSOL 有限元分析软件对测试过程进行模拟验证, 结果表明探头实际传热符合线热源假定, 且计算方法适用于一般热导率土体。对于热导率较小 (小于 $0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 土体, 需适当延长测试时间。现场应用表明, 土体原位热导率略高于取样土室内测试结果, 表明取样扰动可能降低土体导热性能, 最后对取样测试及工程设计提出改进建议。

关键词: 热传导探头; 土体; 热导率; 计算; 原位测试方法; 现场测试

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2020)02 - 0354 - 08

作者简介: 刘松玉(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事现代原位测试技术和特殊地基处理技术等方面的研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

Development and application of heat conduction CPT probe

LIU Song-yu, GUO Yi-mu, ZHANG Guo-zhu, ZHOU You

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The thermal conductivity is the key parameter to the design of many projects, such as energy structures, high-voltage buried power cables and permafrost embankment, related to estimating the heat transfer capability and temperature field in the soil. However, at present there is no effective in-situ testing method. Based on the theory of instantaneous heat release along a line source, a heat conduction cone penetration test (CPT) probe for thermal conductivity evaluation of in-situ soil is developed. According to the theoretical assumptions and the sizes of CPT system, the length, diameter, internal structure and positions of the temperature sensors are introduced. Then, the corresponding test procedure and the method for thermal conductivity are proposed. The test process is simulated in COMSOL to verify the method, and the results validate that the actual heat transfer conforms to the line source theory. The interpretation method yields reasonable values within a general range of conductivities. For less conductive soil ($<0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), longer duration of heat dissipation may be required. The field test results show that the in-situ soil conductivity is higher than that from laboratory tests on undisturbed samples, indicating the sampling disturbance may be responsible for this reduction. Finally, some suggestions on laboratory thermal conductivity tests and engineering designs are given.

Key words: heat conduction probe; soil; thermal conductivity; calculation; in-situ test method; field test

0 引 言

土中的热传导一直是岩土工程领域的热点问题, 地下高压输电线设计^[1]、油气管道的埋设^[2]、核废料存储^[3]、冻结法施工^[4]以及冻土地基的承载力^[5]都与土中的传热过程密切相关。近年来, 浅层地温能开发中能源地下结构^[6] (能源桩、地下连续墙等) 的设计更是基于土体的传热能力。热导率作为研究土体传热过程中的关键参数, 直接影响了土体温度分布计算与土体换热能力评估。

现阶段土体热导率测试方法主要采用现场取样室内测试的手段, 分为瞬态法和稳态法^[7]。稳态法测试的基本原理是用仪器在土样两端施加一定的温差, 待土样内形成恒定的一维热流后, 测得其热流与温度梯度, 即可根据傅里叶定律计算热导率。但土体一般为三相体, 形成稳定的热流需要的时间较长 (30~40

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578146, 51778138); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX18_0106)

收稿日期: 2019 - 03 - 11

min), LOW 等^[8]的试验表明温度作用下土体内部的水分迁移和相伴的热固结^[9]会影响测试结果。瞬态法则主要为热探针法^[10], 已写入 ASTM^[11]、IEEE^[12]规范。其基本原理是用针状的探头插入土体, 之后施加一定的热流, 记录探针中温度随时间变化曲线, 并根据线热源理论公式, 反演土体热导率。该方法测试时间较短, 可以避免由加热引起的土体热物性变化, 能有效测量土样的热物性。但原位土体与室内土样的导热条件存在一定差异, 导致室内试验结果与实际情况不能完全相符。

室内试验^[10, 13-17]表明土体热导率与土类、颗粒分布、密度、孔隙率、含水率、矿物组成等有关。土体取样和运输过程中其密度、含水率都有可能受到扰动, 即使室内试验测量准确, 其热导率与原位土体可能还有差距。Abuel 等^[18]利用改造的固结仪测试了不同有效竖向压力下饱和 Bangkok clay 的热导率, 结果表明固结导致的孔隙率变化引起了土体热导率的显著变化, 100, 400 kPa 竖向压力下的热导率相差近 20%。因此, 取样造成的应力卸除可能造成室内测试结果偏小, 低估原位土体的换热能力, 造成工程设计的偏差。在工程原位进行土体热导率测试可以较好地表征土体的实际换热能力, 但现有的原位测试方法还较为有限。

ASHRAE 规范^[19]建议了用热响应试验测试原位土体热导率方法, 应用于地源热泵垂直埋管换热器的设计。其基本原理与热探针类似, 通过垂直插入预钻孔内的热交换管持续向地层以恒定功率放热, 用记录的流体温度变化计算地层热导率, 该方法钻孔深度在几十米到几百米不等^[20], 测试时间往往大于 50 h^[21], 成本较高, 且测试得到的是一个综合地层热导率, 不能精确反映不同土层换热能力的不均匀性, 造成埋管、能源地下结构的换热能力设计的不精确^[22]。目前有研究^[23]采用光纤对换热管内的温度进行分布式测量并用非线性回归法估计各土层的热导率分布, 但其

对测试设备与数据分析要求较高, 尚未得到广泛应用。热探针也有用于现场测试^[24]中的先例, 因为其尺寸较小易于折断, 且需须在现场预钻孔后再插入热探针进行测试, 此方法操作复杂, 测试深度有限, 仅能用于表层土。Akrouh^[25]利用温度消散与孔压消散的相似性, 记录 CPT 探头因贯入过程与土摩擦产生的过余温度及消散过程, 提出了测量原位土体热导率的经验公式, 在有限的测试场地证明有效, 摩擦产生的热量在探头内部的分布并不均匀, 此经验公式有其局限性。

综上, 现有室内测试热导率受取样影响较大, 而已有现场测试方法费时费力, 且不能反映热导率随土层、深度的变化。本文以瞬时线热源理论为基础, 提出一种通过外部热源加热 CPT 探头测试土体热导率的方法。通过理论分析确定相关设计参数, 用数值模拟验证了其在不同热导率土体中的可行性。并通过现场测试应用, 分析了原位测试与取样测试热导率结果的区别。

1 仪器原理与测试方法

1.1 仪器原理与构造

本文研发的热传导探头基于一种瞬态测试方法, 基本原理是在传统静力触探 (CPT) 探头的后部增加一加热模块 (图 1 左), 给土体施加一定时间的热流后监测其温度消散过程, 利用瞬时线热源理论公式对温度消散曲线进行分析, 即可得到测试深度处土体的导热系数。

由于理论公式假设热源是无限长的, 为减小实际传热模式与模型的误差, 因此需要设计探头具有较大的长径比。Blackwell^[26]的分析表明, 当长径比大于 30 时, 实心热探针由轴向传热引起的误差小于 0.12%。参考市场主流的热探针几何特征^[27-28]与国产 CPT 测试系统的尺寸要求, 最终确定加热模块高度为 100 cm, 其构造如图 1 所示。其中, 中空轴直径为 1.84 cm,

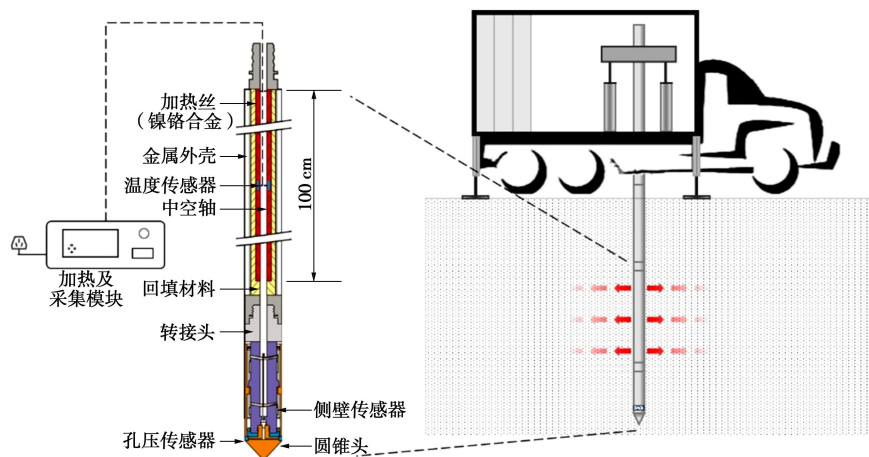


图 1 热传导 CPT 探头基本结构及测试原理

Fig. 1 Basic structure of heat conduction CPT probe and principle of tests

与国产探杆螺纹插线端内径相同, 加热片及温度传感器线路由其中引出; 中空轴外贴可均匀发热的镍铬合金加热片, 厚度为 1.5 mm。温度传感器嵌于此层, 位于加热片 50 cm 高处; 探头最外部为合金外壳, 能满足贯入过程中的硬度要求与导热性要求, 其外径为 44 mm, 内径为 25 mm; 外壳与加热片之间的缝隙用材料填充以增强换热。

1.2 热导率计算模型

瞬时无限长线热源模型^[29]是描述一个单位长度热量为 Q 的无限长线热源在无限大固体中瞬时释放后的温度响应规律。其解由瞬时点热源的温度场函数积分得到。

介质中的热传导微分方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中, T 为任意一点的温度 ($^{\circ}\text{C}$); t 为传热时间 (s); $\alpha = \lambda / \rho c$ 为热扩散系数 (m^2/s); λ 为介质热导率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); ρ 为介质密度 (kg/m^3); c 为介质比热容 ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)。由傅里叶变换得到其解为

$$T = \frac{A}{8(\pi\alpha t)^{3/2}} e^{-[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]/4\alpha t}。 \quad (2)$$

对式 (2) 从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 积分可得整个域中所含热量 Q 为 $A\rho c$, 即式 (2) 表示无限大固体中在 x', y', z' 点处瞬时放出 $A\rho c$ 的热量的温度场分布规律。

将式 (2) 右端乘 dz' 并在 $-\infty$ 到 $+\infty$ 积分可得

$$T = \frac{Q}{4(\pi\lambda t)^{3/2}} e^{-[(x-x')^2 + (y-y')^2]/4\alpha t}。 \quad (3)$$

T 表示单位长度热量为 Q 的无限长热源瞬时释放时的温度响应, 若热源位于坐标原点, 在极坐标下可写为

$$T(r, t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi\lambda t} e^{-\frac{c\rho r^2}{4\lambda t}}, \quad (4)$$

式中, r 为距离热源距离 (m), T_0 为初始温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

对式 (4) 两端取对数得

$$\ln(T - T_0) = \ln\left(\frac{Q}{4\pi\lambda}\right) - \ln t - \frac{c\rho r^2}{4\lambda t}。 \quad (5)$$

当时间 t 很大而 r 很小的时候, 可以忽略式右边最后一项, 可得土体热导率可表示为

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi[t(T - T_0)]}。 \quad (6)$$

用式 (6) 计算热导率需要介质的初始温度 T_0 , 它可在试验之前测得, 也可由温度完全消散的最终温度得到, 但因温度消散过程缓慢, 利用 Ghassan 等^[25]提出的双曲线公式 (7) 可以对已获得的温度消散曲线进行拟合并预测最终温度:

$$\Delta T = T_i - T = \frac{t}{d + et}, \quad (7)$$

式中, T_i 为温度消散起始点时的温度, e 为待定系数。当 $t \rightarrow +\infty$ 时, $\Delta T \rightarrow 1/e$, 因此,

$$T_0 = T_i - 1/e。 \quad (8)$$

1.3 测试方法

测试方法与传统 CPT 测试类似, 将上述加热模块直接与刚性锥尖联接可以专用于仅热导率测试; 或通过转接头与传统 CPT 探头联接, 可同时测试土体贯入参数与热导率。测试时, 利用 CPT 贯入装置, 将热探头贯入至待测土体深度后, 开始以 200 W 的恒定功率向周围土体加热 120 s 之后, 停止加热, 此时刻为温度消散起始点, 并持续记录温度随时间变化至 1000 s。将得到的温度曲线消散段用式 (7) 拟合, 再代入 (6) 中进行计算, 即可得到土体热导率。

2 探头传热分析及计算方法验证

由于上述理论分析及相应测试方法是基于理想的瞬时线热源假设提出的, 即使设计探头尺寸与构造已使其传热过程接近于理论模型, 对所提测试方法的可行性验证还需考虑以下两方面影响: ①测试过程中前 120 s 为主动加热段, 探头与土之间有少部分热量传递, 释放的热量对土体原先温度场可能造成了一定扰动; ②热传导 CPT 探头后接探杆及锥尖位置的热传导方向并非完全径向, 可能高估热消散阶段总放热量 Q 。为此, 本文利用数值模拟对设计测试过程进行仿真计算, 评估以上因素对测试结果的影响, 并验证所提方法的可行性。采用数值分析软件 COMSOL 根据探头结构与土中热传导特性, 建立二维轴对称模型 (图 2) 对测试过程进行热传导分析。

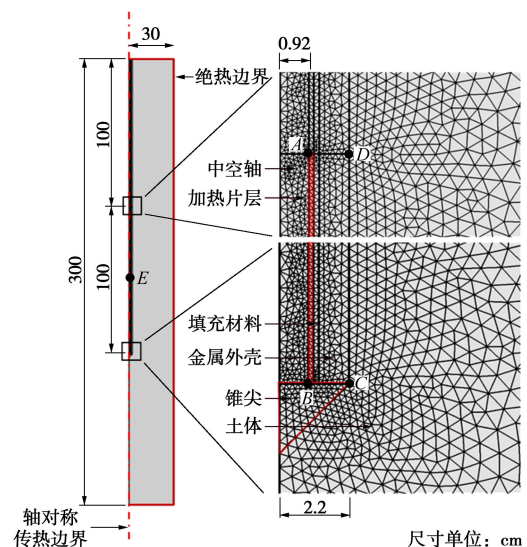


图 2 原位热物性测试数值模型

Fig. 2 Numerical model for in-situ thermal conductivity tests

2.1 几何模型及边界条件

为排除计算边界对探头传热过程的影响, 根据测试时间及加热功率, 选取长 300 cm, 宽 30 cm 的土层为计算区域, 如图 2 所示。采用固体传热模块, 基于 1.1 节中的尺寸设计, 建立热传导 CPT 探头后接一节探杆置于土中的几何模型。因热探头释放的热量相对较小, 其轴向热传递影响范围较为有限, 当加热片位于锥尖后的第一节内时, 共建立两节探杆即可代表任意深度中的传热情况。探头长度相对于土层厚度较小, 假设其周围土体均匀, 热物性不变。

根据探头几何特征与土中热传导特点, 选取计算域左边为轴对称传热边界, 其他边界为绝热边界。整体模型初始温度设为 20℃。探头整体与周围土体接触良好, 忽略其接触热阻。

2.2 模型参数及测试工况

模型所用材料物理参数表 1 所示, 其中加热片、回填材料和金属外壳材料参数由生产厂家提供, 土体参数选取为现场土样代表值。通过第一节内加热片层 (即图 2 中标红网格区域) 向探头及周围土体放热。其加热功率设置为分段函数, 在 0~120 s 体加热功率为 200 W, 120~1000 s 功率变为 0 W。在加热片的中心 (图 2 中 *E* 点) 位置放置点探针, 记录探头中部的温度变化曲线; 在加热模块周围的边界 *AB*、*BC*、*CD*、*DA* 上设置热流轴对称面积积分, 研究探头轴向与径向热流分布。

表 1 模型热物性参数表

Table 1 Summary of thermal properties of numerical model			
材料	热导率 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	比热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K)$	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$
空气	0.026	1015	1.16
加热片	24.2	869	2548
回填材料	0.23	1050	2200
金属外壳	46	900	2700
土体	—	900	2000

注: 研究对土体进行参数化扫描研究, 每组热导率间隔为 0.3 W/(m·K), 范围为 0.6~2.7 W/(m·K)。

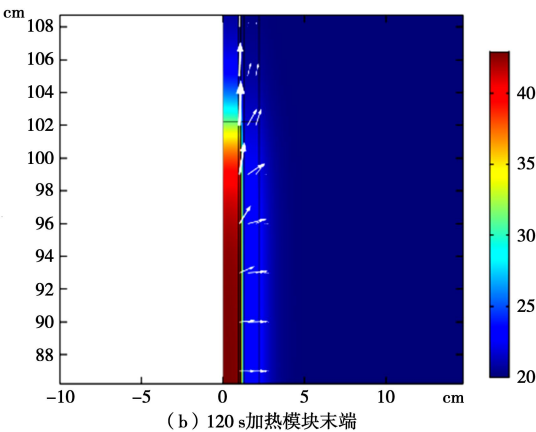
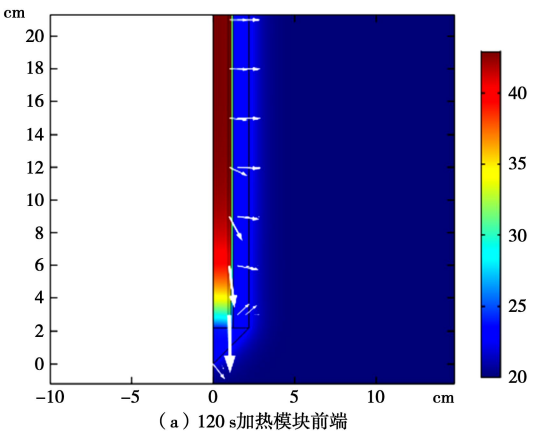
2.3 计算结果及分析

(1) 温度场发展及热流传递规律

图 3 给出了土体热导率为 1.8 W/(m·K) 时测试过程中典型时刻加热模块前端与末端的温度分布, 其中白色箭头的长度与方向表示热通量的相对大小与方向。图 3 (a), (b) 表明: 加热过程结束时刻 (120 s), 热量还主要存在于探头金属外壳之内, 对周围土体温度场的影响范围较小, 约 5 mm。热探头内部热量主要集中于加热片。加热片上下两端有着较为明显的轴向热流 (图上箭头所示)。这是由于与其相接的锥尖和探杆都有较好的导热性能, 且加热片短时发热造成了较大的温度差, 增强了轴向传热。但轴向传热在探头中部 (10~95 cm) 处已不再显著, 基本以径向传热为主。

图 3 (c) ~ (f) 表示加热片温度随时间急剧下降, 热探头内部的温度场趋于均匀。热流箭头的方向分布表明: 随着时间的增长, 探头两端的轴向传热区域有一定的扩展, 但此轴向传热主要存在于金属外壳内部。而外壳外部与土体接触的区域, 温度传递仍以径向为主。整体上, 200, 500 s 时刻热探头内部的温度有显著下降, 加热片与其周围介质的温度差也显著下降, 轴向传递的能量较少。

图 4 展示了图 2 中 *ABCD* 区域各边界在整个传热过程中的热流功率与累计热流量。虽然加热片发热功率一定, 但由于其有一定热熔和上述端部传热存在, *CD* 边向外侧传递的热流功率并未达到加热功率, 停止加热后, 加热片继续向外放热, 但功率显著下降。其余边界也有热流出, *BC*、*DA* 边界因长度远小于 *CD*, 其通量远小于 *CD* 边。而 *AB* 边外侧为热熔较小的空气, 且临近轴对称换热边界, 其换热量也远小于 *CD* 边。图 4 虚线统计了各边界的累计热流量占比, 热流主要从 *CD* 边流出, 占 99.7 %。因此, 本研究探头的实际传热基本符合线热源假设, 端部传热效应并不显著。



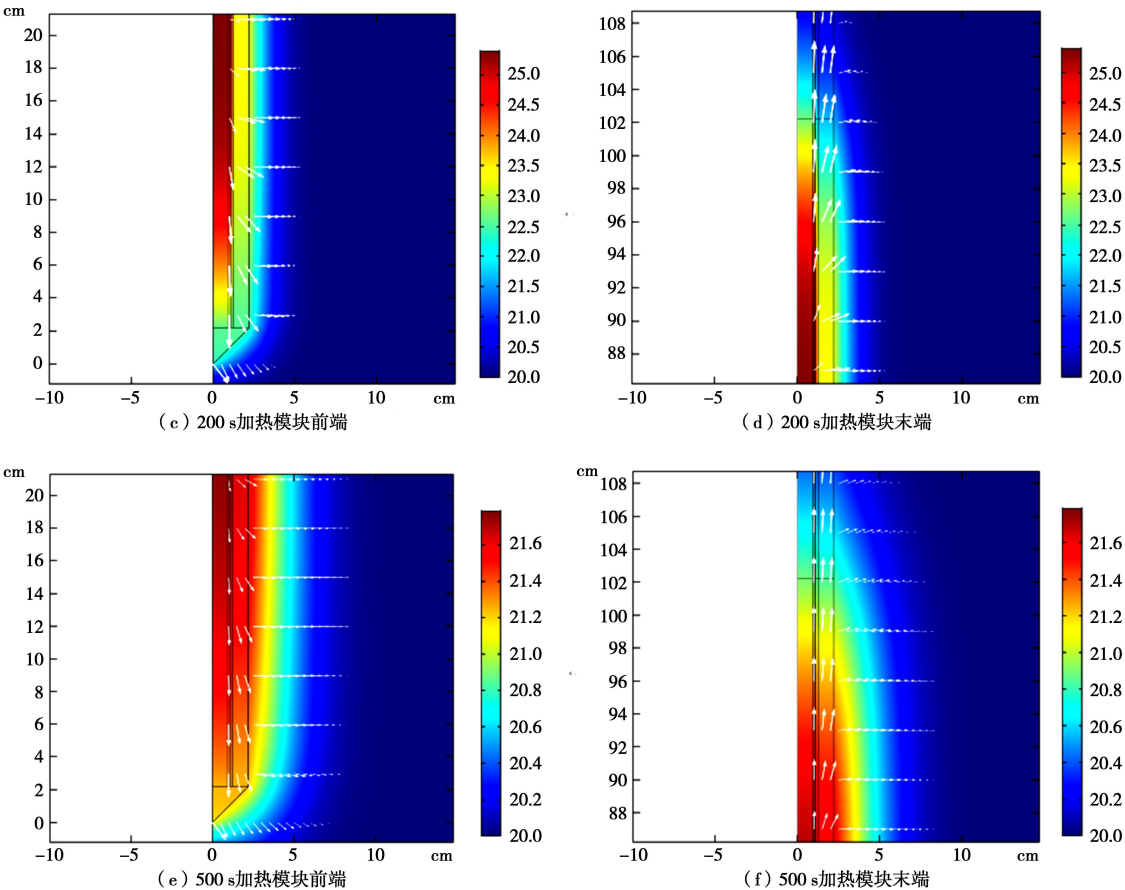


图 3 典型测试温度场与热流场分布云图 (土体热导率 1.8 W/(m·K))

Fig. 3 Distribution of temperature fields and heat flows of a typical test in 1.8 W/(m·K) soil

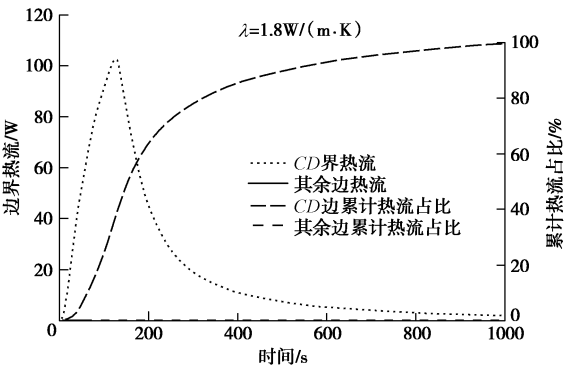


图 4 探头各边界热流分布变化

Fig. 4 Variation of heat flows though each boundary of probe

(2) 土体热导率参数求解

图 5 给出了土体热导率 1.8 W/(m·K)时 E 点记录的温度变化曲线, 其温度在 120 s 时达到峰值之后下降。利用消散段曲线, 根据式 (7) 进行参数拟合, 从而得到拟合的温度消散曲线 (图 5 中虚线), 拟合效果较好。消散至 1000 s 时, E 点温度为 21℃, 而选用拟合参数 d 为 1.23, e 为 0.0438, 根据公式 (8) 可得拟合地温为 20.13℃。以 120 s 为起点, 依据式 (6) 即可计算土体热导率随时间的变化, 如图 6 所示。可以看出, 在开始消散时, 反演热导率高估了真实值, 是

因为式 (6) 的计算值是由式 (5) 去掉最后一项近似得到。因此, 在温度消散初期即 t 较小时, 忽略式 (5) 末项高估了 λ 值。而随着时间增长, 此项对热导率计算的影响逐渐消失, 计算热导率趋于定值, 最终在 1000 s 时, 由拟合曲线求得的土体热导率为 1.73 W/(m·K)。

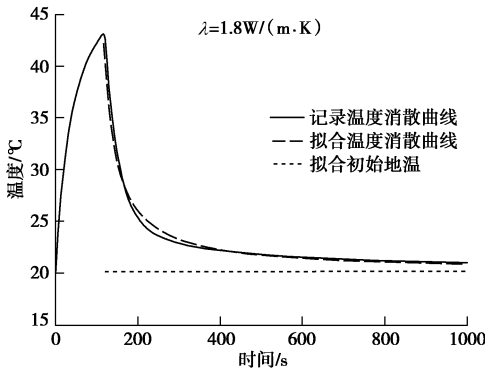


图 5 拟合温度消散与初始地温

Fig. 5 Fitted temperature dissipation and initial ground temperature

图 6 还展示了若用原消散曲线和初始地温反演得到的土体热导率, 其主要趋势与拟合曲线一致, 但最终求得土体热导率为 1.53 W/(m·K), 比真实值偏小。

这是由于本探头在消散开始前的加热段, 一部分热量先行扩散进入周围土体, 对初始地温场造成扰动, 温度有所升高。在此条件下, 消散过程的实际温度比理论假设略高, 因此式 (6) 中 T 值偏大, 造成了计算热导率偏小。而拟合方法有效地抵偿了前期热流引起的误差, 求得近似真实值的土体热导率。

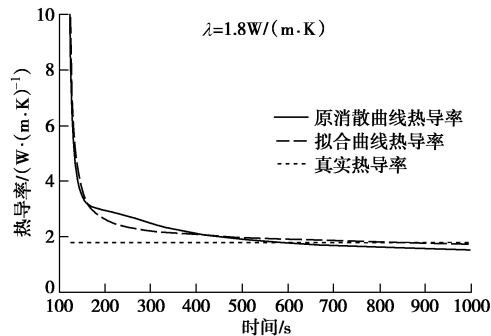


图 6 土体热导率计算

Fig. 6 Calculated results of thermal conductivity of soil

表 2 总结了土体热导率在 $0.6\sim 2.7\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 范围内的拟合消散与原消散曲线反演的土体热导率及相对误差。结果表明, 拟合法在热导率为 $0.9\sim 2.7\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的土中效果较好, 最大误差 11%, 而测试低热导率土体时 (不大于 $0.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 本文方法计算结果偏高; 原消散曲线计算值在热导率低于 $1.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时偏高, 高于此值时偏低。这是由于热导率 λ 较低时, 公式 (5) 中最后一项偏大, 因此需要更长的消散时间 t 来使公式 (6) 的近似成立, 因此计算结果高于真实值。在热导率较低时, 两种方法均产生了一定误差, 且因真实值较小, 相对误差较大。

表 2 参数化扫描结果

Table 2 Summary of parametric sweep results

土体热导率 $/(W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1})$	拟合消散热导 率 $/(W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1})$	误差 /%	原消散热导率 $/(W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1})$	误差 /%
0.6	0.85	42	0.89	48
0.9	1.00	11	1.02	13
1.2	1.21	1	1.20	0
1.5	1.46	-2	1.37	-9
1.8	1.73	-4	1.53	-15
2.1	2.05	-2	1.70	-19
2.4	2.37	-1	1.85	-23
2.7	2.79	3	2.00	-26

注: 误差为 (拟合值-真实值)/真实值, +表示高估, -表示低估。

若延长观测的消散时间, 即使增大 t 来消除因 λ 较小引起的误差, 其结果如图 7 所示。可以看出, 计算热导率随消散时间增长不断接近于真实值, 但在 1000 s 处还有较大误差, 在 2000 s 处其值 $0.572\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 才可作为反演的热导率结果。因此, 本方法在导热性较差的土体中, 需要更长的测试时间, 或者提出改进的反算方法才能兼顾测试效率与准确度。

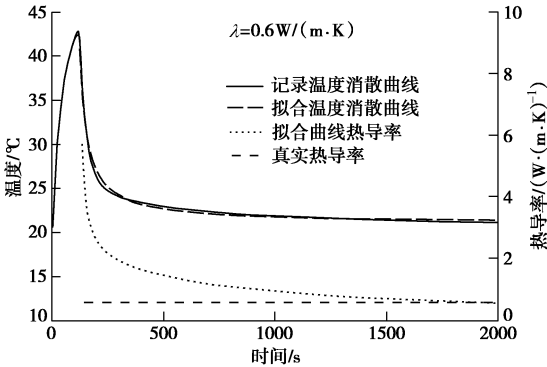


图 7 温度消散 2000 s 曲线与热导率计算(真实值 $0.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

Fig. 7 Temperature dissipation for 2000 s and calculated thermal conductivity of soil (true value $0.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

3 现场测试对比分析

3.1 场地描述及测试

依照上述对探头的设计思路, 研发的热传导 CPT 探头及加热装置和数据采集仪如图 8 (左) 所示。热传导探头后端尺寸与国产 CPT 探杆尺寸一致, 可共用连接杆, 并可安装于通用 CPT 测试贯入设备及车辆。采用东南大学岩土工程研究所引进的美国 Vertek-Hogentogler 贯入装置进行热传导 CPT 探头原位试验 (图 8 (右)), 场地位于南京东南大学九龙湖校区的试验基地。

根据场地工程勘察报告, 场地位于秦淮河漫滩地貌单元上, 地形平坦, 地下水深 1.0 m 左右, 其迳流缓慢。地表以下 2.9 m 为杂填土, 2.9~4.3 m 为黏土, 4.3~11.5 m 为一层较厚的淤泥质粉质黏土层。粉质黏土层分布较为均匀, 且渗透性较差, 可以排除地下水渗流对探头传热的影响, 选作为现场测试层。对该测试土层取 3 个原位土样, 用 DZDR-S 型瞬态平面热源导热仪进行热物性室内测试, 测得土样平均热导率 λ_t 为 $1.15\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

热探头贯入操作按照传统 CPT 的操作要求进行, 探头以 2 cm/s 的速度均匀贯入探头至 5.3 m 深处土体。待温度读数稳定, 记录初始值为 20.4°C , 随后开始加热测试。

3.2 测试结果分析

现场土体温度升高和消散的测试与拟合曲线如图 9 所示, 拟合曲线与实际消散曲线重合较好, 能较好地反映实际温度消散规律。

图 10 对比了现场/拟合消散曲线所计算的热导率值与取样测试值的关系。原曲线与拟合曲线计算热导率值在 1000 s 时分别稳定在 $1.03\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 与 $1.28\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

消散前的加热段对初始地温场产生了一定扰动, 造成原消散曲线计算值小于室内测试值, 与 2.3 节中



图 8 热传导 CPT 测试系统与现场测试

Fig. 8 Heat conduction CPT probe system and field application

数值模拟分析规律一致。拟合法算得的热导率较高,比室内测试值 λ_L 高 11%, 这可能说明取样测试法低估了土体实际的换热能力。事实上, 原位土体因受到上覆土压力作用, 未经扰动时密度较大, 其孔隙比较小, 土颗粒接触紧密, 有利于热量传递; 土体取样与室内热导率测试过程中经历应力卸载与扰动导致水分散失, 可能造成土体换热能力下降, 从而造成了原位测试值略高于室内试验结果。

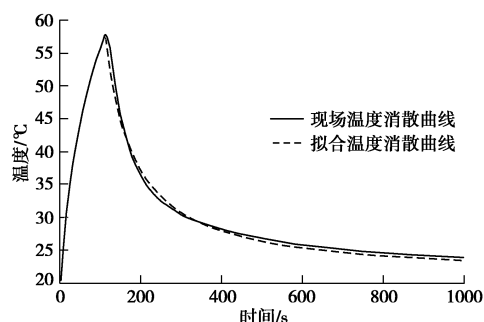


图 9 现场测试与拟合温度消散曲线

Fig. 9 In-situ test and fitted temperature dissipation

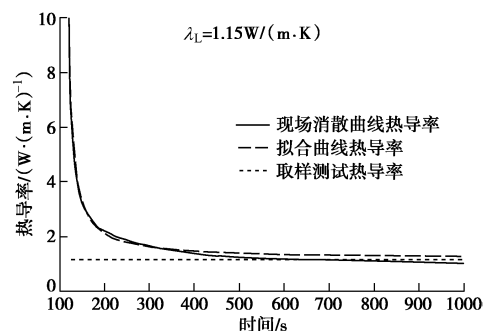


图 10 现场土体热导率计算

Fig. 10 Calculation of thermal conductivity of in-situ soil

4 结 论

根据目前工程领域对原位土体换热性能评估的需求, 研发了一种热传导 CPT 探头及配套的测试方法, 试验分析得到以下 3 点结论。

(1) 瞬时线热源理论是热传导 CPT 的理论基础,

它准确地描述探头温度消散与周围土体热导率之间的关系。根据该理论分析设计了探头具体尺寸参数, 确定了先施加热流后观测温度消散的测试方法, 给出了土体原位热导率计算方法。

(2) 对探头测试过程及热导率计算进行数值模拟验证, 表明探头传热符合线热源理论假定, 验证了热传导 CPT 测试方法在大部分土体中 (大于 0.6 W/(m·K)) 的有效性。对于热导率较低的土体, 由简化的理论公式求得热导率将高于真实值, 采用适当延长温度消散记录时间可有效提高测试精度。

(3) 现场测试与室内取样测试结果对比发现, 原位土体热导率略高于室内测试值, 说明取样扰动会降低土体换热性能, 与现有研究成果相吻合。本文提出的热传导 CPT 测试技术, 具有理论完善, 测试准确, 高效经济等特点, 可在能源地下结构、地下管道等工程的土体热传导原位测试中推广应用。

参考文献:

- [1] BRANDON T, MITCHELL J, CAMERON J. Thermal instability in buried cable backfills[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(1): 38 - 55.
- [2] SLEGEL D L, DAVIS L. Transient heat and mass transfer in soils in the vicinity of heated porous pipes[J]. Journal of Heat Transfer, 1977, **99**(4): 541 - 546.
- [3] 白 冰, 赵成刚. 温度对黏性土介质力学特性的影响 [J]. 岩土力学, 2003, **24**(4): 533 - 537. (BAI Bing, ZHAO Cheng-gang. Temperature effects on mechanical characteristics of clay soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(4): 533 - 537. (in Chinese))
- [4] LACKNER R, AMON A, LAGGER H. Artificial ground freezing of fully saturated soil: thermal problem[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, **131**(2): 211 - 220.
- [5] 商允虎, 牛富俊, 刘明浩, 等. 多年冻土区桥梁工程桩基础服役期温度场研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017,

- 36(9): 2313 – 2323. (SHANG Yun-hui, NIU Fu-jun, LIU Ming-hao, et al. Long-term effect of a pile foundation on ground temperatures in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2313 – 2323. (in Chinese))
- [6] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. *Géotechnique*, 2006, 56(2): 81 – 122.
- [7] FAROUKI O T. Thermal Properties of Soils, CRREL Monograph 81-1[R]. New Hampshire: U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover, 1981.
- [8] LOW J E, LOVERIDGE F A, POWRIE W, et al. A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications[J]. *Acta Geotechnica*, 2015, 10(2): 209 – 218.
- [9] 郭志光, 白冰. 描述饱和土热固结过程的一个非线性模型及数值分析 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2061 – 2067. (GUO Zhi-guang, BAI Bing. Nonlinear model and numerical simulation of thermal consolidation process of saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2061 – 2067. (in Chinese))
- [10] BRANDON T, MITCHELL J. Factors influencing thermal resistivity of sands[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(12): 1683 – 1698.
- [11] ASTM. D5334-14: Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure[S]. West Conshohocken, PA, USA; ASTM International. 2014.
- [12] IEEE Std 442-1981 IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements[S]. New York; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1981.
- [13] GANGADHARA RAO M, SINGH D. A generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(4): 767 – 773.
- [14] 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: 1285 – 1290.
- [15] SINGH D N, DEVID K. Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, 22(3): 133 – 143.
- [16] 肖琳, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 含水量与孔隙率对土体热导率影响的室内实验 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, 9(3): 241 – 247. (XIAO Lin, LI Xiao-zhao, ZHAO Xiao-bao, et al. Laboratory on influences of moisture content and porosity on thermal conductivity of soils [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2008, 9(3): 241 – 247. (in Chinese))
- [17] BARRY-MACAULAY D, BOUAZZA A, SINGH R M, et al. Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region[J]. *Engineering Geology*, 2013, 164: 131 – 138.
- [18] ABUEL-NAGA H, BERGADO D, BOUAZZA A. Thermal conductivity evolution of saturated clay under consolidation process[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2008, 8(2): 114 – 122.
- [19] ASHRAE, Methods for determining soil and rock formation thermal properties from short-term field tests, ASHRAE Research Summary 1118-TRP[R]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2002.
- [20] SANNER B, HELLSTR M G, SPITLER J, et al. Thermal response test—current status and world-wide application[C]// *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey, 2005: 1 – 9.
- [21] ZHANG C, GUO Z, LIU Y, et al. A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 851 – 867.
- [22] DENG Y, FEDLER C. Multi-layered soil effects on vertical ground-coupled heat pump design[J]. *Transactions of the ASAE*, 1992, 35(2): 687 – 694.
- [23] FUJII H, OKUBO H, NISHI K, et al. An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers[J]. *Geothermics*, 2009, 38(4): 399 – 406.
- [24] EWEN J, THOMAS H R. The thermal probe—measurement of the thermal conductivity and drying rate of soil in the field[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1992, 15(3): 256 – 263.
- [25] AKROUCH G A, BRIAUD J-L, SANCHEZ M, et al. Thermal cone test to determine soil thermal properties[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 142(3): 04015085.
- [26] BLACKWELL J. The axial-flow error in the thermal-conductivity probe[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1956, 34(4): 412 – 417.
- [27] Hukseflux Inc. Hukseflux Thermal Sensors. MTN01 Manual[M]. Cersion 1008. The Netherlands, Delft: Hukseflux Inc., 2003.
- [28] Decagon Devices, Inc. KD2 Pro Thermal Properties Analyzer Operator's Manual[M]. Version 5. Pullman, Washington: Decagon Devices, Inc., 2008.
- [29] CARSLAW H S, JAEGER J C. *Conduction of Heat in Solids*[M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959.