

浅层岩土热物性参数测试与分析

李 强

(上海岩土工程勘察设计院有限公司, 上海 200031)

【摘 要】介绍了浅层岩土热物性参数测试的计算模型、测试方法等。以线热源模型为基础,采用斜率法计算导热系数,按照室内试验及工程经验选取容积比热容,从而求得热阻,通过实例验证了该方法的准确性。现场实测表明热干扰距离的研究难以通过单孔热响应测试获得,可按已有研究成果选取。

【关键词】热响应测试;线热源模型;岩土热物性参数

【中图分类号】TU452

【文献标识码】B

【文章编号】1001 - 6864(2010)07 - 0100 - 02

岩土导热系数等热物性参数是地埋管地源热泵系统中设计埋地换热器的重要依据。如果岩土导热系数不准确,则设计的系统可能无法满足负荷要求,也可能导致规模过大,增加初投资。<sup>[1]</sup>

确定岩土热物性参数的方法有三种:一是,根据地层的岩性及物理性质指标查阅相关手册,不足之处在于经验范围较大,取值偏于保守,易造成资源浪费。二是,取土样进行室内试验,由于土样脱离了原位的地质环境,不能反映实际土层特性。三是,原位测试法(热响应测试等),克服了以上两种方法的不足,给出了实际钻孔深度内土层的热物性特征,在实际应用中更为准确可靠。<sup>[2]</sup>

1 计算模型

目前计算埋地换热器与周围土壤换热较为成熟的模型有线热源模型和圆柱热源模型。圆柱热源模型需要埋管的具体位置、上升管和下降管之间的距离以及埋管和回填材料的物性等参数。鉴于测量的困难和钻孔内埋管埋设的不确定性,这些参数的误差均较大,影响最终物性结果的可靠性。故工程实践中以线热源模型应用最多。<sup>[3,4]</sup>

假定钻井处于不受热扰动影响的温度场内,且经过一定的时间,可得到钻井散出的热量的热扩散率,则可用简化的线热源公式计算土壤导热系数,通过测量温度、流量进行反向推算土壤传热性能。其基本原理如下:

$$T^h(r,t) = \frac{Q}{4 \cdot H \cdot a} \int_0^t \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4 \cdot H} E_1 \left[ \frac{r^2}{4at} \right] \tag{1}$$

流体温度随时间变化的函数式可以写为:

$$T_f(t) = \frac{Q}{4 \cdot H} \left[ \ln \frac{4at}{r^2} - \frac{1}{2} \right] + \frac{Q}{H} R_b + T_0 \tag{2}$$

通过计算温度与自然对数时间曲线的斜率可以得到温度的响应规律:

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m \tag{3}$$

$$k = Q / 4 \cdot H \tag{4}$$

式中,  $T_f$  为管内水的平均温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_b$  为钻孔壁面温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_0$  为岩土初始温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $r$  为钻井半径, m;  $H$  为钻井深度, m;  $R_b$  为热阻,  $\text{m} \cdot \text{K}/\text{W}$ ;  $t$  为测试时间, s;  $Q$  为换热功率, W;  $a$  为热扩散率,  $\text{m}^2/\text{s}$  为导热系数与容积比热容  $C_s$  的比值, 结合相关经验,本次取  $C_s = 2.8 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

2 测试方法

热响应测试以图 1 的流程进行准备及测试工作。

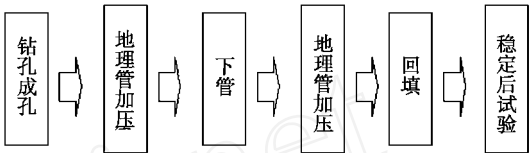


图1 地埋管换热井施工流程

成井采用 SH - 30 钻机,预成孔后采用扩孔钻具将孔径扩至 130mm。用人力和专用工具把 PE 管下至孔底,竖直地埋管下管前及下管后,按规范要求,均需进行水压测试,以检测地埋管是否完好<sup>[5]</sup>。同时,地埋管沉管应在有压状态下进行。地埋管内加压充填的介质采用自来水。待地埋管沉管完成及水压测试满足要求后,即可进行测试并回填,本次回填主要采用膨润土加水泥混合物孔底压浆封填,上部采用黄沙人工回填。为充分消除钻孔施工对周围岩土的影响,获得稳定、准确的地下岩土初始温度及岩土热物性参数等,本次地埋管换热井成井均在静置 72h 后进行测试工作。

试验前对温度传感器和流量计进行校正。模拟夏季放热试验时,采用恒热流法热响应测试,通过控制加热量及水流量,保持加热功率恒定,使系统达到基本稳定后的温度控制在 35 ~ 37 左右,控制流速在 0.5 ~ 0.7m/s,连续测试时间不少于 48h。

3 测试成果

表 1 地埋管换热性测试概况

| 孔号 | 成井深度 | 埋管深度 | 埋管形式 | 测试工况 |
|----|------|------|------|------|
| 1# | 42m  | 40m  | 双 U  | 模拟夏季 |
| 2# | 42m  | 40m  | 双 U  |      |

工程所在场地在自然地面下 42m 深度范围内的地基土主要由填土、粘质粉土、淤泥质粘土、粉质粘土夹粉砂及粉砂组成。测试概况如表 1 所示。共有二个测试孔,均采用双 U 型管,材料采用聚乙烯管 (PE100),管外径为 32mm,内径为 26mm,埋管深度均为 40m。其中 1#孔周围布置三个

温度测试孔,每个孔布置 5 个温度传感器。

3.1 岩土初始平均温度测试

温度测试孔内各温度传感器的埋置深度分别为 8、16、24、32、40m (其中 T1 孔 40m 位置温度传感器失效)。把各温度测试孔所测岩土温度的算术平均值作为岩土初始平均温度。则岩土初始平均温度为 17.78 。

3.2 地埋管热响应测试

对 1#孔及 2#孔均进行了放热性能测试,试验时,保持恒定加热功率,通过水泵不断向地埋管输入一定温度的热水,并分别对进、出水管中的水温进行连续测读,持续时间为 48h。进、出水口温度变化如图 2~3 所示。由此可得,地埋管在经过一段时间水循环后,进、出水口温差均基本恒定,表明此时地下热交换已基本达到平衡状态,得出本次地埋管单位管长的平均放热率,得到 40m 深度的 1#、2#双 U 型地埋管每米孔深的平均放热能力分别为 65.8W/m、67.1W/m。

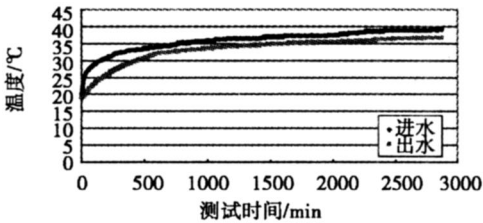


图2 1#孔放热过程进出水水温曲线

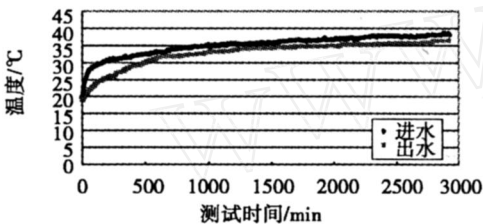


图3 2#孔放热过程进出水水温曲线

3.3 岩土导热系数及热阻

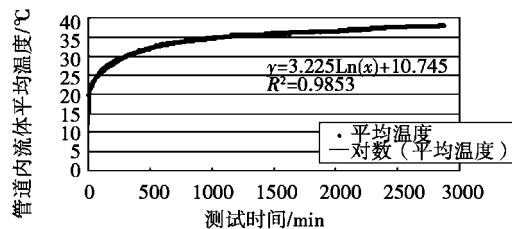


图4 1#孔管中流体平均温度变化曲线

根据 1#孔、2#孔放热工况下实测的数据绘制对数时间曲线,如下图 4、5 所示。根据实测的 40m 深的双 U 型地埋管放热过程中的进、出水温度数据,得到 1#、2#孔的土壤导热系数分别为 1.623、1.749W/m·K; 1#、2#孔的热阻分别为 0.285、0.262m·K/W。拟建场地平均导热系数为 1.686W/m·K,平均热阻为 0.274,与经验值相符。

3.4 地埋管的热干扰距离

地埋管的热干扰距离是布置埋管间距的重要因素之一。通过在埋管周边布置地下土体温度监测孔,测试地

埋管换热过程中监测孔温度的变化来确定热干扰距离。本次在 1#孔周围布置了不同间距的 3 个温度测试孔。热响应测试过程中各观测孔中典型测点的监测结果见图 6 所示,表明埋管在放热过程中各测试点的温度基本保持恒定。

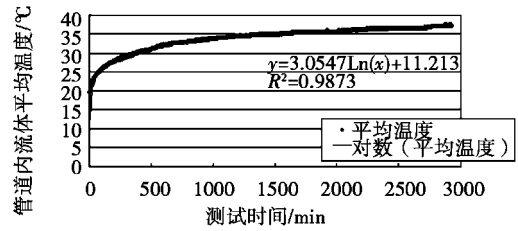


图5 2#孔管中流体平均温度变化曲线

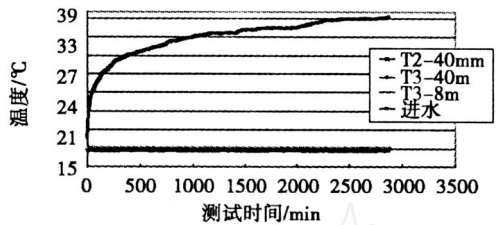


图6 1#孔地埋管放热过程温度监测孔曲线

由于本次测试为单孔测试,放热量小,且运行时间相对较短(相对于地源热泵空调系统后期常年运行而言),同时受到地下水径流的影响,地埋管放热性能测试过程中,温度监控孔内的探头温度没有明显变化趋势。根据已有研究成果,长期间歇运行的竖直地埋管的间距一般为 3~5m,当地埋管间距达到 6m 时,基本已无热干扰影响。

4 结语

根据线热源计算模型,实测工程实例所得热物性参数与经验值相符,测试成果可为设计提供参考。单孔测试由于运行时间较短等原因无法获得热干扰距离,设计可参阅已有研究成果。线热源模型将钻孔内外岩土视为整体,忽略了回填材料和岩土的差异。另外,本次未考虑地下水渗流及季节效应等对测试的影响,有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 周亚素.土壤导热系数的现场测试方法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(4): 482-485.
- [2] 韩华,孙保卫,王峰,等.现场测试地层平均热物性参数方法初探-以北京某工程地源热泵系统地层热物性测试评价工程为例[J]. 城市地质, 2007, 2(2): 27-31.
- [3] 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]. 太阳能报, 2006, 27(3): 279-282.
- [4] 赵军,段征强,宋著坤,等.基于圆柱热源模型的现场测量地下岩土热物性方法[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 934-936.
- [5] GB 50366-2005,地源热泵系统工程技术规范(2009版)[S].

[收稿日期] 2010-03-03

[作者简介] 李强(1976-),男,银川人,工程师,从事岩土勘察测试工作。